

Como a Física Quântica impulsiona a investigação em Fusão e Plasmas Extremos

Marija Vranic¹, Bruno Gonçalves²

Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

marija.vranic@tecnico.ulisboa.pt¹, bruno@ipfn.tecnico.ulisboa.pt²

Resumo

Os plasmas são gases ionizados compostos por partículas carregadas em movimento. Esta “sopa” de cargas interage com campos elétricos e magnéticos podendo, por exemplo, ser acelerada até altas energias ou “blindar” estes campos. Considera-se que um plasma é extremo quando os campos eletromagnéticos são tão intensos que produzem efeitos relativísticos e quânticos, podendo até dar origem à criação de pares de partículas e antipartículas. A fusão é o processo em que os núcleos atômicos de elementos leves se combinam para formar núcleos mais pesados, libertando grandes quantidades de energia. Este é o mecanismo que alimenta as estrelas no seu núcleo e os cientistas tentam recriá-lo de maneira controlada em laboratório para no futuro ser possível produzir energia limpa e abundante.

Introdução

Porquê a fusão?

A fusão tem o potencial de fornecer uma fonte de energia quase inesgotável, gerando eletricidade sem as emissões nocivas associadas aos combustíveis fósseis. Ao contrário das centrais de fissão atuais, a fusão gera muito menos resíduos radioativos, o que a torna uma alternativa ambientalmente mais favorável. Os combustíveis primários da fusão, como os isótopos do hidrogénio — deutério e trítio — são abundantes. O deutério pode ser obtido da água do mar, enquanto o trítio pode ser gerado a partir do lítio, tornando a fusão uma opção energética sustentável a longo prazo, capaz de suprir as crescentes necessidades energéticas.

Além da energia limpa e do combustível abundante, os dispositivos de fusão são intrinsecamente seguros e eficientes. Num contexto de alterações climáticas, a fusão nuclear oferece um caminho viável para reduzir as emissões de carbono e substituir os combustíveis fósseis, alinhando-se com os objetivos de um futuro sustentável e com baixa intensidade carbónica. A maior iniciativa europeia da fusão é o projeto EUROfusion [1].

Para que mais servem os plasmas?

Para além da fusão, a investigação fundamental em plasma é essencial porque os plasmas — o quarto estado da matéria — estão no centro de muitas tecnologias que nos beneficiam diariamente. Por exemplo, a compreensão dos plasmas permite desenvolver fontes avançadas de partículas e radiação usadas

em imagiologia médica e tratamentos oncológicos, melhorando diagnósticos e terapias. A investigação em plasma é também crucial para conceber aceleradores de partículas compactos e aperfeiçoar técnicas de imagem, vitais para a descoberta científica, segurança nacional e exploração espacial.

Sabia que mais de 99.% do universo visível existe em forma de plasma? Isso faz da compreensão dos plasmas não só uma curiosidade científica, mas também uma chave para desbloquear novos saltos tecnológicos no futuro.

Fusão e fissão

Fusão no Sol

A 15 milhões graus Celsius, o núcleo do Sol transforma o hidrogénio em plasma, onde os eletrões são arrancados dos átomos, deixando um mar de iões carregados. Sob a imensa gravidade solar, os núcleos de hidrogénio, extremamente quentes e rápidos, colidem com força suficiente para vencer a repulsão elétrica e fundirem-se formando hélio. Este processo ocorre em três etapas: dois prótons fundem-se, com um deles convertendo-se em neutrão e formando deutério; o deutério funde-se com outro próton para produzir hélio-3; finalmente, dois núcleos de hélio-3 colidem, formando hélio-4 e libertando dois prótons (Fig. 1). A energia libertada ao converter quatro prótons num núcleo de hélio é imensa — cerca de 10 milhões de vezes superior à energia de reações químicas como a combustão do hidrogénio com o oxigénio. No seu núcleo, o Sol funde 620 milhões toneladas métricas de hidrogénio por segundo, cuja energia alimenta a sua luminosidade e, em última instância, a vida na Terra.

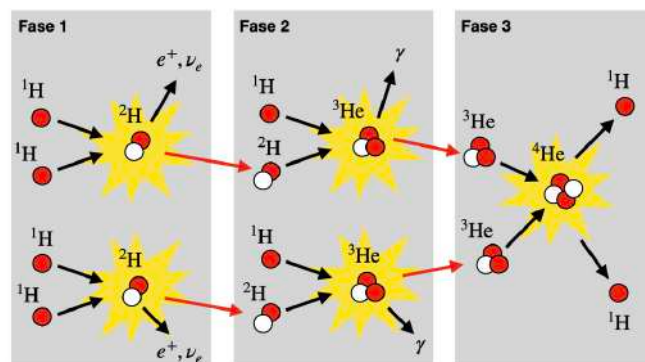


Figura 1 - Processo em que núcleos de hidrogénio fundem-se para formar hélio. Fusão no Sol (© M. Vranic, GoLP)

Qual é a diferença entre a fusão e a fissão?

A fissão e a fusão libertam grandes quantidades de energia, mas operam por mecanismos distintos. A fusão junta átomos e fissão separa-os.

Fissão: partir átomos pesados

A fissão é usada nas centrais nucleares atuais. Um átomo pesado como o urânio absorve um neutrão e torna-se instável, fragmentando-se em átomos mais leves — por exemplo iodo, cério, estrôncio, xénon e bário — e libertando energia e neutrões adicionais. Esses neutrões podem induzir mais fissões, criando uma reação em cadeia auto-sustentada que produz energia estável numa central; sem controlo, essa reação pode ser catastrófica. Os reatores modernos empregam sistemas de controlo e procedimentos de segurança, e existem regulamentos rigorosos sobre a sua segurança e proliferação.

Fusão: juntar átomos leves

A fusão combina núcleos leves para formar núcleos mais pesados. Na reação mais estudada para produção de energia, dois isótopos do hidrogénio — deutério e trítio — fundem-se para formar um núcleo de hélio e libertar energia. A fusão é fundamentalmente diferente da fissão: não existe uma reação em cadeia. A fusão exige condições muito específicas e extremas (altas temperaturas, equilíbrio preciso do combustível, baixa contaminação e campos magnéticos cuidadosamente configurados em dispositivos como tokamaks), pelo que a reação é naturalmente limitada — caso as condições saiam do intervalo necessário, a fusão enfraquece ou cessa. Essa sensibilidade inerente explica porque é que a fusão é considerada intrinsecamente segura. Alcançar e manter essas condições é o principal desafio científico e de engenharia atualmente; por isso a fusão ainda está em desenvolvimento enquanto que a fissão já fornece eletricidade hoje.

A escolha entre fusão ou fissão para um elemento químico depende se tem o núcleo “fortemente ligado”. Os nucleões são ligados pela força nuclear forte — “forte ligação” significa que a força nuclear é usada de forma eficiente, tornando os núcleos estáveis e difíceis de separar. Os núcleos mais fortemente ligados situam-se perto do ferro (26 protões). Assim, pode libertar-se energia ao partir núcleos muito grandes (como o urânio, com 92 protões) ou ao fundir núcleos muito leves (como o hidrogénio, que só tem 1 protão). Ambos os processos convertem energia nuclear em calor para gerar vapor e mover turbinas, mas apresentam riscos e desafios técnicos distintos.

Fusão, plasmas extremos e interação quântica

A visão clássica da fusão

Imagine uma mesa de bilhar cheia, onde bolas colidem ocasionalmente e se juntam uma com outra. Substitua essas bolas neutras por minúsculas esferas positivas que se repelem. Nos materiais usuais, os núcleos dos átomos permanecem rodeados por nuvens de eletrões que impedem o contacto; para fundir, dois núcleos precisam aproximar-se o suficiente para que a força nuclear forte os una, superando a repulsão elétrica. Aquecer um gás até plasma dá às partículas energia suficiente para que as colisões venham a vencer essa repulsão — quanto mais quente o plasma, mais rápidas e frequentes as colisões e maior

a probabilidade de fusão. A fusão em condições de laboratório usa a reação entre deutério (2H) e trítio (3H) para libertar energia (Fig. 2).

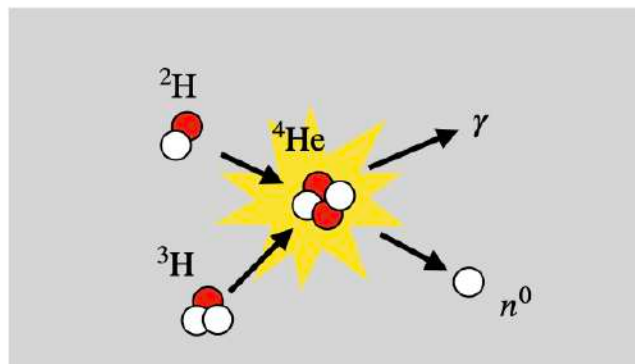


Figura 2 - Reação de fusão entre deutério (2H) e trítio (3H) para gerar energia. Fusão na Terra (© M. Vranic, GoLP)

Mecânica quântica na fusão: efeito túnel e a janela de Gamow

Mesmo quando os núcleos não têm energia cinética suficiente para ultrapassar a barreira elétrica, a mecânica quântica oferece um atalho chamado o efeito túnel. Em vez de precisar da energia clássica completa, um núcleo tem uma probabilidade de “atravessar a barreira”, permitindo a fusão em energias inferiores às clássicas. Essa probabilidade decresce rapidamente com a energia, por isso a fusão num plasma quente é dominada por uma faixa estreita de energias — a janela de Gamow [2] — onde existe um compromisso entre a frequência de partículas e a probabilidade de tunelamento. Efeitos quânticos aparecem também em diagnósticos e tecnologia quântica, por exemplo na ótica quântica usada em diagnósticos de plasma e em processos quânticos nas superfícies em contacto com plasma que afetam a perda e aprisionamento de átomos de hidrogénio.

Mecânica Quântica em Plasmas Extremos

Em plasmas extremos, a mecânica quântica altera regras familiares. A densidades elevadas, os eletrões formam uma “nuvem” quântica que “blinda” a carga positiva dos núcleos, suavizando a barreira repulsiva e facilitando a fusão. Quando as funções de onda se sobrepõem, a estatística quântica regula a ocupação de estados, alterando pressão, capacidade calorífica e comportamento de colisões relativamente ao gás clássico. As colisões deixam de ser apenas impactos de bolas de bilhar e passam a ser interações quantizadas mediadas por ondas e fótons: as partículas trocam os quanta discretos da energia e as oscilações coletivas (ondas de plasma) transportam energia e momento a longas distâncias. Em regimes extremos — em densidades ultra-altas, campos ultra-intensos ou temperaturas ultra-relativistas — a eletrodinâmica quântica (QED) mistura-se com estes fenómenos coletivos: campos intensos criam pares matéria-antimatéria (Fig. 3) a partir do vácuo, o arrefecimento radiativo quântico afeta as trajetórias de partículas. O resultado é uma interação complexa onde processos quânticos de partícula isolada e comportamentos coletivos coexistem, sendo essencial compreender estes efeitos para astrofísica de alta energia e para experiências avançadas de fusão.

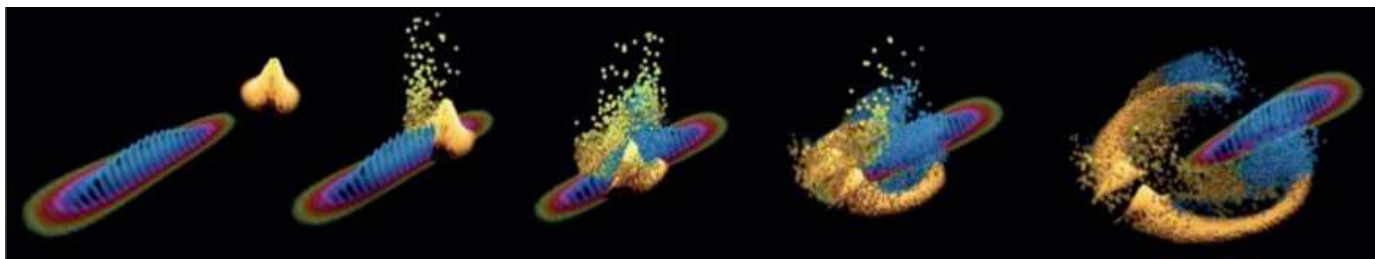


Figura 3 - Criação de antimatéria (mais precisamente, pares electrão-positrão) em interação dum laser ultra-intenso com um feixe de electrões
(© M. Vranic, GoLP)

Simulação quântica de plasmas

No centro dos progressos modernos em física de plasmas está a capacidade de efetuar modelação computacional sofisticada. O plasma é um meio altamente não linear: pequenas variações nas condições iniciais podem produzir resultados muito diferentes, tornando insuficiente a abordagem puramente analítica. Os cientistas recorrem a supercomputadores com muitos processadores paralelos para modelar o movimento de milhares de milhões de partículas e a sua interação com campos eletromagnéticos. Mesmo usando cerca de um milhão de processadores, a simulação frequentemente não é suficiente para atingir a resolução desejada ou escala completa. Assim, cada avanço substancial em computação tem andado de mãos dadas com descobertas em plasma.

A computação quântica promete transformar a computação fundamentalmente. Pode revolucionar a modelação de sistemas grandes ao processar informação de forma exponencialmente mais eficiente do que computadores clássicos, usando propriedades de qubits. O potencial de aumento exponencial de informação armazenável significa que futuras simulações quânticas poderão alcançar precisão inédita, permitindo simular moléculas complexas, materiais, amostras biológicas e processos de plasma com maior fidelidade, o que pode catalisar avanços em medicina, novos materiais e no entendimento fundamental do universo.

Fusão por confinamento magnético (MCF) e Fusão por confinamento inercial (ICF)

Na abordagem MCF, o combustível de fusão é aquecido a temperaturas de milhões graus Celsius para formar um plasma que é depois confinado por campos magnéticos intensos, evitando o contacto com as paredes da máquina. Os sistemas MCF podem operar de forma contínua, o que é vantajoso para produção

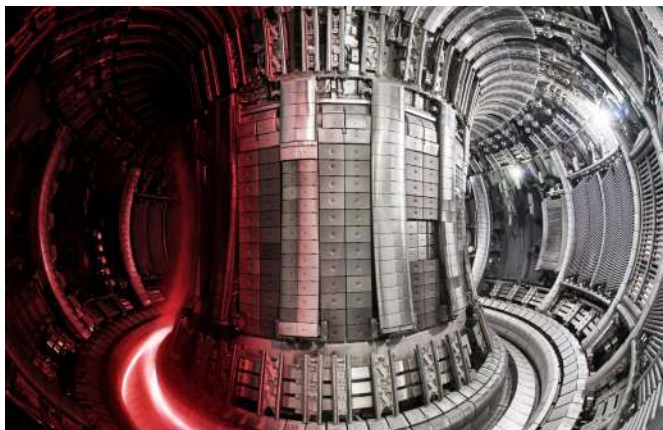


Figura 4 - Dentro de "Joint European Torus tokamak (JET)" em Culham, UK
(© UKAEA, courtesy of EUROfusion)

estável de energia. Um projeto emblemático é o ITER [3], em França, cujo objetivo é demonstrar a viabilidade da fusão em larga escala e com neutralidade carbónica. Um dos grandes desafios da MCF é manter temperatura e tempo de confinamento necessários para a fusão.

A ICF adota uma estratégia distinta, comprimindo um pequeno globo de combustível por pulsos intensos de energia de lasers de alta potência. A camada exterior do globo é rapidamente aquecida e comprimida, levando o núcleo a condições extremas por curtos instantes (nanossegundos). O *National Ignition Facility* (NIF [4]) demonstrou recentemente "um ganho" em ICF (mais energia libertada do que investida em plasma), mas o desafio chave continua a ser atingir e manter as condições de ignição perante o comportamento não linear do plasma.

A nossa investigação

Investigação em fusão magnética no IST

O Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) participa ativamente no Programa Europeu de Fusão desde 1989. Em 2014, as atividades europeias foram coordenadas pelo consórcio EUROfusion, do qual o IPFN/IST é membro. O IPFN contribui com atividades experimentais e teóricas, formação avançada em engenharia e divulgação nas suas áreas de excelência: engenharia e integração de sistemas (diagnósticos por micro-ondas, controlo e aquisição de dados, manutenção remota), teoria e modelação, operação de tokamaks e caracterização de materiais. Em consonância com o roadmap europeu, as atividades do IPFN centram-se na construção e operação do ITER, na exploração científica dos dispositivos JET (Fig. 4 e 5) e ASDEX Upgrade, e no contributo para o desenho conceptual do DEMO. O programa inclui formação em Portugal (principalmente ligada ao tokamak ISTTOK) e no estrangeiro, bem como colaboração com a indústria emergente de fusão (p.ex. Proxima Fusion, Next Step Fusion, GeneralFusion). Mais informação em <https://www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt/research>.

Plasmas extremos, ICF e simulação quântica no IST

No Grupo de Lasers e Plasmas (GoLP) do IPFN colaboramos com equipas mundiais para estudar física de plasmas extremos em contextos astrofísicos e laboratoriais. Desenvolvemos aceleradores e fontes de radiação baseados em plasma para imagens e investigações; estudamos a criação de plasmas de pares matéria-antimatéria em laboratório para investigar a sua dinâmica coletiva; investigamos o comportamento da matéria sob campos eletromagnéticos extremos, os mecanismos de aceleração em choques e a possibilidade de plasmas com propriedades eletromagnéticas exóticas. A nossa investigação fundamental interliga-se com questões centrais da ICF — questões

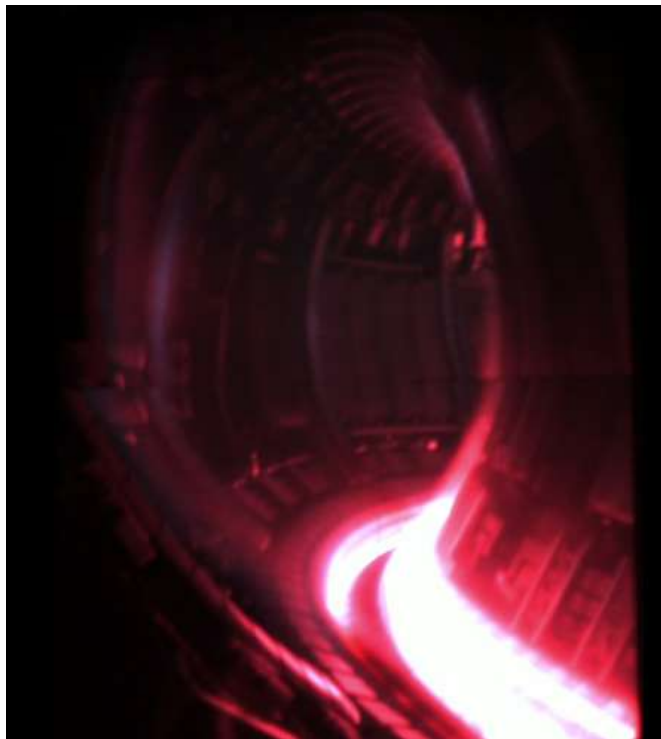


Figura 5 - Recorde de fusão (ref. #99971) usando 2H e 3H no Joint European Torus (JET) em Culham (© UKAEA, courtesy of EUROfusion)

como “Podem métodos avançados de ignição tornar a fusão inercial viável?” ou “Como desenvolver os lasers com potência acima do exawatt?”.

As nossas equipas utilizam os maiores supercomputadores (EuroHPC [5]), os lasers mais intensos (Extreme Light Infrastructure [6], Laserlab [7]), aceleradores e fontes de luz (CERN, SLAC, European XFEL). Desenvolvemos métodos de simulação de ponta e trabalhamos em algoritmos quânticos para aplicações futuras. Gerimos quatro laboratórios experimentais, fazendo do GoLP o maior polo de investigação em fotónica em Portugal. Mais informação em <https://web.tecnico.ulisboa.pt/marija.vranic/> e <https://golp.tecnico.ulisboa.pt/>.

Conclusão

Os plasmas são um dos atores principais na procura por energia de fusão, praticamente ilimitada e de baixo carbono; contudo, realizar esse potencial obriga a integrar física coletiva e processos quânticos — desde o efeito túnel e blindagem, até à produção de pares e outros efeitos QED — com avanços em lasers, confinamento magnético e simulações na escala do exa-flop (e, no futuro, quânticas). Persistem desafios fundamentais de física e engenharia — controlo da turbulência e instabilidades, optimização do confinamento e do abastecimento de combustível, e materiais capazes de resistir a campos e fluxos intensos — pelo que a fusão permanece uma fronteira onde a microfísica quântica, o comportamento coletivo e a engenharia de sistema devem convergir para tornar possível uma fonte de energia segura e escalável.

Referências

- [1] Eurofusion: <https://euro-fusion.org/>
- [2] “Nuclear reactions in stars” (NRS): <https://zuserver2.star.ucl.ac.uk/~idh/PHAS2112/Lectures/Current/Part7.pdf>
- [3] ITER: <https://www.iter.org/>
- [4] Inertial Fusion (LLNL): <https://lasers.llnl.gov/science/achieving-fusion-ignition>
- [5] EuroHPC: <https://www.eurohpc-ju.europa.eu/>
- [6] Extreme Light Infrastructure (ELI): <https://www.eli-laser.eu/>
- [7] Laserlab Europe: <https://laserlab-europe.eu/>



Marija Vranic é Professora Auxiliar no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa. Obteve o mestrado na Universidade de Belgrado (Sérvia) e o doutoramento no IST. Após o doutoramento trabalhou no Extreme Light Infrastructure em Praga (República Checa) antes de regressar para Portugal. A sua investigação centra-se em plasmas em condições extremas, onde efeitos quânticos influenciam a dinâmica coletiva do plasma. A Marija recebeu o prémio internacional John Dawson para a melhor tese de doutoramento, o IBM Scientific Prize, o IUPAP Young Scientists Award e o Ada Lovelace PRACE Award, reconhecimentos pelo seu contributo científico e em computação de alto desempenho. Foi membro eleito do “Seminário de Jovens Cientistas” da Academia das Ciências de Lisboa. A Prof.ª Vranic lidera a equipa Strong Field, Plasmas and Quantum (SFPQ) no Grupo de Lasers e Plasmas (GoLP) do IPFN. A equipa combina teoria analítica e supercomputação para estudar efeitos quânticos na dinâmica de plasmas extremos, relevantes para experiências de ponta com os lasers mais intensos do mundo. Estes trabalhos visam reproduzir condições astrofísicas extremas em laboratório e aprofundar a compreensão desses sistemas em ambientes controlados. A equipa SFPQ explora ainda computação quântica para desenvolver algoritmos específicos para problemas de plasma, preparando-se para aproveitar o pleno potencial de hardware quântico no futuro.



Bruno Miguel Soares Gonçalves licenciou-se em Engenharia Física pelo Instituto Superior Técnico (1997), tem Mestrado em Física (IST/UTL, 2000) e doutoramento em Engenharia Física (IST/UTL, 2003). Em 2005 a sua tese de doutoramento foi distinguida com o European Physical Society Plasma Division PhD Research Award. Em fevereiro de 2012 obteve a Habilitação para o Exercício de Funções de Coordenação Científica em Engenharia Física Tecnológica. É Investigador Coordenador no Instituto Superior Técnico, Presidente do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (desde maio de 2012) e responsável pelo Grupo de Engenharia e Integração de Sistemas do IPFN. Liderou diversos projetos nas áreas de desenvolvimento de diagnósticos para dispositivos de fusão e de sistemas de controlo e aquisição de dados. É coinventor de oito patentes concedidas, coautor de um capítulo de livro, autor de 135 artigos em revistas internacionais e de 62 comunicações em atas de conferências. Participa em vários comités científicos internacionais e é delegado nacional no Conselho de Administração da Eurofusion e na Governing Board da Fusion for Energy. Bruno tem vasta experiência em comunicação científica junto de públicos alargados, em conferências, televisão e rádio. Fala sobre energia, energia nuclear e fusão nuclear, bem como sobre comunicação científica. É autor do livro “Nuclear Fusion in the Age of Climate Change” (disponível gratuitamente online: https://www.ipfn.tecnico.ulisboa.pt/fusao_nuclear_alteracoes_climaticas/download.html).