

PULSAR

REVISTA DO NÚCLEO DE FÍSICA DO IST | 2º SEMESTRE 2014/2015 | EDIÇÃO 35 | DISTRIBUIÇÃO GRATUITA



COMO OBSERVAR A LUZ SEM A VER

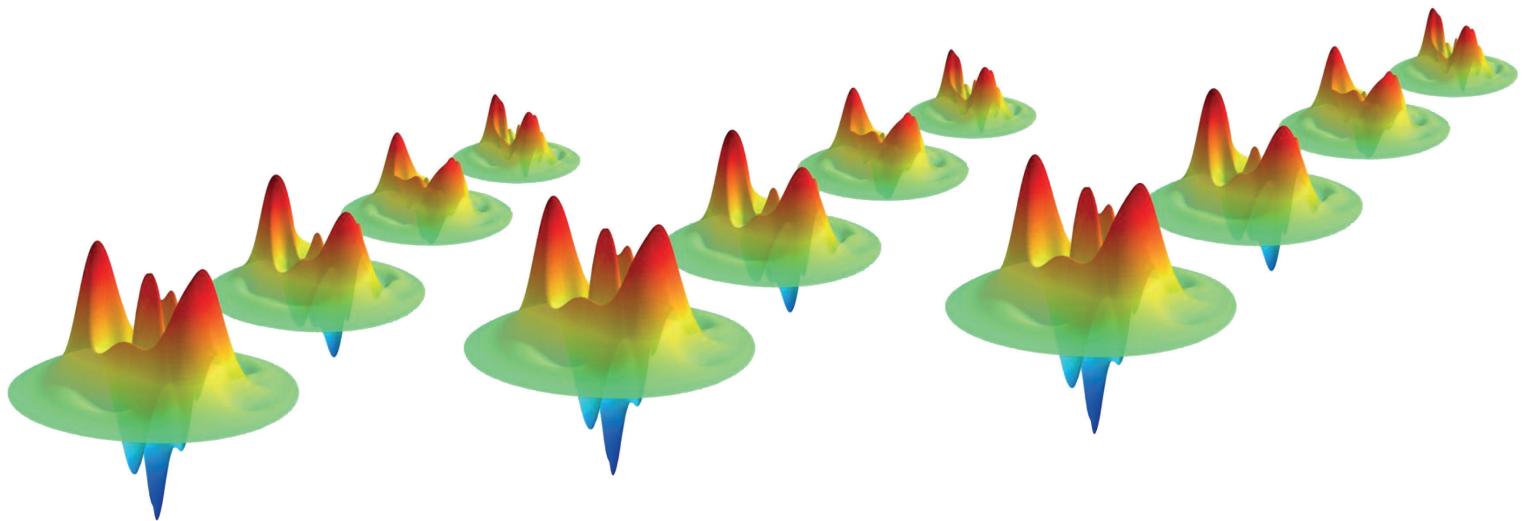
Entrevista com Serge Haroche,
Prémio Nobel da Física 2012

O LADO SOCIAL DA FÍSICA

O spin dos electrões e as greves nas fábricas

ESPECIAL FOTOVOLTAICA

Da nanotecnologia à megaprodução de energia



Destaque acima: [Padrão de] Sucessão temporal de funções de Wigner de um estado quântico detectadas experimentalmente.

Fonte: J.M. Raimond, *Exploring the quantum world with photons trapped in cavities and Rydberg atoms*

Imagen de capa: Serge Haroche, prémio Nobel da Física em 2012.

Fonte: © CNRS Photothèque / LEBEDINSKY Christophe

Apoios



Parceiros



Ficha Técnica

Direcção:

Inês Figueiredo
Rita Costa
André Gonçalves

Redacção:

André Corrado, André Gonçalves, António Coelho, Francisco Nunes, Henrique Rodrigues, Inês Figueiredo, João Braz, João Melo, José Lopes, Nuno Santos, Pedro Mendes, Ricardo Varela, Rita Costa, Rodrigo Campos de Carvalho e Telmo Cunha. *Autores convidados:* Manuel Mendes

Revisão de textos:

Francisco Nunes, Inês Figueiredo

Arte

Design e montagem: Fábio Cruz, Rita Costa

Produção

Impressão: LST, Artes Gráficas

Tiragem: 1500 exemplares

Contacto

Site: <http://pulsar:nfist.pt>

e-mail: pulsar@nfist.pt

Morada: Núcleo de Física do Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, Instituto Superior Técnico, Edifício Ciência - Departamento de Física, 1049-001 Lisboa

Telefone: 218419075

Ext: 3075

Índice

- 4 Breves & Crónica | A Very Big Bang**
- 5 DIYPhysics: A vela progressista**
- 6 Lentes Gravitacionais**
- 8 O lado social da física**
- 10 Entrevista com Serge Haroche**
- 13 O que faz um avião voar?**
- 14 Ver mais e melhor**
- 16 Computação Quântica**
- 18 A física e a tecnologia da lâmpada**
- 19 The Calculus Wars: Leibniz vs. Newton vs. Hooke**
- 20 Especial: Fotovoltaico, nanotecnologia e o futuro da energia**
- 24 A física nas apostas desportivas**
- 26 Plasma e grafeno**

Editorial

É com grande prazer que, no final de um ano lectivo complicado, temos agora oportunidade de produzir uma nova edição da Pulsar que, apesar vir atrasada face ao que é nosso costume, não peca na diversidade e (esperamos!) qualidade do seu conteúdo.

Como já tem sido nosso costume, destacamos mais uma entrevista exclusiva com um Prémio Nobel da Física: desta vez Serge Haroche, que nos deu a conhecer um pouco melhor a sua pesquisa em sistemas quânticos, mas também o seu percurso académico e motivação. No âmbito das comemorações do Ano Internacional da Luz, exploramos a fundo o mecanismo fotovoltaico e a importância da nanotecnologia na obtenção de tecnologia fotovoltaica mais eficiente. Introduzimos, ainda, a crónica *A Very Big Bang* que permitirá contar aos leitores, passo a passo, a história primordial do nosso Universo.

Da Física do dia-a-dia às curiosidades sobre físicos e matemáticos marcantes e à Física de ponta, esta edição conta com uma grande variedade de temas, explorados habilmente pelos nossos cada vez mais numerosos colaboradores. A todos os autores, bem como aos mecenos desta publicação, e ao leitores frequentes deixamos o nosso mais sincero obrigada pelo apoio incondicional, mesmo quando o trabalho académico se adensa.

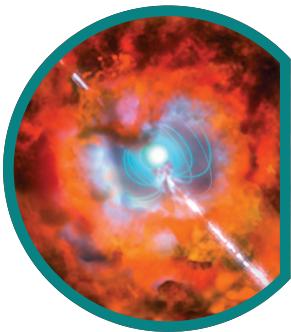
Aos leitores, fica a promessa de nos mantermos empenhados na tarefa de mantermos o seu interesse na Física, com artigos que permitam dar a conhecer novas facetas desta Ciência que nos surpreende continuamente.

Até breve,

Inês Figueiredo
Rita Costa
André Gonçalves

Uma supernova diferente

Observações recentes do Observatório Europeu do Sul no Chile sugeriram (*Nature*, 9 Julho 2015), pela primeira vez, uma ligação entre um sinal intenso e duradouro de raios gamma e uma explosão anormalmente brilhante de uma supernova. Os resultados mostram que a supernova não ocorreu por decaimento radioactivo como é habitual, mas pelo enfraquecimento de campos magnéticos muito intensos criados pelo magnetar, a estrela de neutrões em rotação que existia antes da supernova.



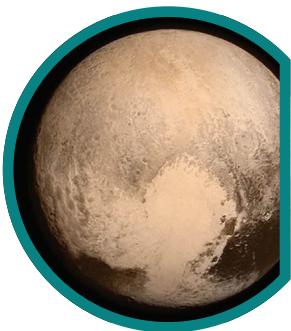
Um jovem Sistema Solar



Primeiro a teoria, agora a prova. Equipas de Astrónomos das Universidades de St. Andrews e Manchester anunciam a observação de um anel de pequenas rochas a orbitar uma estrela muito jovem. É a primeira vez que estes fragmentos ('pebbles') são vistos: modelos teóricos apontam para que haja uma formação de discos de poeiras e gases que circulam as estrelas em formação. Gradualmente estes discos aumentam de tamanho e tornam-se em rochas de maiores dimensões que, eventualmente, podem tornar-se planetas. Apesar de as fases de discos de gás já terem sido observadas, a fase intermédia entre poeiras e planetas nunca tinha sido observada. Até agora.

Plutão, sonda. Sonda, Plutão.

Mais próximo de nós, a luz da ribalta está agora sobre um pequeno planeta já um pouco mais velho... Plutão. Após uma viagem de nove anos, a sonda New Horizons da NASA aproxima-se agora deste planeta. As primeiras imagens recolhidas mostram que este planeta, recentemente demovido do estatuto de planeta principal, ainda vai dar muito que falar, pela topografia irregular da superfície. São finalmente visíveis várias crateras e zonas de cor mais escuras que podem ajudar a clarificar a história deste nosso vizinho distante.



Crónica | A Very Big Bang

por Henrique Rodrigues, aluno do 2º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

Definir o conceito de "universo" é algo bastante simples. O universo é tudo, e tudo o que existe é parte do universo. Todas as formas de matéria, energia, até mesmo conceitos mais esotéricos como o próprio espaço-tempo e as leis que o regem são partes constituintes da maquinaria do universo. Compreendê-lo, contudo, revela-se consideravelmente mais complexo.

Será ele infinito? Quão antigo é? Será que é único, ou apenas um de inúmeros numa vasta rede interligada? Todas estas perguntas são obstáculos com que se depara o físico que tente estudar a existência. Como se tal não bastasse, temos ainda o problema do universo observável – aquele que se encontra dentro da distância percorrida pela luz desde a emissão dos primeiros fotões cerca de 380.000 anos após a ocorrência do Big Bang. Para lá desta fronteira em constante expansão nada podemos saber – apenas o desenrolar do tempo poderá levantar o véu que tolda o nosso entendimento. E mesmo isso pode não nos dar uma resposta definitiva. Mas para entendermos porquê, temos

que recuar um pouco na história da humanidade.

Na segunda década do século XX, o astrónomo Edwin Hubble revolucionou a cosmologia. Até então, o universo era absoluto e imutável. Todavia, Hubble provocou a derrocada deste modelo através de três sucessivas observações. Primeiro, verificou que o universo seria muito superior à Via Láctea através da observação da luz proveniente de cefeides. Depois, verificou que as galáxias que descobrira se estavam a afastar da nossa, uma vez que a luz por elas emitida apresentava um desvio para o vermelho. Por fim, Hubble concluiu que existia uma relação linear entre o afastamento das galáxias e a velocidade de afastamento: se uma galáxia estivesse ao dobro da distância da outra em relação à Terra, afastava-se ao dobro da velocidade. Isto implicava que o universo estava em expansão. Estando em expansão, houve uma origem. A este ponto de infinita temperatura e densidade onde se encontrou aglomerada toda a energia e matéria do universo chamou-se singularidade. À explosão que dele surgiu, como todos sabemos – Big Bang. ■

DIYPhysics

A vela progressista

por Rodrigo Campos de Carvalho, aluno do 2º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

O que vais precisar



Uma vela



Um copo transparente

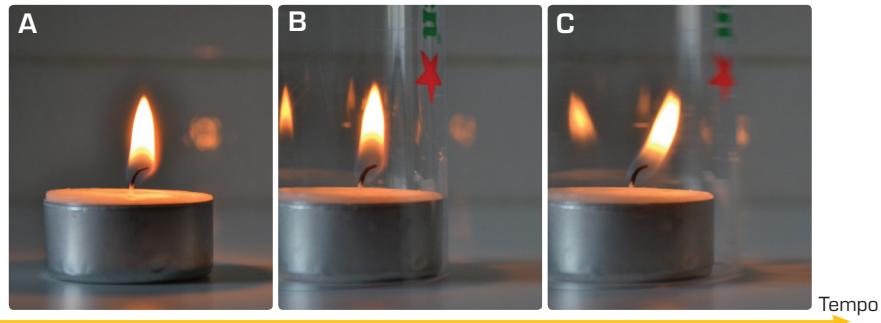
Vais precisar de uma vela e de um copo. O primeiro passo é acender a vela. A seguir, vira o copo ao contrário e tapa a vela com ele. Se por esta altura achas que não vale a pena continuar a ler porque já sabes o que aí vem, estás enganado. Sim, a vela apaga-se passado algum tempo. Sim, o oxigénio é consumido. Mas não, felizmente a experiência não é essa. Isso, quanto muito, é aquilo que proporciona o desafio: de facto, tudo acontece antes da vela se apagar. Ora, toda a gente sabe que cientista prevenido vale por dois, por isso, em vez de te armares em Speedy Gonzalez, proponho que voltes ao primeiro passo e escolhas um copo mais alto. Assim a vela aguenta-se acesa durante mais tempo e o fundo do copo sofre menos com o calor da chama. Até porque esta chama deve ser o maior possível, para veres melhor o que vai acontecer.

Estás agora pronto para o terceiro passo: empurrar o conjunto, acelerando-o. Se não vires nada de estranho, ou seja, se não vires nada interessante, tenta outra vez e lembra-te de que a velocidade tem de estar a aumentar. Se ainda assim não estiveres surpreendido, não desanimes.

Trajectória da chama da vela

(A, B) Com ou sem o copo a cobri-la, a chama mantém-se vertical.

(C) Quando o copo acelera para a direita, o ar mais denso é projectado para trás, e a chama avança no sentido do movimento.



Antes, imagina que és a vela, que estás dentro do metro, e que o metro acelera repentinamente. Como seria de esperar, estás neste momento a pedir desculpa a duas ou três velhotas que estavam confortavelmente sentadas até teres sido projetado para trás, mas o lado positivo é que podemos agora concordar que foste de facto projetado para trás. Repete agora a experiência, e olha bem para a chama, já que ela, pelo contrário, inclina-se educadamente para a frente!

Depois de experimentares novamente e sentires como a surpresa te perpassa o espírito, estás pronto para clarificar as tuas dúvidas. Pensem na situação embaraçosa no metro. Antes do metro arrancar, não estás sozinho. À tua volta, para além de uma multidão de pessoas, há ar por todo o lado. Então porque é que são as pessoas se esborracham umas contra as outras e não as moléculas de ar? A resposta está na densidade. Como somos mais densos que o ar, é mais difícil alterar o nosso estado anterior de repouso para um novo estado de movimento. Da segunda lei de Newton, sabemos que para uma mesma força aplicada, quanto maior for a massa do corpo (ou densidade, conside-

rando volumes semelhantes), menor será a sua aceleração. Por outras palavras, quanto mais maciço for o corpo, mais difícil é pô-lo a mexer-se. Por isso ficamos para trás, enquanto o ar acelera logo e ocupa o espaço livre à frente.

Voltando à experiência, podemos considerar que o copo virado ao contrário encerra uma certa quantidade de ar que não está todo à mesma temperatura. Se junto dos bordos o ar está mais frio, perto da chama o mesmo não acontece. Aliás, a chama não é mais que ar quente, tão quente que liberta energia sob a forma de radiação! Ao contrário do que a visão nos tenta transmitir, o fogo não é "uma coisa", mas apenas ar muito quente. Ora, como sabemos por experiência própria, quando vemos o fumo da lareira a subir pela chaminé, o ar quente é menos denso que o ar frio. Logo, ao acelerar o conjunto copo-vela, o ar mais denso – o frio (as pessoas no metro) – é projetado para trás, enquanto o ar menos denso – o ar quente da chama (o ar da carruagem) – se move para a frente.

Se quiseres ficar mais convencido, ou aumentar uma ordem de grandeza a escala desta experiência, proponho

outra semelhante. Num carro com um porta-bagagens grande, prende um balão cheio de hélio e acelera. O sábio cientista que percebeu o último parágrafo já consegue prever que o balão de hélio não vai mexer-se para trás, mas para a frente! O hélio é menos denso que o ar – é por isso que os balões de hélio sobem. Logo, quando o carro acelera, é o ar (e os passageiros!) que é projetado para trás, enquanto o balão de hélio ocupa a parte dianteira.

Resumindo toda a informação, o ar frio, que é menos denso que o ar quente da chama, é projetado para trás, obrigando a chama a inclinar-se para a frente. Obviamente, se o copo estiver a desacelerar, o ar frio ocupa a posição frontal e a chama inclina-se para trás. Ainda mais interessante será se o conjunto descrever uma trajetória circular: aí, o ar quente é o alvo mais frágil da força centrípeta, e a chama não vai inclinar-se para fora, como nós quando fazemos curvas com o carro, mas sim para dentro.

Não querendo ser filosófico, repara como a chama de uma simples vela nos pode trazer tanta luz científica. E podes ter a certeza que, de onde veio esta luz, vem muito mais. ■

Lentes Gravitacionais

por Nuno Santos, aluno do 2º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

Em 1905, Albert Einstein (1879-1955), apresentando a teoria da relatividade restrita em *On the Electrodynamics of Moving Bodies*, resolveu as assimetrias consequentes da aplicação da teoria electromagnética de Maxwell (1831-1879) a corpos em movimento. Tal como as leis da mecânica newtoniana, as quatro equações de Maxwell – que sumariam o electromagnetismo – são independentes do sistema de referência. Porém, as designadas transformações de Galileu – que estabelecem as relações clássicas entre posições em dois referenciais com velocidade relativa constante –, para as quais a mecânica clássica é invariante, não deixam invariantes as equações unificadoras da electricidade e do magnetismo. Pelo contrário, verifica-se que estas são invariantes para as transformações de Lorentz, que, para dois referenciais de inércia de eixos paralelos, em que um se move relativamente ao outro apenas segundo x com velocidade v , são:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$
$$y' = y,$$
$$z' = z,$$
$$t' = \frac{t - \frac{xv^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo, que o físico alemão supôs ser constante. Adoptando estas transformações, Einstein generalizou a mecânica de Newton (recuperada sempre que seja razoável considerar $v \ll c$) e compreendeu que, à semelhança do espaço, também o tempo é relativo. Aliás, a teoria da relatividade restrita trata espaço e tempo como elementos de uma mesma entidade: o espaço-tempo. Com efeito, o espaço-tempo é um sistema de coordenadas em que tempo e espaço são indissociáveis, sendo um ponto no espaço-tempo um evento.

Garantida a invariância das leis da física para referenciais inerciais, restava generalizá-la para referenciais acelerados, feito alcançado pelo próprio Einstein em 1915. Essa generalização, que integra a teoria da relatividade geral, apoia-se no Princípio da Equivalência – que estabelece a igualdade entre a massa gravitacional e a massa inercial de um corpo, devida à equivalência entre os efeitos de um campo gravitacional e os de um referencial acelerado –, afirma que, à semelhança do que ocorre num referencial acelerado, a luz também é curvada num campo gravita-

cional, como consequência da interacção da matéria com o espaço-tempo, que, por isso, é curvo e mutável¹. Ou seja, a massa (densidade de energia) deforma (curva) o espaço-tempo², sendo os efeitos dessa deformação tanto mais visíveis (à escala humana) quanto mais massivos forem os corpos, caso em que a luz é defletida significativamente na sua vizinhança. A explicação relativista deste fenómeno, i.e., da deflexão da luz, foi confirmada experimentalmente e pela primeira vez por Sir Arthur Eddington (1882-1944) em 1919, numa expedição a Sobral, Brasil, e à Ilha do Príncipe.

O advento da Relatividade Geral fundou, dada a sua complexidade, um conjunto de subáreas da Física que tenta deslindar as implicações da teoria de Einstein. Em particular, a deflexão da luz e os fenómenos a ela directamente associados, como o *lensing* gravitacional, têm sido um dos tópicos mais estudados e investigados nos últimos anos em Astrofísica.

O *lensing* gravitacional não é mais do que a ocorrência de deflexão da luz num sistema onde existe uma fonte de luz – um quasar (*quasi-stellar radio source*), uma galáxia ou um enxame de galáxias, por exemplo –, uma ou mais lentes – corpos suficientemente massivos para deflectirem a luz – e um observador [Fig. 1]. O que o observador vê – por outras palavras, a quantidade de luz que atinge a posição quadri-dimensional que o observador ocupa no espaço-

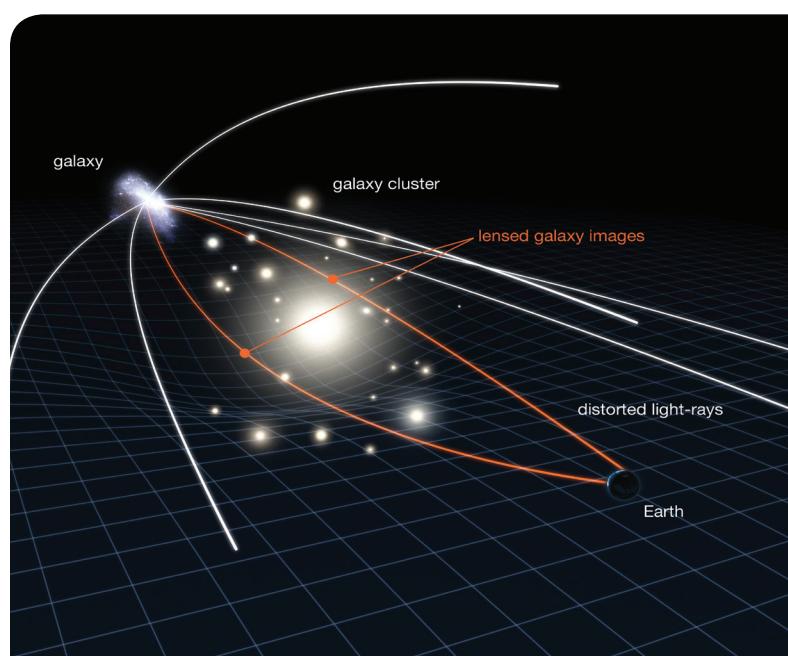


Figura 1: Sistema de lensing. O enxame de galáxias curva o espaço-tempo de tal forma que um observador na Terra recebe uma imagem de uma galáxia ante a lente (créditos: NASA/ESA).

¹ A teoria da relatividade restrita é um caso particular da teoria da relatividade geral em que o espaço-tempo é plano.

² Deforma o espaço e o tempo, que pode também contrair-se ou dilatar-se.

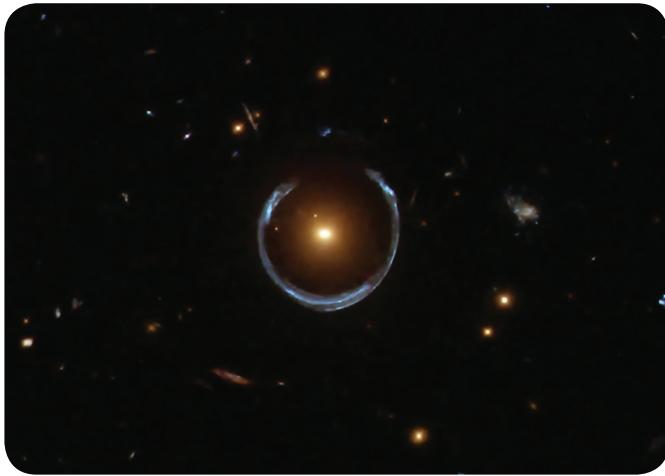


Figura 2: Anel de Einstein (créditos: NASA).

-tempo – é função da disposição relativa dos elementos do sistema e da massa e forma das lentes. São estas variáveis que distinguem diferentes regimes de *lensing* gravitacional. Não obstante a classificação, em qualquer regime, parte da luz emitida pela fonte é curvada de tal modo que atinge a posição do observador, o que, na ausência de lentes, não ocorreria.

Quando as lentes gravitacionais são extremamente massivas e se encontram próximas da fonte, o espaço-tempo sofre grande deformação, pelo que mais caminhos até ao observador podem ser percorridos pela luz. Assim, o observador vê múltiplas imagens da fonte. A este regime chama-se *strong lensing*. Um caso particular ocorre quando fonte, lente(s) e observador estão alinhados: a deflexão da luz ocorre de tal forma que a imagem observada consiste num anel de luz, conhecido por anel de Einstein [Fig. 2].

O estudo de sistemas em regime de *strong lensing* possibilita, por exemplo, modelar a distribuição de massa das lentes (e.g., enxames de galáxias) [Fig. 3]. Além disso, a análise de sistemas cujas grandezas que caracterizam a fonte variam com o tempo, provocando atrasos temporais diversos na manifestação dessas variações na imagem observada, permite a determinação da constante de Hubble.

No entanto, nem sempre os deflectores (lentes) apresentam densidades de energia suficientemente elevadas para provocar a multiplicação (sem sobreposição) de imagens da fonte. Quando tal se verifica, dois regimes podem ocorrer: *weak lensing* ou *microlensing*.

Embora, segundo Peter Schneider e Matthias Bartelmann³, não exista uma definição precisa de *weak lensing*, um aspecto comum às investigações envolvendo este regime é a natureza estatística da medição dos seus efeitos. Por outras palavras, como das características intrínsecas das fontes há apenas e comumente valores aproximados, a informação que delas se pode extrair sobre as lentes intervenientes – e.g., a sua massa – é, pois, estatística por natureza.

O *weak lensing* é particularmente útil na aferição (estatística) da distribuição de matéria (“normal” e negra) e radiação no Universo (*large scale structure*), o que se traduz, por exemplo, na determinação da probabilidade de encontrar galáxias numa dada região do Cosmos, considerando que existem outras a uma dada distância.

Por sua vez, em sistemas de *microlensing*, a radiação deflectida e que converge para o observador produz múltiplas imagens que se sobrepõem – as quais são, na prática, indistinguíveis –, pelo que a luminosidade da fonte parece ser maior, o que pode ser tão útil quanto inconveniente. Por um lado, permite estudar fontes que, na ausência de *lensing*, quase não seriam visíveis. Por outro, quando, por exemplo, se pretende investigar objectos do firmamento com luminosidade superior a um dado valor, este fenómeno constitui um problema, visto poder levar a considerar fontes cuja luminosidade real não é superior ao valor de referência.

Desde a publicação, por Sir Eddington, dos resultados da sua expedição em 1919, muitos outros trabalhos têm-se centrado no fenómeno de deflexão da luz, com vista a aplicar a Relatividade Geral ou a confirmar as suas previsões. Actualmente, há, por exemplo, esforços no sentido de estudar a matéria escura recorrendo a sistemas de *microlensing*. A deflexão da luz, tratando-se apenas de um fenómeno físico, pode, contudo, ser vista hoje como um instrumento que, criando ilusões ópticas, nos oferece a possibilidade de conhecer melhor o Universo. ■

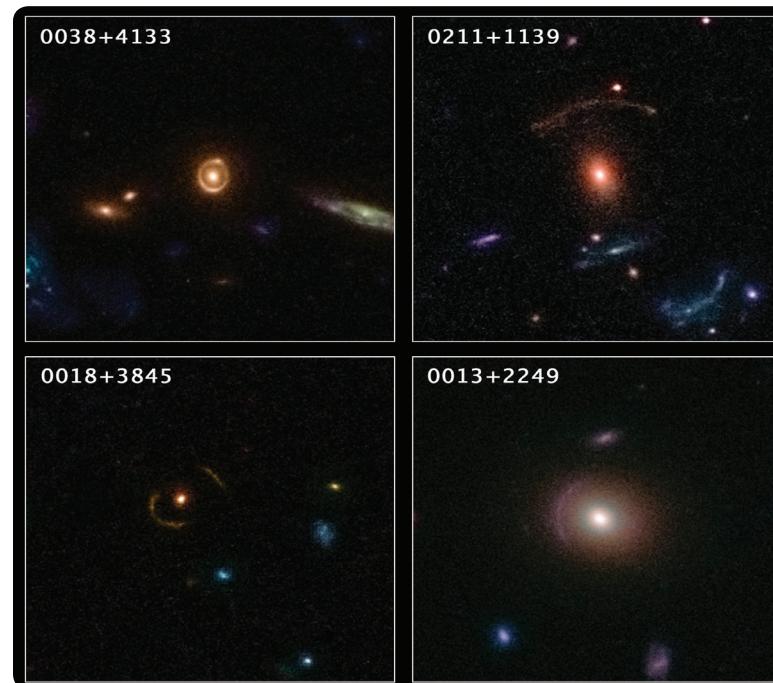


Figura 3: Algumas lentes gravitacionais registadas pelo telescopio espacial Hubble. Se este conjunto for representativo, estima-se existirem no céu cerca de meio milhão de sistemas semelhantes a um dos exemplos (créditos: NASA/ESA Hubble Telescope).

¹ cf. BARTELmann, M.; SCHNEIDER, P.; *Weak Gravitational Lensing; Physics Reports* 340; 2001; 291-472

O lado social da física

por José Vargas Lopes*, aluno do 5º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

Apesar de não ser evidente no primeiro contacto com o Mundo da Física, uma breve passagem pelas suas diversas áreas leva-nos a compreender o seu carácter multidisciplinar e o quanto estas podem contribuir para diferentes áreas do nosso conhecimento. Na verdade, este facto não deve ser surpresa, visto que nos dias de hoje qualquer experiência de fronteira em Física requer um empreendimento de vários colaboradores de diferentes áreas dedicados a trabalhar para quebrar as barreiras do conhecimento humano. O Leitor poderá saber, por exemplo, que a *World Wide Web*, o sistema que usamos hoje para visitar *websites* como o *Youtube*, foi criado no CERN em 1989 por Tim Berners-Lee de forma a dar resposta à necessidade de um compartilhamento de documentos e ficheiros de dados eficaz entre os inúmeros cientistas da organização.

Mas não foi só através de avanços tecnológicos que a Física contribuiu para o desenvolvimento de outras áreas de investigação. O avanço teórico em áreas como a Física estatística levou à criação de "ferramentas teóricas" que foram prontamente adaptadas para ser usadas em disciplinas sem qualquer aparente relação com a Física, como por exemplo, o estudo de fenómenos políticos, económicos, psicológicos, etc. E foi desta forma que, na década de 1970, "nasceu" a Sociofísica, disciplina que utiliza modelos teóricos físicos, principalmente adaptados da Física estatística, para descrever fenómenos sociológicos, como por exemplo, tendências políticas, a tomada de decisões ou mesmo o processo de formação de opinião (ver caixa). Hoje em dia, e apesar da feroz contestação por parte da comunidade física, a Sociofísica apresenta-se como uma área de investigação activa com vários artigos publicados todos os anos por parte de Físicos que dedicam todo o seu trabalho a esta área.

No entanto, é natural levantarmos a seguinte questão: Será de facto exequível usar modelos de certa forma deterministas em sistemas tão complexos e aleatórios como grupos de indivíduos? Surpreendentemente a resposta a esta pergunta é sim, e é fácil perceber porquê: tal como a Física estatística descreve grupos de milhões de partículas que isoladamente possuem comportamentos irregulares, a Sociofísica consegue também descrever comportamentos de sociedades compostas por um grande número de indivíduos. Para além disto, devido à facilidade que hoje temos no acesso a enormes bases de dados (por exemplo, no Facebook ou no Google), a Sociofísica apresenta-se como uma disciplina passível de ser testada e confirmada usando "dados observacionais".

O Spin dos electrões e as Greves nas Fábricas

Serge Galam, considerado por muitos o pai da sociofísica, começou a defender a utilização de modelos de Física Estatística no estudo de fenómenos sociológicos enquanto terminava o seu doutoramento, nos anos que ele próprio intitulou de "idade de ouro da Física da Matéria Condensada".

De entre muitos dos seus trabalhos com variados colaboradores, talvez o que mais prendeu a atenção da comunidade Física, consistiu na reinterpretacão do *modelo de Ising*, que descreve o estado magnético de um material, para a sua utilização no estudo do estado de um grupo de trabalhadores numa fábrica. Galam usou a comparação entre um electrão de um material e um agente de uma fábrica, e tal como o electrão pode ter dois valores de spin, digamos, +1 ou -1, um trabalhador poderá estar no activo ou a fazer greve. Da mesma forma, tal como o spin de um electrão é influenciado pelo spin dos electrões seus vizinhos, um trabalhador estará mais propenso a fazer greve se os seus

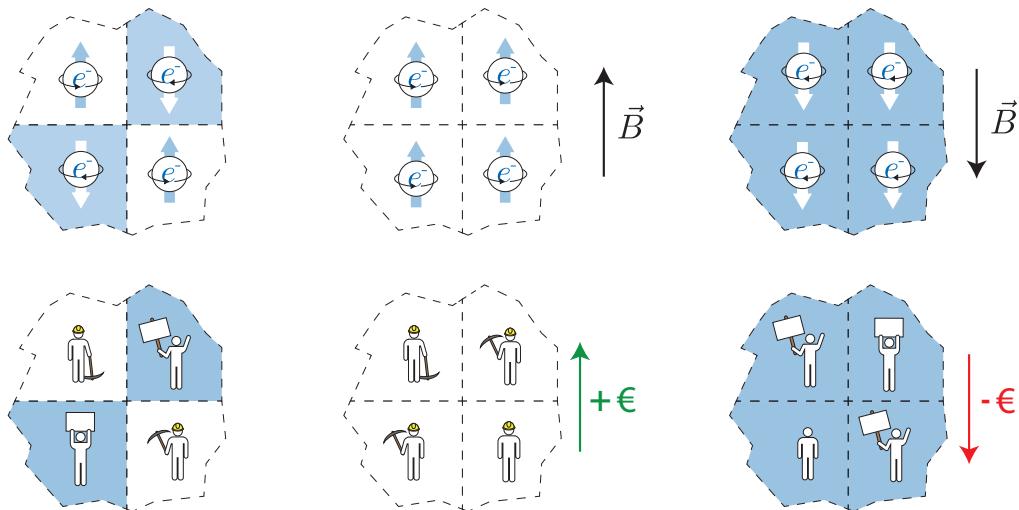


Figura 1: Comparação entre um sistema de electrões sujeito a um campo magnético B (em cima) e um sistema de trabalhadores sujeitos a mudanças nos seus salários (em baixo).

*Resumo de projecto da disciplina de Introdução à Investigação. MEFT/IST

companheiros também o estiverem. Finalmente, se aplicarmos um campo magnético sobre o material, os electrões irão alinhar o seu spin de acordo com a direção do campo, o que, na perspectiva Sociofísica, equivale ao estado de cada trabalhador depender também do salário que este recebe ao fim do mês. Tendo em conta todos estes paralelos entre um conjunto de electrões num material e um grupo de trabalhadores numa fábrica, Galam, em conjunto com os seus colaboradores, conseguiu chegar a conclusões acerca do comportamento dos últimos, que já eram conhecidas no domínio da física de matéria condensada.

A Dinâmica da Formação de Opinião

O processo de formação de opinião por parte de um indivíduo é um dos tópicos mais estudados no meio da Sociofísica. A abordagem usada pela maioria dos autores consiste em utilizar um método Montecarlo para “gerar mensagens”, favoráveis ou desfavoráveis, relativas a um assunto controverso, como por exemplo, a legalização do aborto. Para isto é necessário mapear o espaço de opiniões de um indivíduo para um espaço que seja mensurável, como por exemplo, o plano XY (ver figura 2). Neste caso simples, mensagens (pontos) que se localizem na metade esquerda do plano são contra a legalização do aborto, enquanto a outra metade representa opiniões a favor. O método Montecarlo é então usado para aleatoriamente criar mensagens no plano XY, que poderão ser, ou não, aceites pelo indivíduo em estudo. O critério de aceitação de cada mensagem baseia-se num simples postulado: se o indivíduo perceber o conteúdo da mensagem, ele irá aceitá-la; por outro lado, se a mensagem estiver fora do seu alcance, esta será ignorada. “Matematicamente” falando, este postulado traduz-se num parâmetro, chamemos-lhe k , que

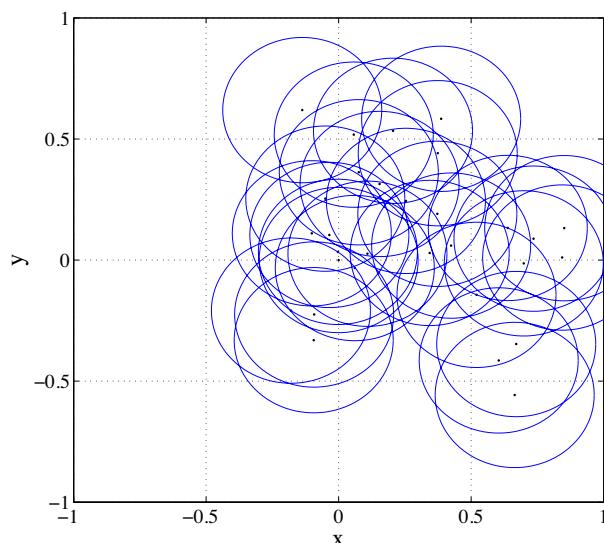


Figura 2: Espaço de opiniões de um indivíduo após ter aceite 50 mensagens. As mensagens são representadas por pontos pretos, enquanto que o raio dos círculos azuis (centrados em cada ponto preto) representam a magnitude de k .

O exemplo explicado acima representa um dos muitos trabalhos realizados por Galam até à data, nos quais se incluem a previsão correta dos resultados nas eleições presidenciais Francesas de 2000, e na vitória do “não” ao referendo da ratificação da Constituição Europeia em 2005. Nos dias de hoje, a Sociofísica é uma área de investigação que apesar de estar ainda numa fase “adolescente” já mostrou grande parte do seu potencial, e poderá vir a mudar a forma convencional usada em Sociologia no estudo de fenómenos sociológicos, tudo isto num futuro próximo! ■

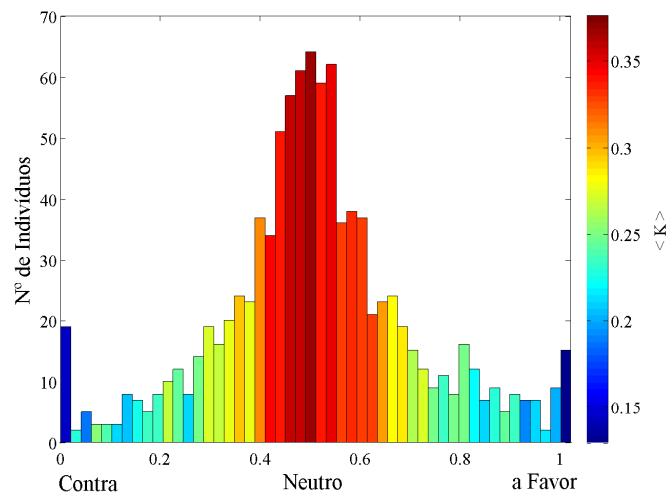


Figura 3: Histograma com a distribuição do nº de individuos em função da sua opinião. Como podemos ver pela legenda de cores, individuos com maior k adquiriram uma opinião neutra em relação ao assunto.

representa a capacidade do indivíduo em compreender as mensagens de que é alvo. Sendo assim, se a mensagem gerada estiver a uma distância menor do que k em relação a qualquer outra mensagem aceite previamente, então o indivíduo irá aceitá-la.

Ao fim de um certo número de iterações deste processo, o indivíduo em estudo terá aceite várias mensagens distribuídas pelo plano XY. A sua opinião é então dada pela distribuição de mensagens aceites, sendo que um indivíduo que apenas tenha aceite mensagens de um dos lados do plano terá uma opinião extrema, enquanto que a aceitação do mesmo número de mensagens em ambos os lados do plano levará a uma opinião neutra.

Malarz e Kulakowski, dois sociofísicos polacos, usaram este método para chegar ao surpreendente resultado de que indivíduos com um maior valor de k , são mais dados a criar opiniões neutras, enquanto indivíduos com k menor tendem a tornar-se extremos em relação ao assunto em questão (ver figura 3). Este resultado torna-se ainda mais insólito se interpretarmos o parâmetro k como a inteligência do indivíduo em estudo, o que quererá dizer que se o Leitor não sabe se gostou ou não gostou deste artigo, será um bom sinal!

Como observar a luz sem a ver

por João Braz, aluno do 5º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

Nos dias 8 e 9 de Abril, o Instituto Superior Técnico recebeu o Professor Serge Haroche, laureado com o Prémio Nobel da Física de 2012. Numa conversa rápida mas enriquecedora, o Professor Haroche deu a conhecer à PULSAR o percurso que o levou a travar conhecimento com a sua área de investigação, passando pela experiência e cultura assimiladas durante a sua formação como cientista, até receber um dos mais elevados graus de reconhecimento científico.

Das órbitas celestes às orbitais atómicas

"Gostava muito de matemática quando era aluno de li-ceu", recebe-nos o professor ao trilho pelo seu percurso, explicando o que o atraiu para o estudo da Física. "Foi na altura em que os primeiros satélites foram lançados, em plena corrida ao espaço do final dos anos 50 e início dos anos 60, e eu estava muito interessado em usar as leis da mecânica para calcular as velocidades de planetas, satélites e tudo mais. A partir daí, apercebi-me de que tinha um grande fascínio pelo facto de a Natureza obedecer a leis matemáticas, que é do que a Física se trata."

No entanto, o ramo escolhido por si dentro desta área científica acabou por ser algo diferente, inserindo-se na Física Atómica, ao que explicou que "foi muito por acaso. Comecei os meus estudos [superiores] na École Normale [Supérieur], onde tive como professores Alfred Kastler, Claude Cohen-Tannoudji e Jean Brossel, que nos ensinavam Física Atómica. Foi aí que me apercebi que estava muito interessado pela explicação por trás dos processos [neste domínio da Física]".

Por outro lado, nessa mesma altura deu-se início ao desenvolvimento dos lasers, instrumentos decisivos no estudo da interacção dos átomos com a luz, ao qual a sua investigação se veio a dedicar. Afirma que "na altura, era claro que combinar lasers com átomos conduziria a resultados interessantes, embora não se conseguisse imaginar os feitos impressionantes que se conseguiriam ao longo dos últimos 50 anos", e admite que "foi um pouco de sorte: apenas tive a intuição de que seria o ramo certo a seguir, mas nunca previ o quanto longe chegaria, no futuro".

De facto, um dos professores responsáveis pela sua inspiração para a Física Atómica tornou-se o seu orientador de doutoramento. Trata-se de Claude Cohen-Tannoudji, prémio Nobel da Física de 1997 e autor de vários livros nos domínios da mecânica quântica e da óptica quântica, amplamente reconhecidos na comunidade científica.

"É um físico com uma mente talentosa e com uma capacidade de explicação muito clara." Porém, a sua exigência foi também positivamente marcante, ao que o professor nos contou que "se eu quisesse ser importante para o processo [de investigação], tinha de se pensar muito rápido quando havia um problema que não sabíamos resolver. Nessa altura, eu regressava a casa, à noite, e dizia se eu não encontrasse uma solução, amanhã ele já teria encontrado! Por isso era um desafio! (Ri-se.) Quando eu conseguia encontrar algo independentemente dele era, de facto, muito recompensador."



Fonte: © CNRS Photothèque / LEBEDINSKY Christophe

"(...) Apercebi-me de que tinha um grande fascínio pelo facto de a Natureza obedecer a leis matemáticas, que é do que a Física se trata."



Figura 1: Serge Haroche e o seu colaborador Igor Dotsenko examinam a cavidade que tornou possível a experiência que galardoou o Professor com o Prémio Nobel da Física em 2012. Fonte: © CNRS Photothèque / LEBEDINSKY Christophe

Observar fotões sem os ver

O prémio Nobel foi partilhado com o físico norte-americano David Wineland, pelos seus “métodos experimentais revolucionários que permitiram a medição e manipulação de sistemas quânticos individuais”. Mais concretamente, poderíamos dizer que o feito de Haroche e da sua equipa foi conseguir observar fotões, partículas de luz, sem os ver.

Passemos a explicar este aparente oxímoro: sempre que um observador adquire alguma informação acerca de um raio de luz – intensidade, por exemplo – está-se efectivamente a aniquilar os fotões que o compõem. Estes depositam a sua energia na forma de sinais (por efeito fotoelétrico, por exemplo) ao incidir no material do instrumento usado para fazer a medição, seja ele um olho humano ou um simples foto-detector. Para todos os efeitos, ao observar um fotão da forma convencional, um observador vê-o e, consequentemente, destrói-o.

Não será possível, no entanto, observar um fotão sem o ver? Será impossível detectar a existência de fotões sem os aniquilar? Não haverá nenhuma maneira de ter acesso a algo tão fundamental como o estado quântico de um conjunto de fotões?

A teoria quântica nada afirma nesse sentido: é possível fazer uma medição do estado quântico de fotões de tal

modo que se possa repetir essa medição sobre o mesmo estado. Porém, a teoria quântica descreve sistemas a uma escala em que estes são, em geral, altamente sensíveis, tanto que os próprios instrumentos utilizados para os manipular e observar induzem decoerência, além de os sujeitar a flutuações térmicas e a defeitos microscópicos dos materiais, alterando a sua dinâmica e deteriorando o seu comportamento quântico. Devido a estas, e outras, limitações técnicas, só nas últimas décadas tem sido possível testar muitos dos fenómenos e aplicações previstos para sistemas quânticos (apesar da teoria estar estabelecida desde a década de 1920), e a execução desta medição não-destrutiva em fotões não foi excepção.

O aparato que permitiu ao professor Haroche e à sua equipa levar a cabo esta experiência consistiu em aprisionar fotões dentro de uma cavidade espelhada e fazer passar sucessivos átomos pelo seu interior. Para tal, utilizou-se um tipo de átomos, chamados átomos de Rydberg, caracterizados por terem orbitais atómicos de grande escala espacial. Antes de entrar na cavidade, as orbitais são “afinadas” de tal modo que, ao interagir com o campo electromagnético, sofrem um desvio de fase, dependente do número de fotões (intensidade do campo electromagnético), que é medido à saída. Aparentemente simples, este set-up representou um desafio tecnológico enorme.

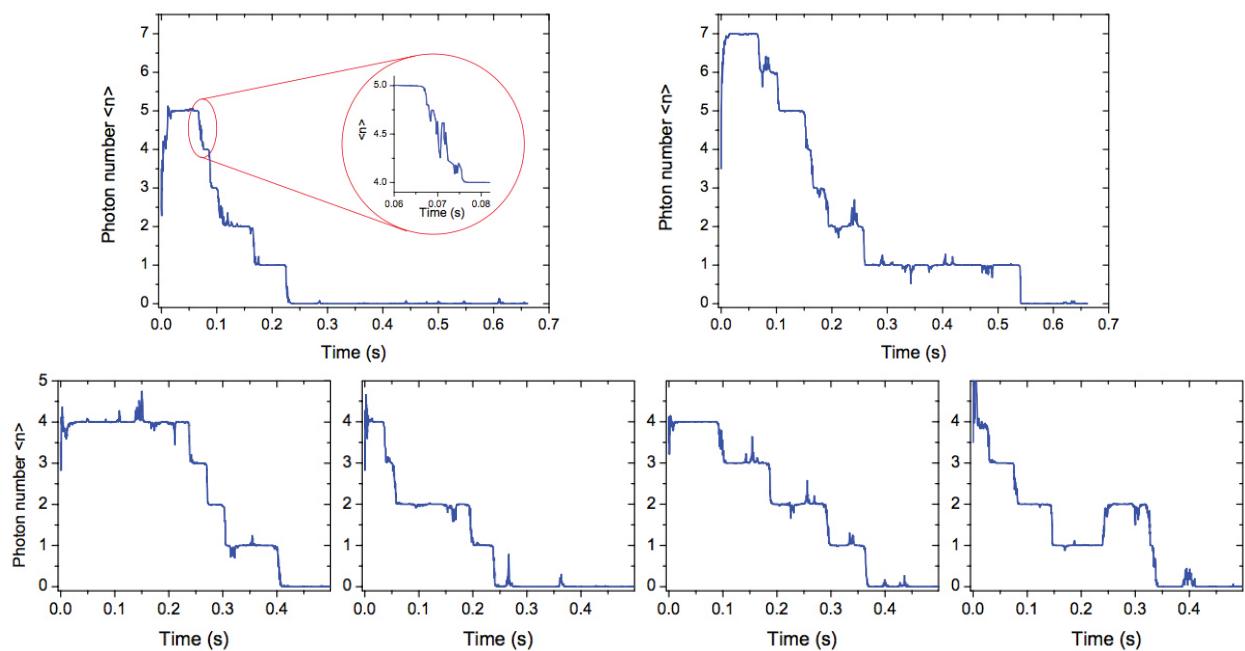


Figura 2: Evolução do número de fotões na cavidade para medições de 5 (cima, direita), 7 (cima, esquerda) e 4 (baixo) fotões no instante inicial. O número de fotões mantém-se em patamares ao longo de números inteiros, sofrendo variações rápidas para entre números inteiros adjacentes - *quantum jumps*. Cada ponto de um gráfico corresponde à medição obtida de um átomo após atravessar a cavidade. Fonte: J.M. Raimond, *Exploring the quantum world with photons trapped in cavities and Rydberg atoms*

Uma caixa para guardar luz

“Tinhamos o sonho de construir uma caixa que conseguisse manter fotões no seu interior com um tempo-de-vida muito longo”, uma vez que seria necessário mantê-los durante um período de tempo superior ao tempo de interacção dos átomos com o campo electromagnético dentro da cavidade, cerca de 20 micro-segundos. A realização desta “caixa” foi o grande obstáculo à execução da revolucionária experiência, tendo sido necessários 20 anos de desenvolvimento e perseverança. “Até a caixa estar concluída nunca tive a certeza se funcionaria. Fizemos muitas, muitas tentativas e muitas falharam. Fizemos vários tipos de manipulações, e eu apercebi-me de que estas manipulações eram interessantes mas não eram realmente revolucionárias, porque era necessária uma cavidade muito boa”, contou-nos o professor.

Não é de admirar, portanto, que o dia em que este obstáculo foi ultrapassado tenha ficado na sua memória: “Lembro-me do dia em que o Michel Brune, um dos meus colegas, chegou ao meu gabinete e disse que tínhamos uma cavidade que conseguia manter fotões durante décimas de segundo. [...] Foi aí que tive a esperança de que poderíamos alcançar algo que seria muito importante.” A Figura 1 mostra uma foto da cavidade que tornou a experiência possível. Esta cavidade mantém fotões com um tempo-de-vida máximo de 130 mili-segundos, traduzindo-se num percurso total de cerca de 40000 km no seu interior, e permitindo sucessivas interacções com milhares de átomos.

Com a cavidade conseguida, os fotões aprisionados e os átomos afinados, a experiência estava pronta a ser executada, se bem que Haroche nunca esteve confiante de que a experiência funcionaria: “Um ou dois meses depois obtivemos as primeiras medições não-destrutivas de

fotões, algo que, até esse ponto, não tinha a certeza de que funcionaria e, mesmo que funcionasse, não achei que me valesse o prémio Nobel.” Exemplos flagrantes do poder desta experiência podem ser vistos na Figura 2. Estes resultados mostram a evolução do número de fotões no interior da cavidade ao longo de diferentes ensaios.

De facto, mais modesta do que a sua confiança no sucesso da experiência era a sua confiança na possibilidade de ser reconhecido com o prémio Nobel, à qual explica que “há apenas um prémio Nobel [da Física] atribuído cada ano, e este prémio foi fundado há mais de cem anos, numa altura em que a comunidade científica era muito reduzida. Agora, é uma comunidade enorme e há apenas um prémio que pode ser partilhado, no máximo, por três pessoas.”

“Muitas pessoas merecem-no e, em grande parte, é uma questão de sorte e das circunstâncias. Muitas pessoas que o merecem tanto como eu, algumas ainda mais do que eu, não o receberão devido ao facto de depender de tantos factores. Nunca se pode ter a certeza... Devo dizer que, entre os físicos que conheço, aqueles que vivem obcecados pelo prémio Nobel são muito infelizes, porque esperam obtê-lo e, ao não conseguirem, ficam frustrados”, confessou, antes de nos presentear com uma reflexão profunda sobre a atitude de um cientista perante a atribuição de um prémio Nobel: “Não acho que seja esse o motivo porque fazemos investigação... Enquanto investigadores, devíamos ficar entusiasmados com o que fazemos. O tipo de prazer e alegria que se tem ao obter um novo resultado é mais puro do que aquele que se tem ao ser anunciado vencedor do prémio Nobel, a verdade é essa. [Ganhar o prémio Nobel] é algo muito importante... e muito cansativo! [Ri-se.]” Parece que a vida não fica mais fácil por se ganhar um prémio Nobel. Não se pode ter tudo, de facto. ■

O que faz um avião voar?



por Telmo Cunha*, aluno do 3º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

Adinâmica de um avião pode ser descrita pela interação de quatro forças aerodinâmicas. Uma força de tração (*thrust*) gerada por um sistema de propulsão, uma força de arrasto causada pela resistência do ar (*drag*) e uma força de sustentação (*lift*) que compensa o peso do avião (*weight*). Pretende-se explicar de forma simples, com conceitos familiares em física, a forma como surge a força de sustentação.

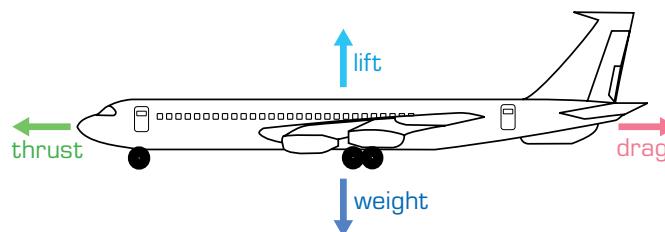


Figura 1: Forças aerodinâmicas presentes num avião.

Quando um objeto se move através de um fluido, as moléculas são livres de se moverem em torno deste com diferentes velocidades, que vão depender da posição. Numa asa comum de avião, devido à sua geometria e ao ângulo de ataque (AOA), as linhas de corrente curvam no topo da asa e comprimem causando uma aceleração do fluido na direção descendente ao longo da asa (Figura 2). Devido a este efeito, a velocidade do fluido no topo da asa será superior à velocidade na zona inferior da asa.



Figura 2: Perfil de escoamento num túnel de vento em torno de um perfil alar (Universidade de Cambridge).

De acordo com a equação de Bernoulli na aproximação de fluidos incompressíveis (válida a velocidades inferiores a Mach 0.3 e ao longo de uma linha de corrente),

$$\rho \frac{v^2}{2} + P = \text{constante},$$

onde v é a velocidade, P a pressão e ρ a densidade do fluido, a diferença de velocidade entre o topo e a base da asa, causam um diferencial de pressão, logo, uma força normal à direção do fluxo inicial do fluido no sentido ascendente.

O AOA (α) mencionado anteriormente é definido como o ângulo entre o fluxo do fluido e uma secção de referência no perfil alar denominada linha de corda (que une os dois extremos do perfil). Também se define um ângulo de ataque absoluto (α_{abs}) referenciado a zero graus para uma linha de sustentação nula (Figura 3).

Como também é possível verificar na Figura 2, na zona inferior da asa, o fluido tem linhas de corrente redirecionadas no sentido descendente. De acordo com a lei da ação-reacção de Newton, é gerada uma força de reação no sen-

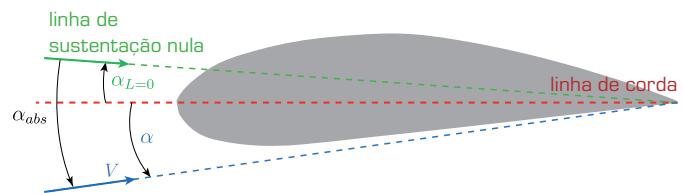


Figura 3: Ângulo de ataque e linhas de corda e de sustentação nula para uma asa.

tido contrário ao deslocamento do fluido que atua na asa. Esta força será função da taxa de variação do momento do ar redirecionado.

A influência do ângulo de ataque na sustentação e as leis de Newton permitem compreender como é gerada a sustentação em aviões (de asas simétricas e não simétricas). Um outro comportamento descrito pela influência do AOA é o voo invertido. Apesar de aviões com asas abauladas (não simétricas) típicas não voarem otimamente quando invertidos, uma alteração do AOA permite gerar sustentação através do fluido redirecionado. A dependência do *lift* em função do AOA, para uma asa típica, pode ser verificada na Figura 4. A força de sustentação L pode ser calculada através da expressão

$$L = C_L \frac{\rho}{2} S V^2 ,$$

onde S é a área de superfície da asa e V a velocidade de voo. A constante C_L corresponde ao coeficiente de sustentação e é, em geral, bastante complexo de determinar sen-

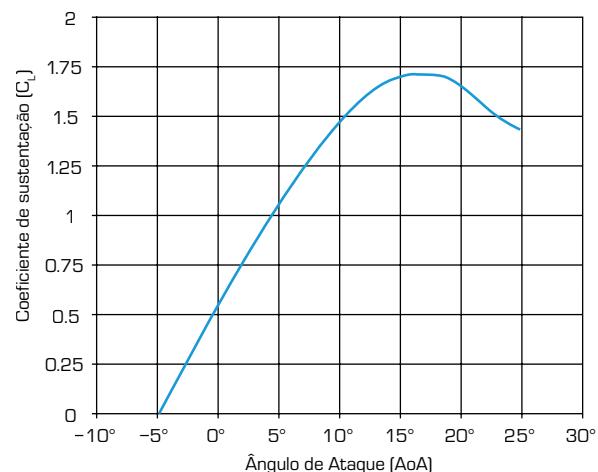


Figura 4: Variação do C_L com o AOA.

do usualmente determinado experimentalmente em túneis de vento; este valor irá incluir dependências complexas do formato da asa, compressibilidade e viscosidade do ar.

Apesar desta descrição, simplificada, para o aparecimento da sustentação, existem modelos bem mais complexos mas também capazes de melhores previsões como é o caso do teorema Kutta-Joukowski que inclui o efeito de fluidos em translação e em rotação. Fica ao cargo do leitor mais interessado tentar perceber esta descrição. ■

* O autor escreve ao abrigo do novo Acordo Ortográfico.

Ver mais e melhor

Microscopia electrónica de varrimento

por Rita Teixeira da Costa, 2º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

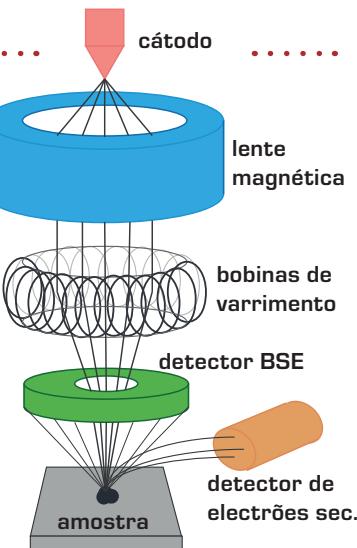
O olho humano é um feito de engenharia notável. Capaz de detectar desde alguns fotões até à luz solar e de focar o horizonte menos de meio segundo depois de examinar este artigo, esta estrutura já foi considerada tão complexa que o próprio Charles Darwin reconheceu que a noção de que tivesse sido desenvolvida por processos evolutivos, por oposição à hipótese criacionista, deveria, para o leigo, soar “absurda ao mais alto nível”. No entanto, apesar dos louvores que o olho merece, não é suficiente para perscrutar o que nos rodeia. O microscópio de varrimento electrónico é apenas mais um passo no nosso esforço permanente de ver mais e melhor.

Robert Hooke é conhecido por duas coisas: as suas constantes disputas com Isaac Newton, que lhe valeram a expulsão da aclamada Royal Society de Londres, e as suas pulgas. Referimo-nos, evidentemente, aos desenhos detalhados, publicados em 1665 na *Micrographia*, das suas observações do reino animal e vegetal debaixo de um dos primeiros microscópios ópticos. Contrariamente à crença popular, não é a Hooke que se deve a invenção destes pequenos aparelhos que, já há vários anos, invadem as escolas e casas dos amantes de ciência, mas foi ele que, apoiando-se sobre os ombros de gigantes (para parafrasear o seu arqui-inimigo), tanto contribuiu para a sua popularização entre os cientistas da sua época.

Desde 1665, devido à sua dependência da luz, a evolução dos microscópios ópticos tem vindo a estagnar. As incontornáveis aberrações ópticas nas lentes e a tendência da luz para se difractar limitam muito as capacidades de ampliação e resolução destes microscópios. E se, apesar disso, os mais miúdos continuam a entusiasmar-se com o mundo visto desta perspectiva, o mesmo não pode ser dito dos graúdos. Com efeito, no final do século XVIII, os cientistas já exploravam a possibilidade de trocar a luz pelos raios catódicos, ou, como os conhecemos hoje, electrões. A manipulação dos feixes de electrões, tornada fácil pela descoberta recente das leis de Maxwell, foi o que permitiu, lenta mas seguramente, desenvolver os microscópios de transmissão (TEM) e de varrimento electrónico (SEM) que existem hoje nos laboratórios.

Os microscópios com esta tecnologia permitem, de facto, ampliações e resoluções muito superiores às dos microscópios ópticos. Os novos brinquedos científicos, que já revelaram que as pulgas de Hooke são, afinal, mais aterradoras do que o que se suporia [Fig. 1], encontram-se, actualmente, em muitos laboratórios de nanotecnologias, mas também de bioquímica, análise química e material. É o

Figura 2: Esquema de um microscópio electrónico de varrimento. O feixe de electrões ejectados no cátodo (filamento metálico) é direcionado por lentes magnéticas e bobinas de varrimento. Os electrões emitidos, reflectidos ou dispersados pela amostra são captados por dois detectores (de electrões backscattered, ou BSE, e secundários) e processados por software próprio que permite criar uma imagem aspecto 3D.



caso do Laboratório HERCULES (Herança Cultural, Estudos e Salvaguarda) da Universidade de Évora, onde esta tecnologia é utilizada diariamente com o objectivo de estudar os bens patrimoniais que passam pelo centro.

Funcionamento do SEM/EDX

Um microscópio de varrimento electrónico cria um mapa de uma amostra através da interacção pontual de um feixe muito fino de electrões com a superfície [Fig. 2].

O primeiro passo é, por isso, a formação do feixe, que se dá no cátodo, pelo aquecimento de um material (tipicamente, um filamento de tungsténio) com electrões com uma energia de remoção baixa, mas com ponto de fusão elevado, de modo a maximizar o aproveitamento da substância. A emissão ocorre, principalmente, na ponta dobrada do filamento, pois os defeitos na malha metálica facilitam a perda de electrões. Uma vez que a técnica exige uma incidência muito precisa destas partículas, o feixe é focado com a ajuda de várias lentes magnéticas, que corrigem a trajectória dos electrões. O feixe é, depois, guiado ao longo da área a analisar pela acção de campos magnéticos fortes, criados por bobinas em torno da câmara da amostra, que determinam a trajectória das cargas e, por isso, o seu ponto de incidência.

A interacção dos electrões acelerados com a amostra assume várias formas. No contacto com a superfície, são imediatamente ejectados electrões da amostra (ditos secundários), captados num detector que regista a luminosidade da área analisada em função das detecções efectua-



Figura 1: Pulga, vista com SEM (esq.; cor falsa) e por Hooke (dir.).

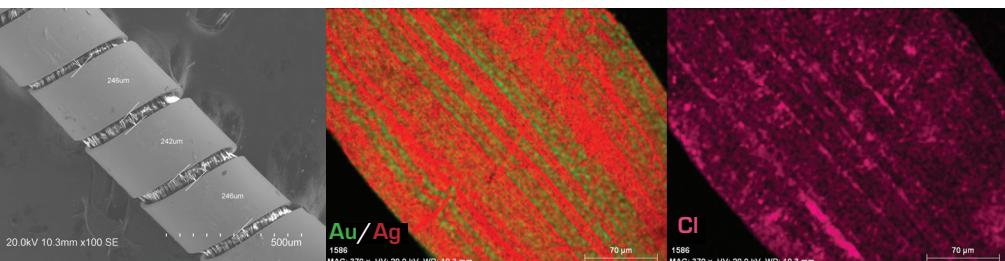


Figura 3: Fio metálico do estandarte da Inquisição (esq.) e mapas de EDX de ouro/prata (Au/Ag, centro) e cloro (Cl, dir.) de uma face da folha metálica (Lab. HERCULES). As zonas brilhantes no mapa de cloro evidenciam a degradação da prata por formação de cloreto de prata (AgCl).

das. É por este mecanismo que são geradas as imagens de aparência tridimensional que são geralmente divulgadas. No entanto, também existem electrões de alta energia do feixe que sofrem reflexão ou dispersão (*backscattering*) sobre a superfície. O padrão destas interacções permite distinguir regiões de composição química distinta, sendo a luminosidade da imagem resultante ajustada em função disso, mas não são precisados os elementos químicos em cada área amostrada. As imagens obtidas por estas duas formas de interacção são a preto e branco, que podem ser posteriormente coloridas digitalmente.

As análises com o SEM também podem ser complementadas pela análise com EDX [espectroscópio de raios-X dispersivo], um detector adicional que pode ser acoplado ao SEM. O feixe de electrões que incide na amostra é muito energético, podendo, por vezes, levar à ejeção de electrões da camada mais interior do átomo. Nestas situações, electrões de níveis energéticos superiores transitam para a camada electro-deficiente, emitindo radiação na zona dos raios-X. Como a frequência de emissão é característica de cada elemento químico, a interpretação destes dados permite obter a composição elementar de um ponto, ou, até, elaborar mapas de composição química da amostra.

Aplicações

O Laboratório HERCULES está equipado com um microscópio de varrimento de pressão variável, que exige uma menos extensa e intrusiva preparação das amostras do que um SEM vulgar, acoplado a um aparelho EDX. Neste contexto, o aparelho é utilizado, principalmente, no estudo de bens patrimoniais e arqueológicos, com o intuito de aferir o estado de conservação da amostra (através dos mapas de superfície das amostras) e/ou analisar a sua composição química (através da análise com EDX).

Introduzida em Portugal em 1536, a pedido do rei D. João III, a Inquisição Portuguesa tinha sede em Évora (para além de Lisboa e Porto), tendo, por isso, um impacto significativo na região. Recentemente, o Laboratório foi incumbido

do estudo material e, em colaboração com o Laboratório José Figueiredo, do diagnóstico do estado de conservação do estandarte da Inquisição Portuguesa, actualmente sob a custódia do Museu de Évora. Esta peça contém ornamentos em fio dito laminado, composto por um enrolamento de uma folha metálica fina em torno de um núcleo de seda. As imagens obtidas por microscopia electrónica de varrimento [Fig. 3] foram fulcrais para a identificação das ligas metálicas neste fio (liga de prata com algum cobre, estando a folha dourada de ambos os lados) e da qualidade da manufatura, mas também para avaliar o estado de degradação destes elementos através da localização de fracturas.

Outro exemplo relevante das aplicações do SEM-EDX é o estudo, que tem ido desenvolvido recentemente, dos vidros romanos encontrados em escavações arqueológicas em Beja e Fronteira (Alentejo), com o intuito de melhor compreender os processos de degradação destes artefactos. Os vidros examinados apresentam um carácter sódico-cálcico, com baixos teores de magnésio e potássio, como é típico do período romano estudado (séculos I a IV), e evidências de corrosão, com crostas de aspecto irregular. A comparação entre áreas com diferentes níveis de degradação, através de mapas químicos, obtidos com EDX [Fig. 4], permitiram mostrar que a corrosão destes vidros nos solos em que foram encontrados é caracterizada por uma lixiviação do silício (elemento presente na sílica, componente principal) e sódio (presente na soda, utilizada para baixar o ponto de fusão da sílica) nas zonas afectadas, e um enriquecimento em alumínio e potássio. As crostas evidenciam traços fortes de ferro, possivelmente resultante da precipitação de compostos deste metal, que já se encontra em menor concentração no vidro não degradado. ■

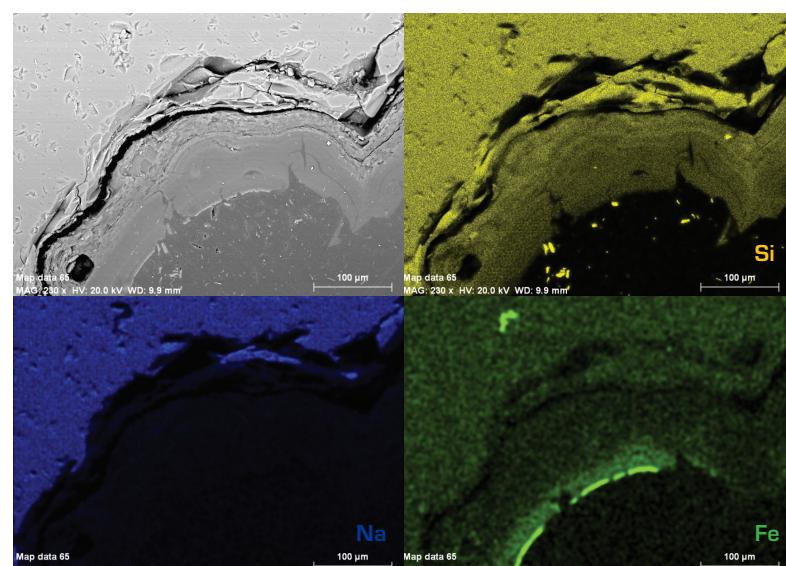


Figura 4: Análise de um fragmento de vidro romano: imagem por microscópio de varrimento (sup. esq.) e mapas de EDX de silício (sup. dir.), sódio (inf. esq.) e ferro (inf. dir.). (Lab. HERCULES). A região escura no canto inferior direito da primeira imagem deve-se à resina na qual o vidro está conservado. Verifica-se que o vidro se divide em dois segmentos com composição química diferente: enriquecimento em sódio no fragmento superior e enriquecimento em alumínio (mapa suprimido) no fragmento inferior. Na última imagem, evidencia-se o enriquecimento em ferro da crosta do vidro.

A física e a tecnologia da... Lâmpada

por João Melo*, aluno do 1º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

Embora de autoria controversa, não há como negar que a luz elétrica foi das invenções que mais mudou a humanidade, abrindo portas para todo um novo mundo de tecnologias e inovações, alterando ritmos e estilos de vida.

Desde muito cedo que o ser humano sentiu necessidade de se iluminar à noite, para se proteger de predadores e prolongar o tempo útil de cada dia. Tudo isso começou com a "descoberta" do fogo há mais de 100 mil anos. Fomos evoluindo até chegar ao candeeiro a petróleo, mas o princípio era sempre o mesmo, arder um determinado combustível. Em 1879, Thomas Edison mudou este paradigma, inventando/comercializando a lâmpada de incandescência.

A primeira lâmpada funcionava segundo um princípio muito simples: todos os corpos emitem radiação eletromagnética, ou seja luz, cuja energia depende da sua temperatura. Tal acontece pois a temperatura não é mais que a agitação dos átomos que constituem os corpos, e como esses átomos são feitos de partículas com carga elétrica, essa agitação traduz-se em emissão de radiação. E quanto maior for a temperatura, maior é agitação dos átomos e maior a energia da radiação, logo maior a sua frequência. Então, se aquecermos um corpo o suficiente, ele passa a emitir radiação visível. Foi exactamente isso que Edison fez. Ao passar corrente elétrica por um fio muito fino ele aquece, e se a corrente tiver intensidade suficiente o fio passa a emitir luz visível e ilumina-nos as casas à noite. Parece simples, porém é difícil encontrar um material que resista a essas temperaturas. Edison usou um fio de carbono, mas as lâmpadas atuais costumam utilizar tungsténio.

Todos os corpos emitem radiação eletromagnética, cuja frequência é diretamente proporcional à sua temperatura.

Contudo essas lâmpadas não são muito eficientes, e por motivos ecológicos e económicos procurou-se novas formas de fazer luz, criando-se as lâmpadas fluorescentes. Nestas lâmpadas está guardado um gás muito rarefeito, nas nossas casas costuma-se usar o mercúrio, ao qual é aplicada uma voltagem, formando-se uma corrente elétrica de baixa intensidade dentro da lâmpada. Os eletrões da corrente vão excitar os eletrões do gás, num fenómeno chamado difusão, que por sua vez emitem radiação ao voltarem para um estado com menos energia. Embora os gases também emitam na região do visível, a grande maioria da radiação emitida é ultravioleta, que, para além de ser invisível aos nossos olhos, é prejudicial para a nossa saúde. Como tal é aplicado na parte interior da lâmpada um pó de



Figura 1: Lâmpada de incandescência (à esquerda), lâmpada fluorescente (ao centro) e lâmpada de LED's (à direita).

fósforo que absorve a luz ultravioleta e emite na região do visível, sendo que a energia perdida nesse processo é dissipada sob a forma de calor.

Mais recentemente surgiram os LED's (Light Emitting Diodes, Díodos Emissores de Luz). Embora tenham sido inventados em 1962, só mais tarde é que evoluíram de modo a poderem ser comercializados. Estas lâmpadas têm um custo de produção mais elevado que as anteriores, contudo excedem a sua eficiência por muito e facilmente produzem uma luz muito mais intensa. As suas aplicações vão para além da iluminação noturna, sendo também usados como indicadores eletrónicos em determinados circuitos ou em semáforos.

A explicação para o funcionamento de um LED é um pouco mais complexa que a das restantes lâmpadas. Consiste numa placa de um material semicondutor dopado, isto é, com impurezas de tal forma que fique com duas camadas, uma delas com buracos livres para eletrões ocuparem e a outra com um certo número de eletrões em excesso. Por ser um semicondutor, os eletrões conseguem fluir mas não com muita liberdade, pelo que na junção das duas camadas os eletrões ocupam os buracos criando uma região neutra, não sendo, no entanto, capazes de neutralizar todo o semicondutor. Esta camada neutra irá servir como uma barreira. Quando se aplica uma tensão os eletrões ganham energia, sob forma de velocidade, e passam a conseguir ocupar a maioria dos buracos. Importante notar que a corrente elétrica apenas consegue fluir nesse sentido, negativo para positivo, e não no sentido oposto. Contudo, estivemos a falar do funcionamento de um diodo normal até agora. A diferença para um LED é que quando há corrente elétrica e os eletrões ocupam os buracos livres, eles libertam a energia que tinham acumulado sob a forma de luz. ■

* O autor escreve ao abrigo do novo Acordo Ortográfico.

The Calculus Wars: Leibniz vs. Newton vs. Hooke

por António Coelho*, aluno do 1º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

Um dos grandes debates da história da Ciência centra-se no progenitor do Cálculo moderno: terá sido Leibniz ou Newton?

A disputa inicial impôs-se porque Newton reivindicou ter sido ele o primeiro a fazer a descoberta (ou invenção?), ainda que Leibniz tenha publicado primeiro. No entanto, existem provas de que Newton já tinha as suas ideias bem sólidas à data da publicação de Leibniz.

Dados estes acontecimentos, talvez tenham ficado menos conhecidas as acesas disputas entre Newton e Robert Hooke, um cientista inglês que descobriu a célula, formulou a lei da elasticidade e ajudou Christopher Wren (arquiteto inglês) na reestruturação de Londres após o Grande Incêndio de 1666.

Conta-se que uma noite, Wren e Hooke, acompanhados por Edmond Halley, enquanto bebiam a sua cerveja (a moda do chá iria chegar um século depois), discutiam o porquê de os planetas se moverem da forma como o fazem, levando Wren a interrogar-se se haveria uma lei matemática que pudesse descrever tal movimento. Hooke reclamou já ter feito alguns cálculos, os quais lhe são exigidos por Halley, mas que nunca chegam a aparecer. Chateado com o egocentrismo de Hooke, Halley dirige-se para Cambridge a fim de se encontrar com Newton e encorajá-lo na procura dessa lei matemática. Este último há já alguns anos que se encontrava a viver solitariamente após Hooke o ter acusado publicamente de lhe ter roubado o seu trabalho sobre a luz e cores.

Halley surpreende-se quando Newton lhe conta as suas descobertas relativas aos movimentos planetários, pelo que não hesita: *a book must be published!*

Contudo, dois problemas se afiguram à nova dupla: em primeiro, temos Hooke, em Londres, a fazer outra vez das suas, anunciando publicamente que Newton lhe roubara a ideia da Lei da Gravitação!; em segundo, a relutância da Royal Society (RS) na publicação já que o livro anterior que tinha sido editado por esta sociedade fora um fracasso em vendas e o orçamento anual estava esgotado. O livro anterior chamava-se... "A história dos peixes".

Cansado da inveja de Hooke, Newton ameaça não publicar o seu livro, mas Halley persuade-o a levar avante o projeto, pelo que o edita e publica pelos seus próprios meios. É assim que nascem os famosos *Philosophiae*

Naturalis Principia Mathematica!

Um facto curioso no meio desta história é a inexistência de qualquer retrato de Hooke. Pensa-se que, de facto, existia um quadro com a sua figura na RS, mas, reza a lenda de que, quando Newton assumiu a presidência desta instituição, queimou-o. *Revenge has been made!*

Então e em relação à disputa com Leibniz? Houve algum vencedor?

Alguns anos depois, a RS proferiu o seu veredito atribuindo todo o mérito a Newton e acusando Leibniz de plágio. Um dos argumentos usados baseia-se numa carta que continha algumas ideias desenvolvidas por Newton e que tinha chegado às mãos de Leibniz, o qual usou essas ideias e alterou somente a notação de forma a encobrir o plágio. Assim, no meio disto tudo, uma coisa é certa: é a Leibniz a quem devemos o "d" das derivadas e o "S" no logotipo do IST. É, aliás, bastante claro entre a comunidade científica de que o método de Leibniz é mais eficiente, tanto que o mesmo se passou a usar em toda a Europa, exceto em Inglaterra, onde, por mero orgulho nacional (o Leibniz era alemão), isso só veio a acontecer em 1820.

Não houve nenhum vencedor. Considera-se atualmente que Leibniz e Newton são ambos os progenitores do Cálculo, como se formassem um casal cujo filho prodígio é das ferramentas mais úteis à Humanidade. ■



Imagen adaptada de <http://ricardoheras.com/>.

*O autor escreve ao abrigo do novo Acordo Ortográfico.

Computação Quântica

Como a teoria quântica poderá transformar os computadores

por André Coroado, aluno do 4º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

O florescimento da computação revolucionou por completo a civilização humana. Todavia, a lógica computacional utilizada na grande maioria dos computadores assenta em princípios clássicos anteriores ao advento da teoria quântica. Como tal, desenvolvimentos recentes têm surgido no sentido de uma tecnologia computacional baseada na física quântica. Mas como funcionam e que maravilhas poderemos esperar dos computadores quânticos?

Em 1965, Gordon Moore, co-fundador da *Intel Corporation*, estimou que a velocidade dos processadores aumentaria exponencialmente. Dez anos mais tarde estipulou um período aproximado de 18 meses para a duplicação da potência computacional, formulando a célebre Lei de Moore. Esta conjectura revelou-se extraordinariamente exacta, coincidindo com os resultados computacionais obtidos ao longo das décadas seguintes. Todavia, note-se que assenta na duplicação do número de transístores utilizados num processador, cuja capacidade aumenta ao longo do tempo enquanto as suas dimensões diminuem. Naturalmente tem de existir um limite físico para a redução de tamanho dos transístores, imposto pelas dimensões dos átomos e moléculas dos seus constituintes, o que representa um entrave fundamental para a validade da Lei de Moore à escala nanométrica. No limite de dimensões muito reduzidas, da ordem do nanómetro, os efeitos quânticos não podem ser desprezados, pelo que o aumento da potência dos computadores terá de passar por uma mudança de paradigma da ciência computacional, pautada pelo

desenvolvimento de lógica computacional assente na teoria quântica.

A ideia parece bastante natural, mesmo no quadro científico da época em que Moore formulou a sua lei, já com as bases da física quântica solidamente estabelecidas. Não muito tempo depois, em 1981, a computação quântica seria trazida ao debate científico pela voz visionária de Richard Feynmann. O ilustre físico norte-americano evidenciou as vantagens de sistemas computacionais quânticos para o processamento de cálculos complexos, cuja execução seria muitas vezes mais rápida do que num computador vulgar. A ideia inspirou o britânico David Deutsch, que em 1985 explorou a possibilidade de construir um computador quântico relativamente simples, capaz de realizar tarefas num tempo drasticamente menor do que o seu equivalente clássico, conhecido por algoritmo de Deutsch.

Nas últimas décadas, diversos grupos de investigação nos EUA, Canadá e Reino Unido têm posto em prática estas ideias, desenvolvendo algoritmos que permitem a utilização de sistemas computacionais quânticos no processamento de cálculos. A tentativa mais próxima de um computador quântico é ainda muito limitada no que respeita à resolução de problemas de interesse científico que justifiquem o uso de computadores quânticos em detrimento dos convencionais. Mas qual o mecanismo utilizado pelos computadores quânticos e que vantagens nos traz?

Em mecânica quântica, a mesma partícula pode encontrar-se simultaneamente em vários estados, o que corresponde a afirmar que um estado quântico é, na verdade, a sobreposição de vários estados acessíveis à partícula. No entanto, a realização de uma medição conduz à detecção de um único estado da partícula, que o acto de medição selecciona aleatoriamente mediante as probabilidades associadas a cada estado, previamente determinadas pela evolução e preparação da partícula. A computação quântica baseia-se na aplicação destas noções aos bits, que dão lugar a bits quânticos: o bit deixa de ser uma entidade clássica definida como 0 ou 1 para se constituir como sobreposição dos dois estados.

E a que correspondem fisicamente estes bits quânticos? Em princípio, podem utilizar-se diferentes constituintes à escala atómica, desde que possam ser tratados como sistemas quânticos binários: átomos que podem estar e não estar excitados, fotões que podem estar em dois pontos do espaço distintos, e o spin de partículas como o electrão ou os núcleos atómicos. O spin pode ser visto como uma

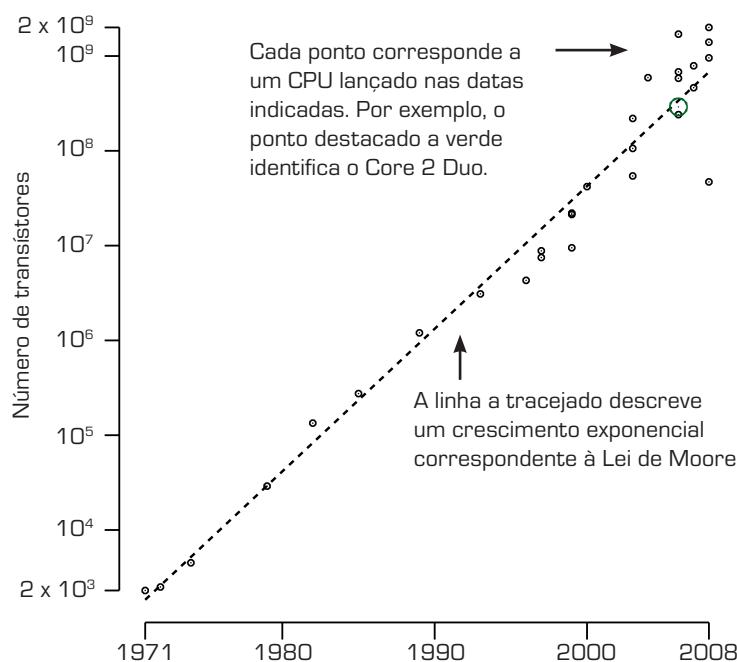


Figura 1: Evolução do número de transístores em unidades de processamento nas últimas décadas (mod. wikipedia.org).



Figura 2: Tentativa de computador quântico desenvolvido pela D-Wave Systems.

quantidade de rotação inerente a cada partícula quântica que, em muitos casos, assume apenas dois valores.

A grande vantagem do bit quântico em relação ao bit clássico reside justamente na possibilidade de ocupação simultânea de diferentes estados. Considerando 2 bits quânticos, sabemos que cada um deles corresponde a uma sobreposição dos estados 0 e 1, logo o par de bits quânticos pode encontrar-se em 4 estados diferentes – 00, 01, 10, 11 – cada um com uma probabilidade de medição associada. Extrapolando este raciocínio para um conjunto de n bits quânticos, poderemos afirmar que o sistema corresponderá a uma sobreposição de 2^n estados distintos, correspondentes a todas as combinações possíveis de valores de cada bit quântico. Independentemente do valor de n , o sistema pode ocupar simultaneamente todos os 2^n estados acessíveis, enquanto que num computador clássico o sistema só poderia encontrar-se num determinado estado individual a cada instante. Por este facto, o computador quântico pode ter uma memória muito superior à do computador clássico e conseguir resolver problemas num intervalo de tempo muito menor, uma vez que pode aceder a todos os estados possíveis em simultâneo, em vez de analisar cada um separadamente.

Até hoje, uma das principais aplicações encontradas para os computadores quânticos reside na decomposição de um número inteiro com muitos bits em factores primos, através de algoritmos introduzidos por Peter Shor, em 1994. O recurso à computação quântica permitiria efectuar a factorização de um número com milhares de bits em tempo útil. Tal representaria um ganho enorme, tendo em conta que o recorde actual corresponde à factorização de um número de 768-bit (232 dígitos) em 2 anos, utilizando várias centenas de processadores de alto desempenho. Estima-se que, utilizando um único processador de alto desempenho, a tarefa demoraria 1500 anos.

O interesse da resolução destes problemas matemáticos é colossal porque a grande maioria dos processos de encriptação utilizados actualmente assentam sobre a de-

composição em factores primos. Sistemas de encriptação baseados neste processo apresentam um elevado grau de segurança contra mecanismos de descodificação usados na computação actual, mas seriam altamente vulneráveis a uma desencriptação quântica, dada a facilidade com que os computadores quânticos poderiam realizar as operações matemáticas subjacentes.

A computação quântica também possibilitaria uma revolução das simulações em física quântica ou em , uma vez que os computadores seriam sistemas quânticos propícios à realização das mais diversos testes experimentais na área. Uma outra aplicação surpreendente consiste no problemas da identificação de uma palavra-chave num conjunto de n escolhas equiprováveis. Utilizando um computador clássico e testando cada opção individualmente, a uma ordem aleatória, seria de esperar que, a em média, a palavra-chave correcta fosse descoberta após $n/2$ tentativas equanto que . Já utilizando um computador quântico , o teste de todas as opções de forma simultânea e o tempo necessário para encontrar a opção correcta corresponderia ao teste de apenas \sqrt{n} hipóteses – uma redução de tempo muito significativa para um número de opções muito grande. Esta classe de algoritmos, conhecidos por algoritmos de busca quânticos, foram introduzidos por Lov Grover, em 1996.

Contudo, várias dificuldades técnicas subsistem, constituindo entraves fundamentais à concretização do prodigioso sonho da computação quântica. Destacamos os problemas associados à manipulação de componentes à escala atómica, essencial nas operações com bits quânticos, em desenvolvimento graças à crescente aposta nas nanotecnologias. Adicionalmente, é impossível manter um sistema quântico perfeitamente isolado, de tal modo que é importante lidar com as interferências do meio ambiente, que introduzem erros no sistema. Não obstante, a computação quântica constitui-se como uma dos mais fascinantes objectos de investigação da física e da tecnologia actuais, podendo revolucionar outra vez a computação e, quem sabe, promover novos progressos na investigação em ciência fundamental. ■

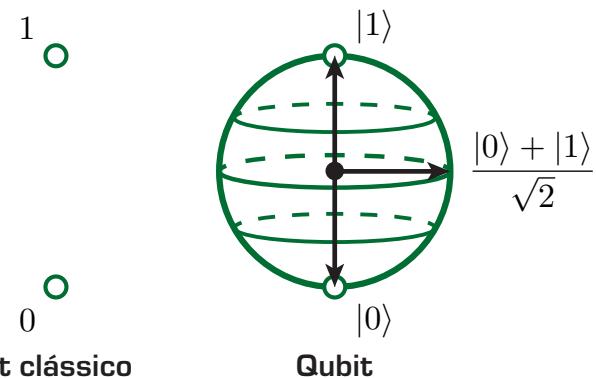


Figura 3: Bit clássico vs. qubit. O bit clássico ocupa separadamente um dos dois estados possíveis, enquanto o bit quântico corresponde a uma sobreposição de ambos, com uma dada probabilidade associada. Fonte: qoqms.phys.strath.ac.uk.

Fotovoltaico, nanotecnologia e o futuro da energia

por Manuel João Mendes, investigador do CENIMAT, FCT; UNL (mj.mendes@fct.unl.pt)

A tecnologia de conversão luz → electricidade está ainda nos seus primórdios e sofrerá importantes avanços na próxima década, devido ao desenvolvimento de soluções nanotecnológicas desenhadas para células solares. A implementação de nanotecnologia permitirá uma melhoria substancial da interação entre o vasto espectro da luz solar e a matéria que compõe os dispositivos fotovoltaicos.

Nos últimos 100 anos, o forte crescimento da população e a exploração de grandes quantidades de combustíveis fosseis fizeram com que a média anual de consumo energético subisse abruptamente, alcançando hoje 16 triliões de watts (16 TW) a nível global. Como é sabido, o panorama actual do fornecimento e consumo de energia não se poderá manter por muitos mais anos dado que é economicamente, ambientalmente e socialmente insustentável.

A grande maioria dos recursos energéticos existentes provem de uma mesma fonte: o Sol. A luz solar é a responsável pela origem da vida e por praticamente todos os processos naturais no planeta. Por exemplo, é ela que causa os gradientes térmicos na atmosfera que produzem vento que pode ser convertido em energia eólica. É a energia solar que evapora a água e produz nuvens que dão origem aos rios e à energia hidroeléctrica. É ela que gera a fotosíntese das plantas e alimenta o crescimento de todos os seres vivos. Mesmo a gasolina que usamos não é mais do que energia solar numa forma concentrada, que foi armazenada ao longo de milhões de anos por organismos pré-históricos que ao sedimentarem deram origem aos combustíveis fósseis.

O veículo que a sociedade desenvolveu para transportar energia é a electricidade, gerada através de processos de conversão tais como as turbinas que convertem energia mecânica em eléctrica. Contudo, em cada conversão grande parte da energia incidente é perdida, por exemplo por dissipação térmica (aquecimento). Daí que quanto maior o número de conversões energéticas menos eficiente é o uso que estamos a fazer da energia inicial. Se, por exemplo, analizarmos o uso de combustíveis fosseis na sua totalidade, este é dos processos menos eficientes energeticamente. Não só são necessários milhões de anos de sedimentação de matéria orgânica para gerar combustíveis que armazenem uma quantidade de energia significativa, como também o seu uso implica várias conversões dissipativas¹. Por estes motivos, bastarão apenas dois séculos [este e o anterior] para esgotar os combustíveis fosseis, e no próximo século XXII eles serão já considerados a “energia dos antepassados”.

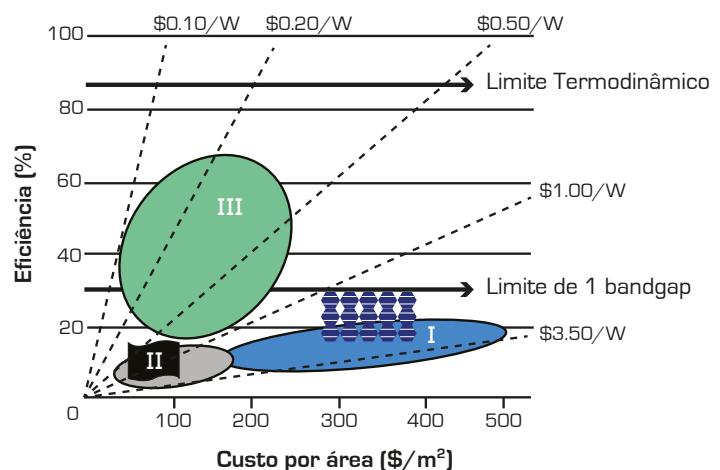


Figura 1: A 1^a geração de fotovoltaico (I, a verde) corresponde às células solares convencionais crescidas em wafers de silício, e é ainda a tecnologia dominante no mercado. Dado que o material absoror nestas células é um único semicondutor (um só *bandgap*), elas não podem alcançar eficiências superiores ao limite de Shockley-Queisser (~30%). A tecnologia de filme fino criou uma 2^a geração de células (II, a amarelo) depositadas em substratos de baixo custo, potencialmente flexíveis. Por isso, o preço da electricidade produzida por estas células pode ser inferior aos preços da 1^a geração, mas as eficiências são mais baixas devido à menor absorção e qualidade do material fotovoltaico. Uma 3^a geração (III, a magenta) está a ser desenvolvida, utilizando não só as vantagens das gerações anteriores como também incorporando materiais nano-estruturados que permitem alcançar eficiências muito por cima do limite de Shockley-Queisser.

Qual é a energia do futuro?

O uso directo da luz solar para produzir electricidade é o processo de consumo mais eficiente que pode existir, pois apenas implica uma conversão de energia (solar→eléctrica) directamente da fonte principal [o Sol]. A potência energética que chega constantemente à Terra a partir do Sol tem o gigantesco valor de 36000 TW, que é muitíssimo mais do que suficiente para cobrir os 16 TW consumidos em

¹ A título ilustrativo, o ciclo completo da energia que permite gerar electricidade na central a carvão do Pego, no concelho de Abrantes, contém pelo menos 4 conversões energéticas: Solar → Química [fotossíntese das plantas pré-históricas e sedimentação em carvão] → Térmica [combustão na central] → Mecânica [rotação da turbina geradora] → Eléctrica. Cada um destes processos apenas consegue converter uma pequena parte da energia inicial, por isso a electricidade que obtemos da queima de combustíveis fósseis provém de uma gigantesca quantidade de energia solar que os seres vivos pré-históricos colectaram ao longo de muitos milhões de anos.

média globalmente. Logo, a energia do futuro é inevitavelmente a geração fotovoltaica através de células solares. Este tipo de energia nunca se tornará obsoleto, até mesmo depois de o Sol desaparecer, porque iremos sempre arranjar uma forma de aproveitar directamente a luz vinda de outras estrelas que nos chega “de graça”.

Fotovoltaico – desafios

Actualmente mais de 90% do mercado fotovoltaico é ainda dominado pelas células solares tradicionais feitas numa wafer de silício cristalino. Esta é a tecnologia da 1^a geração de dispositivos (ver Fig. 1) que encontramos na maioria dos painéis instalados. O recorde de eficiência deste tipo de células convencionais está nos ~25%, o que significa que apenas 1/4 da energia solar que nelas incide é convertida em energia eléctrica. Este valor está já perto do limite máximo (30%) que teoricamente se pode alcançar com este tipo de células, determinado por *Schockley e Queisser* [1]. Por isso, nos últimos 10 anos a industria das células de silício tem evoluído mais no sentido de reduzir os custos de fabrico e de instalação dos painéis solares, por forma a baixar o preço da electricidade produzida relativamente aos combustíveis fosseis; e alcançar a chamada *paridade de rede*² que se encontra perto do 1\$/W. Em 2012 esta meta foi alcançada devido a uma dramática redução dos custos das wafers de silício e da produção das células; de tal ordem que hoje em dia as despesas dos sistemas fotovoltaicos são dadas principalmente pela integração das células em modulos e sua conexão à rede, e não pelo preço

das células em si.

A corrida pela redução dos custos da electricidade fotovoltaica levou também ao desenvolvimento de uma 2^a geração de células solares usando tecnologia de filme fino (ver Fig. 1). Nas wafer de silício cristalino a maior parte da luz solar é absorvida nos primeiros micrometros de espessura do material, sendo ~90% do material da wafer quase inactivo opticamente. Portanto, é possível fazer células eficientes apenas com poucos micrómetros (0.3-3 μm) de espessura de material, possibilitando assim reduzir os custos. Essa é a ideia do fotovoltaico de 2^a geração, que deposita por fase de vapor os finos materiais das células em substratos baratos e usados rotineiramente (por exemplo: vidro, aço, polímeros, etc.). Esses substratos podem até ser flexíveis o que habilita a produção das células em linhas de montagem de grande escala, do tipo *roll-to-roll*, e uma melhor integração dos dispositivos fotovoltaicos no quotidiano dos cidadãos (como se mostra na Fig. 2) [2].

No entanto, para que a electricidade fotovoltaica continue a progredir no mercado energético, é importante desenvolver novas soluções que visem não só prosseguir com a redução dos custos, mas também, principalmente, alcançar eficiências de conversão superiores aos limites teóricos (30%) das células de 1^a e 2^a geração. Estes são os objectivos dos investigadores que trabalham neste ramo, e existem inúmeras ideias que estão a ser pesquisadas em laboratórios e empresas espalhadas por todo o mundo. Neste artigo abordaremos alguns dos conceitos mais promissores, mas primeiro teremos de rever os princípios básicos das células solares.

Fundamentos de Fotovoltaico

Uma célula solar é, simplesmente, um dispositivo que gera corrente quando iluminado. A potência eléctrica produzida pela célula (P_C) é dada por essa corrente (I) multiplicada pela sua voltagem (V): $P_C = IV$. A eficiência (η) de conversão da célula é a razão entre a potência gerada e a potência da luz incidente (P_I): $\eta = P_C/P_I$.

O limite termodinâmico de Carnot estabelece que o máximo de eficiência que é possível alcançar, considerando transmissão de energia entre o Sol e uma célula solar perfeita (sem dissipação), é de 86%. Essa é a eficiência que é fisicamente possível chegar com uma célula ideal, capaz de transmitir toda a energia dos fotões incidentes para as cargas eléctricas da corrente que produz.

Contudo, nos dispositivos reais existem muitos factores que limitam a eficiência das células. Um dos principais é o facto dos seus materiais semicondutores não conseguirem aproveitar a maioria da energia do espectro solar. A maior parte da energia dos fotões do ultra-violeta (UV) e azul é dissipada em calor, e a maioria dos fotões do infra-vermelho (IR) nem sequer são absorvidos pelo material. Estes e outros mecanismos resultam no máximo teórico de eficiência de 30% de *Schockley-Queisser* [1]. Existe, portanto, um grande intervalo entre este limite de 30% e o limite máximo termodinâmico de 86% que é possível alcançar. O



Figura 2: A tecnologia fotovoltaica de filme fino (2^a geração na Fig. 1) permite incorporar células solares em vários substratos de baixo custo [2], tanto rígidos (vidro, aço inox, cerâmica de azulejos e telhas, etc.) como flexíveis (plásticos, têxteis, papel, etc.), possibilitando assim extender o fotovoltaico a uma vasta gama de aplicações dirigidas ao consumidor. Como exemplo, um mercado actualmente em grande expansão é o dos carregadores solares portáteis (mostrados nas imagens), para alimentar dispositivos eléctronicos (laptops, smartphones, câmaras, etc.) em zonas afastadas da rede eléctrica (na praia, em campismo, nos barcos, drones, etc.).

² Existe paridade de rede quando o custo de produção da energia eléctrica (normalmente apresentado em \$/W) fôr inferior ao preço da electricidade vendida no mercado

que significa que a tecnologia fotovoltaica que estamos a considerar para as células de hoje em dia está longe de ser a melhor e precisa de ser repensada.

Para procurarmos novos conceitos em fotovoltaico que visem produzir células solares com eficiência superior ao limite de *Schockley-Queisser* é preciso entender os processos físicos que impõem esse limite e como os ultrapassar.

O que limita a eficiência de conversão das células solares actuais?

Se me apanhassem de repente na rua e me obrigassem a dar rapidamente o nome do culpado eu diria da ponta da língua: *o material*. Isto porque até há poucas décadas a humanidade tem criado tecnologia apenas a partir de materiais existentes na natureza, como é o caso do silício. Nesse aspecto o silício é muito vantajoso porque é o segundo material mais abundante na Terra (e o 8º no universo). Além disso, as características semicondutoras do silício fazem com que ele seja dos materiais presentes na natureza mais favoráveis para células solares de 1ª geração. De entre essas características, uma das mais importantes é o denominado *bandgap* energético do semicondutor, que determina a energia mínima dos fotões da luz que conseguem produzir cargas eléctricas possíveis de se incorporarem na corrente gerada pela célula³. Em termos gerais, uma célula feita a partir de um semicondutor com um *bandgap* alto (por exemplo coincidente com a luz ultra-violeta) consegue gerar uma voltagem alta mas corrente eléctrica baixa, porque os fotões de menor energia (no espectro visível e infra-vermelho) não são absorvidos pelo material. Por outro lado, se o *bandgap* for baixo, a célula produz uma corrente alta (porque muitos fotões geram

cargas eléctricas) mas voltagem baixa. Logo, há que chegar a um compromisso óptimo entre corrente e voltagem, para maximizar a $P_c = IV$, que corresponde a um valor de *bandgap* perto do do silício³ e à eficiência teórica de 30%. Portanto, em termos de abundância e propriedades físicas, o silício é o material terrestre mais indicado para células solares de *bandgap* único, mas está longe de ser o ideal.

Novos conceitos de células solares

Para conseguirmos um avanço pronunciado na tecnologia fotovoltaica, e aproximarmo-nos da eficiência limite termodinâmica de 86%, teremos de fazer melhor que os nossos antepassados e não nos restringirmos aos materiais que podemos extrair directamente da natureza. É essencial criar novos materiais com propriedades opto-electrónicas que permitam uma interacção mais optimizada com a luz solar. Hoje isto é possível realizar devido à **nanotecnologia**, que nos permite manipular a matéria a uma escala quase atómica e construir novos compostos a partir de filmes ou partículas de poucos átomos de espessura [3, 4].

Nas ultimas duas décadas tem havido um crescimento abrupto do numero de centros de investigação e industrias dedicadas a temas relacionados com nanotecnologia. Os avanços neste fascinante campo têm permitido observar e interagir com os átomos ou moléculas que compõem as substâncias, permitindo assim estudar e criar novos compostos nano-estruturados com propriedades físicas que podem ser muito superiores às dos materiais macroscópicos a que estamos habituados. A possibilidade de manipular a matéria a esta escala tem interesse para praticamente todos os ramos científicos e, particularmente, para a tecnologia relacionada com electrónica, energia e biologia.

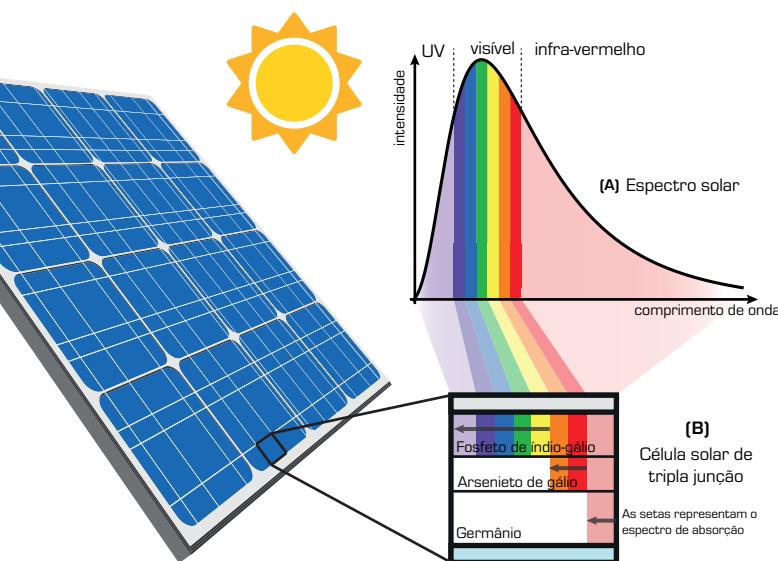


Figura 3: (A) Um dos aspectos que mais dificultam a conversão da luz solar em energia eléctrica é o facto de ela ser espectralmente dispersa, ou seja, composta por fotões de diversas energias (ou comprimentos de onda) desde o ultra-violeta ao infra-vermelho. Para um dispositivo fotovoltaico ter o máximo de eficiência tem de conseguir gerar electricidade a partir de toda a larga banda de fotões incidentes, o que não é possível à base de células solares convencionais com um só material semicondutor (um único *bandgap*). (B) O material das células de multi-junção (pertencentes à 3ª geração da Fig. 1) é composto por um gradiente de *bandgaps* ajustado ao espectro solar, conseguido através do empilhamento de filmes de distintos semicondutores. Este tipo de células denomina-se de multi-junção e têm hoje em dia o recorde de eficiência (44.7%) de todas as tecnologias fotovoltaicas. Contudo, requerem processos de fabrico de alta qualidade e materiais raros na Terra, o que encarece substancialmente o seu custo de produção e tem limitado o seu uso em aplicações espaciais (satélites, estações espaciais, etc.). Figura modificada a partir de <http://www.lanl.gov>.

³ O *bandgap* do silício coincide com a energia dos fotões do infra-vermelho (IR) próximo (com comprimento de onda de aproximadamente 1.2μm), o que significa que este material consegue absorver os fotões de maior energia (i.e. menor comprimento de onda) no espectro visível e ultra-violeta (UV) da radiação solar. Os fotões IR de menor energia não são absorvidos e atravessam o material como se fosse vidro.

Como pode a nanotecnologia ser útil para as células solares?

Na área do fotovoltaico, os investigadores estão neste momento a preparar uma 3^a geração de células (ver Fig. 1) com materiais nano-estruturados que permitam alcançar eficiências bastante superiores ao limite de Shockley-Queisser. A abordagem que até agora tem permitido atingir maiores eficiências são as células solares de multi-junção, compostas por várias nano-camadas apilhadas de diferentes materiais semicondutores optimizados para distintos intervalos do espectro solar. Permitindo assim uma maior e melhor exploração de todos os fotões da radiação solar (ilustrado na Fig. 3). Esta tecnologia fotovoltaica detém o presente recorde de eficiência nos 44.7%.

Uma eficiência recorde de ~45% pode, à primeira vista, não parecer nada de muito especial porque estamos ainda a desperdiçar mais de metade da energia solar incidente. Contudo, relativamente a outros processos de conversão, é um resultado fenomenal. Por exemplo, os motores a gasolina modernos têm uma eficiência máxima de 25-30% ao converter a energia armazenada na forma de combustível para o movimento do carro. As turbinas dos melhores geradores eólicos têm eficiências abaixo dos ~40%, sendo o limite teórico de apenas ~60% [limite de Betz]. Até mesmo a conversão directa de luz solar em calor nos painéis solares térmicos tem actualmente uma eficiência máxima que ronda os 35%. Portanto, as células solares recorde de multi-junção são um exemplo importante do potencial da nano-fabricação para a optimização de processos energéticos.

Para além das células de multi-junção, muitos outros conceitos promissores estão a ser desenvolvidos usando soluções nanotecnológicas. O uso de materiais com dimensões de poucos átomos tem fundamentalmente duas implicações físicas de muito interesse:

1] Permite criar estruturas com dimensões menores ou semelhantes aos comprimentos de onda (ver Fig. 3A) da radiação solar. Isso possibilita, por exemplo, fabricar **nano-antenas ópticas** [3] capazes de captar as ondas electro-

magnéticas da luz solar ao seu redor (tal como as antenas dos carros captam as ondas rádio) e concentrá-las fortemente nos materiais fotovoltaicos das células.

2] Faz com que certos **efeitos quânticos** possam ter um papel crucial na resposta dos dispositivos, permitindo usá-los de forma vantajosa para o melhoramento do processo de conversão fotovoltaica (exemplo na Fig. 4). Têm, por isso, surgido vários novos conceitos de células nano-estruturadas (de banda intermédia, *hot-carrier*, de pontos quânticos, etc.) cujo material fotovoltaico é construído com “tijolos” de nanopartículas capazes de interagir optimadamente e gerar corrente a partir dos diversos comprimentos de onda do espectro solar.

Tais estratégias permitirão abrir diversos caminhos para criar uma geração revolucionária de células solares, com eficiências acima de 60% e com materiais e processos de baixo custo capazes de reduzir substancialmente os preços da electricidade fotovoltaica.

Ano da luz e conclusões

2015 é um ano dedicado internacionalmente à luz, porque coincide com a comemoração de diversos feitos históricos relacionados com óptica e electromagnetismo. Este é o ano certo para iluminar mais a consciência dos cidadãos para a necessidade de promover fontes de energia sustentáveis e amigas do ambiente; para desta forma criar valor e gerar investimento em tecnologias “limpas” e eficientes, tal com a geração de energia fotovoltaica.

Sendo Portugal um dos países da União Europeia com maiores níveis de radiação solar, a aposta na energia solar é a estratégia mais inteligente para reduzir a dependência energética do país em fontes externas, abrir oportunidades para a indústria e reforçar a nossa posição relativamente aos desafios económicos que a Europa enfrenta. O investimento em fotovoltaico é particularmente importante neste momento, especialmente dada a crise financeira europeia. A crise tem vindo a atenuar o desenvolvimento do mercado energético, em particular a instalação de grandes centrais de produção (nucleares, de combustíveis fósseis, ou outras) que requerem enormes somas de capital. Portanto, actualmente faz mais sentido o crescimento energético através de sistemas autónomos distribuídos, usando pequenas unidades de produção tais como painéis fotovoltaicos espalhados pelo país. Para além de requerer menos custos de instalação, a distribuição da geração de electricidade permitida pela tecnologia fotovoltaica possibilita descentralizar e democratizar a produção energética, reduzindo também as perdas de energia associadas ao seu transporte. ■

Referências

- [1] W. Shockley and H. J. Queisser. Journal of Applied Physics (**1961**)
- [2] H. Aguas, et al., Energy & Environmental Science (**2011**), Advanced Functional Materials (**2015**)
- [3] M. J. Mendes, et al. Nanotechnology (**2013**, **2015**), Nanoscale (**2014**)
- [4] A. Luque, et al. Understanding intermediate-band solar cells. Nature Photonics (**2012**)

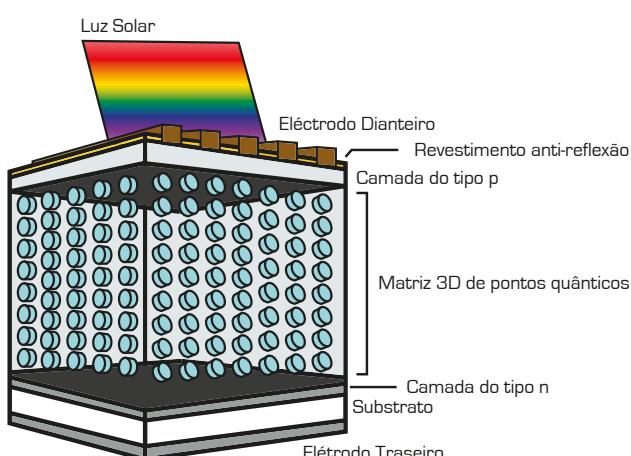


Figura 4: Os electrões dentro de nanopartículas semicondutoras com dimensões abaixo dos ~10nm exibem confinamento quântico. Este efeito permite manipular as propriedades opto-eléctronicas (tal como o bandgap) destes nano-materiais e ajustá-las para alcançar uma melhor interacção com o espectro da luz solar [4].

A física nas apostas desportivas

por Ricardo Varela*, aluno do 5º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

As previsões têm um papel fundamental em inúmeras áreas da sociedade, desde a Ciência ao Desporto. Será que conseguimos prever resultados de jogos da NBA (basquetebol norte-americano) a partir da modelação das suas características?

Um jogo da NBA, assim como o lançamento de uma moeda, é considerado um processo estocástico, isto é, um processo considerado aleatório. Antes do lançamento de uma moeda sabemos que existe uma probabilidade de 50%/50% de sair cada uma das faces. Contudo, um estudo dinâmico do movimento da moeda no ar permitiria definir novas probabilidades para o resultado do lançamento, podendo-se determinar uma maior probabilidade para uma das faces. Pode-se dizer que, para qualquer sistema estocástico, um maior conhecimento e controlo de todas as variáveis, das quais o sistema depende, permite atenuar a sua característica aleatória e assim melhorar a capacidade de previsão do seu resultado.

A Cadeia de Markov consiste num conjunto de estados, que correspondem aos estados (e.g. cara/coroa) possíveis do sistema (e.g. moeda), e das respectivas transições, que representam os processos (e.g. lançamentos da moeda) que permitem a passagem entre estados e são definidas por probabilidades (e.g. 50%: sair cara, 50%: sair coroa). Da mesma forma que o resultado do lançamento de uma moeda não depende de lançamentos passados, as probabilidades não dependem de estados anteriores do sistema.

No caso da NBA as probabilidades são obtidas a partir das estatísticas reais de cada equipa, sabendo que a soma das probabilidades de transição de saída de um estado tem de ser igual a 100%. Se considerarmos o estado principal do jogo, que corresponde a uma das equipa ter a posse de bola, verificamos que o mesmo tem quatro transições de saída possíveis: tentativas de 2 e 3 pontos, falta sofrida e perda de bola. Assim, as probabilidades de cada uma são obtidas pelo número de vezes que essa situação sucede à equipa, por jogo, a dividir pelo número total de todas essas situações. Propagando este raciocínio podem-se definir as probabilidades de todas as transições definidas. Estes valores diferem de equipa para equipa.

Determinados todos os elementos da cadeia podemos utilizar um programa informático simples capaz de a simular. A ideia principal é criar um ciclo que está constantemente a alterar o estado do sistema, tendo sempre em conta as probabilidades definidas. Cada passagem de estado corresponde aos processos que originam as jogadas de cada equipa e, como tal, um ciclo é análogo a um jogo real e terá por isso um vencedor e um derrotado. Assim, podemos repetir o ciclo as vezes que quisermos, retirando sempre a equipa vencedora da simulação, sendo que quanto maior o número de repetições mais a estatística obtida se aproximará da probabilidade real - Lei dos Grandes Números.

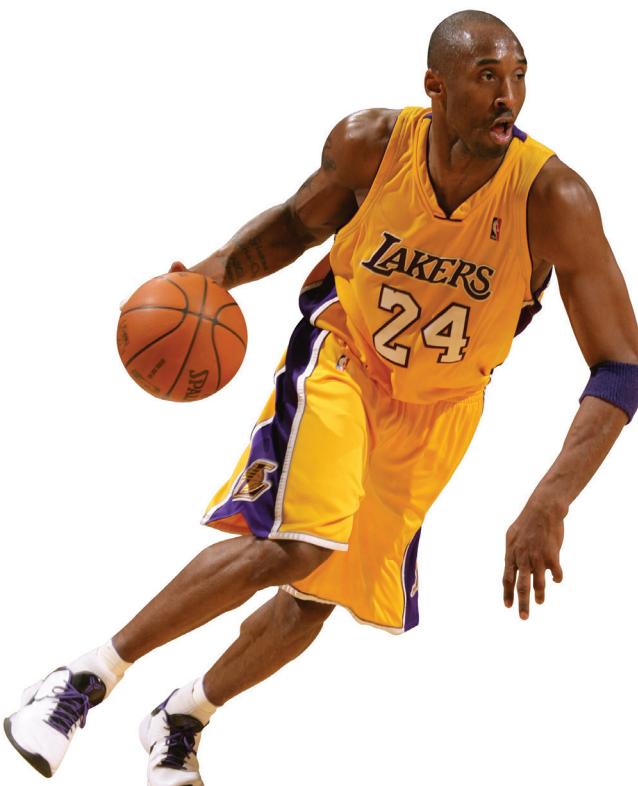
Este tipo de modelos tem grande utilidade para as próprias equipas que os podem utilizar para definir estratégias que maximizem as suas probabilidades de vitória. Mas não acaba aqui! Também nós podemos tirar proveito do programa para maximizar as nossas probabilidades de... ganhar dinheiro. As casas de apostas (tal como nós) dependem sobretudo da capacidade de prever com precisão resultados para obterem lucro, uma vez que o valor que ganhamos caso acertemos na aposta depende da probabilidade que a casa de apostas prevê para o resultado (quanto maior a probabilidade menor será esse valor). Assim, estes modelos desafiam os usados por essas casas e assim o grande vencedor será quem conseguir criar o modelo que melhor preveja o resultado de cada jogo.

Estás à altura do desafio? ■

Referências

- [1] Basketball-Reference, <http://www.basketballreference.com>
- [2] Rui Machado, *A Matemática pelo Basquetebol* (2007)
- [3] Ravi R. Mazumdar, *Chapter 4: Markov Chains*, (2013)

*Resumo de projecto da disciplina de Introdução à Investigação. MEFT/IST



Cadeia de Markov para um jogo de Basquetebol

A cadeia permite representar os processos bases que constituem uma jogada real, sendo os mais importantes os lançamentos de 2 e 3 pontos, os lançamentos livres e as perdas da posse de bola. Neste caso, de forma a simplificar o esquema, demonstra-se apenas o conjunto de estados para a equipa A, sendo equivalente para a equipa B.



Ressalto Defensivo

Lançamento de 2 pontos falhado

A falha dá origem a um ressalto que dita assim que equipa ficará na posse da bola.

Ressalto
Ofensivo

Lançamento de 2 pontos

A tentativa de lançamento que pode ter sucesso, pelo que a equipa marca 2 pontos e a equipa B adquire a posse de bola, ou em insucesso.

+2

Posse de bola da equipa B



+3

Lançamento de 3 pontos

Define uma tentativa de 3 pontos, que, tal como uma tentativa de 2 pontos, pode terminar em sucesso ou insucesso.

Posse de bola da equipa A

Estado principal do qual é criada a jogada da equipa, podendo dar origem a tentativas de 2 ou 3 pontos, uma perda de bola ou falta sofrida pela equipa.

Lançamento de 3 pontos falhado

A falha dá origem a um ressalto que dita assim que equipa ficará na posse da bola.

Ressalto
Ofensivo

Falta Sofrida

Tal como para os lançamentos de 2 e 3 pontos, pode dar origem a lançamentos livres com sucesso ou insucesso.

+1

1º Lançamento livre bem sucedido

1º Lançamento livre falhado

2º Lançamento livre bem sucedido

2º Lançamento livre falhado

+1

Ressalto Defensivo

Ressalto Defensivo

Com esta cadeia podemos simular um jogo entre duas equipas repetidamente, neste caso 10000 vezes. Daqui temos informação de quantos jogos simulados ganhou cada equipa e assim retirar uma probabilidade de vitória. Utilizando este modelo como base, foram simulados 66 jogos da temporada de 2014/2015 da NBA e a percentagem de acerto foi de 77.3%.

Plasma e grafeno

por Inês Figueiredo, aluna do 3º ano do Mestrado Integrado em Eng. Física Tecnológica, IST

O Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear (IPFN) é um dos centros de investigação associados ao Instituto Superior Técnico. É neste centro que Elena Tatarova dirige um projecto de investigação sobre criação de grafeno com o auxílio de plasmas. A Pulsar esteve no laboratório a conhecer quais os processos de criação de grafeno que estão a ser desenvolvidos.

O carbono assume várias formas estruturais (cris-talinas) como o diamante, a grafite, os nanotubos e o grafeno, entre outros. Em específico, o grafeno é constituído por uma folha de átomos de carbono numa estrutura hexagonal (Figura 1). Comparado com os outros compostos de carbono, o grafeno de alta qualidade é bastante rígido enquanto material sólido [possui um módulo de Young de aproximadamente 1, é o mais forte alguma vez estudado!], é um excelente condutor de calor e electricidade para além do facto de ser quase transparente (97% de transparência). Estas características fazem dele um material muito interessante de se estudar, tendo aplicações nas mais diversas áreas.

Devemos ainda notar que estas propriedades dependem bastante do método do grafeno produzido, incluindo os seus defeitos, a estrutura das bordas, "ripples", se está ou não dopado e do número de camadas que o formam. Como tal, é necessário estudar diferentes métodos de criação de grafeno para que este possa ter a forma desejada.

Tradicionalmente o grafeno começou por ser produzido raspando as camadas da grafite que ocorre naturalmente ou da grafite produzida por deposição de átomos de carbono num substrato cristalino. Actualmente, estes ainda são os métodos mais utilizados, se bem que consideravelmente mais refinados. No entanto, a equipa do IPFN está a criar folhas de grafeno em suspensão!

Este novo método está intrinsecamente relacionado com as características do meio onde é produzido: o plasma. O plasma é o quarto estado da matéria, um gás de partículas ionizadas. É um meio repleto de partículas activas, radiação altamente energética e campos eléctricos, que podem influenciar grandemente a forma como o grafeno é criado. Com a utilização de plasma deixa de ser necessário

um substrato e um catalizador químico. Assim, adquire-se bastante controlo sobre os fluxos de material, a temperatura e eventualmente a estrutura e propriedades do grafeno.

Até agora a equipa do IPFN tem tido bastante sucesso na criação de grafeno em suspensão, tendo mesmo sido capaz de criar grafeno com apenas uma camada atómica, ou seja, um verdadeiro cristal a 2D. A investigação continuará, abrindo novas fronteiras da ciência e refinando este método de produção de grafeno. ■

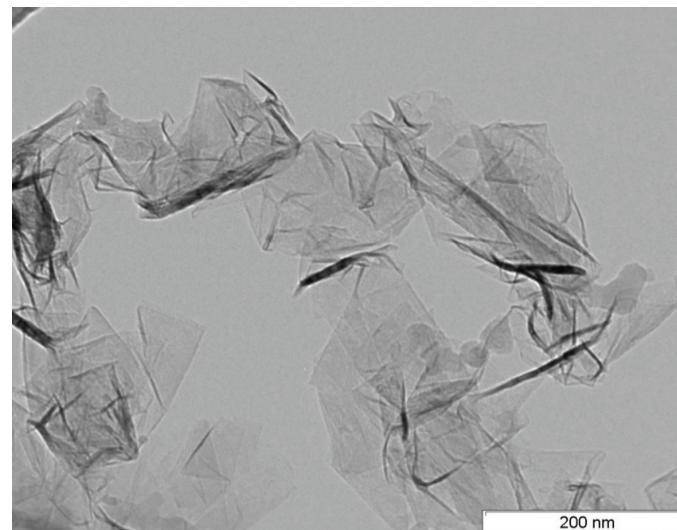


Figura 1: Flocos de grafeno produzidos. Estes flocos, quando só possuem uma camada, são quase transparentes e apenas são observáveis devido aos seus limites, que se dobram sobre si próprios criando mais contraste. As zonas mais escuras representam locais onde várias camadas de grafeno se encontram sobrepostas.

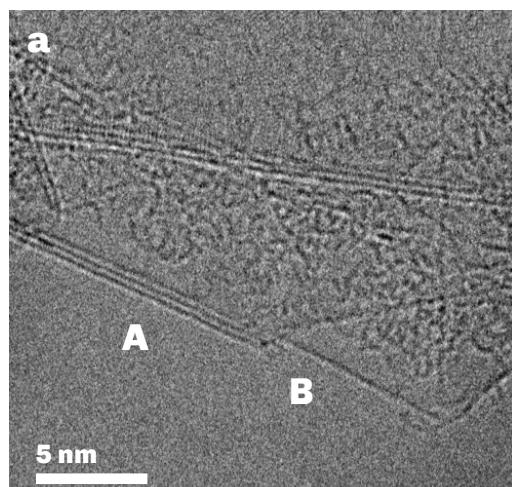


Figura 2a: Imagem HRTEM (High-resolution transmission electron microscopy) dos mesmos flocos, agora com ênfase nas bordas dos mesmos. Podemos observar flocos com distintos números de camadas atómicas, em particular em A com 3 camadas e em B com apenas uma camada.

Figura 2b: Imagem SAED (Selected area electron diffraction) onde podemos observar os átomos de carbono do grafeno na sua estrutura hexagonal. O ponto central é uma consequência do método de obtenção da imagem.

Agenda Científica



Noite Europeia dos Investigadores

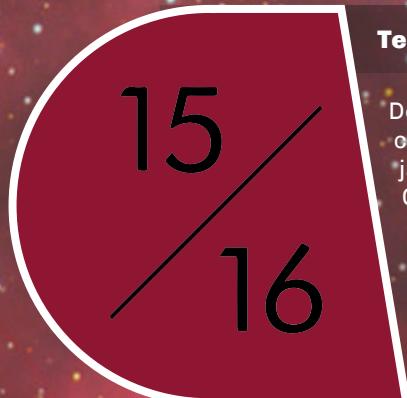
A Noite Europeia dos Investigadores, que este ano é celebrada a 25 de Setembro em Lisboa e Coimbra, é uma iniciativa promovida pela Comissão Europeia. Em Lisboa, existirão actividades de divulgação de ciência entre o Museu Nacional de História Natural e de Ciência e o Jardim do Príncipe Real. Em Coimbra, as celebrações deverão ser lideradas pela Universidade de Coimbra. Mantenham-se atentos ao programa a ser divulgado!



Há Ciência em Lisboa!

O ciclo de workshops "Há Ciência em Lisboa!" dirige-se a miúdos e graúdos que queiram descobrir o que se faz de ciência em Lisboa. De Maio a Setembro, os workshops decorrem ao sábado em centros de investigação, laboratórios nacionais e espaços públicos, sob a organização do Museu Nacional e História Natural e Ciência da ULisboa e a CMLisboa, no âmbito da Noite Europeia dos Investigadores.

Agenda Cultural



Temporada Gulbenkian da Música 2015/2016

De Agosto de 2015 a Junho de 2016, a Temporada Gulbenkian de Música 2015/2016 é um ciclo de concertos com rico programa musical, do jazz à música clássica e contemporânea. Organizada pela Fundação Calouste Gulbenkian, a Temporada Gulbenkian da Música é um evento anual que pretende chegar a um público cada vez maior.

[Através de um protocolo vinculado com o Instituto Superior Técnico, muitos destes concertos são oferecidos gratuitamente aos alunos desta instituição.]

Encontro Nacional de Estudantes de Física (ENEF) 2015

Aproximar os estudantes de hoje, físicos de amanhã

Desde 1999, estudantes de física e engenharia física de todo o país reúnem-se anualmente numa universidade diferente para celebrar a física. Desta feita, foi a vez de Lisboa e do IST, tendo o NFIST organizado o ENEF 2015, entre 19 e 22 de Fevereiro.

O programa revelava-se aliciante, estruturado em torno de um leque de actividades onde não faltou uma excursão nocturna ao Planetário Calouste Gulbenkian, em Belém. A série de palestras abrangeu um vasto leque de oradores. A professora Constança Providência expôs as bases da investigação em estrelas de neutrões (ou pulsares). O professor Filipe Joaquim revelou o mecanismo que confere massa às partículas, enquanto o professor Eduardo Castro partilhou a história do grafeno. Simultaneamente, a HackerSchool promoveu workshops em programação orientada a objectos (POO) e arduínos.

Não menos interessantes e diversificadas foram as palestras de Domingo, em torno do papel dos físicos no mercado de trabalho. No dia anterior, tivera lugar um concurso de palestras entre os estudantes. O professor Vítor Cardoso também marcou presença, desvendando a física de buracos negros de Interstellar. O programa contemplou ainda visitas ao ISTTOK e ao reactor nuclear de Sacavém.

Todavia, não menos importantes foram os momentos de descontração colectiva, desde as refeições em comum às noites de convívio na capital, passando pelas visitas turísticas na cidade. Este é o espírito do ENEF: criar laços entre os estudantes do presente, físicos e engenheiros físicos do futuro, na perspectiva de mais tarde virem a contribuir para uma comunidade científica pautada pela comunicação e cooperação, rumo a um desenvolvimento sustentado da física em Portugal.

Lisboa presenciou este espírito. O ENEF foi considerado um sucesso, em mais uma edição do certame que continuará, ano após ano, a juntar jovens que partilham a paixão pela física.



enef15



**TÉCNICO
LISBOA**

Fotografia: Reactor nuclear de Sacavém, Campus Tecnológico e Nuclear, IST (Fonte: IST)