

# call for papers 2010

A Gazeta de Física convida os seus leitores a submeterem propostas (abstracts) de artigos nos seguintes temas:

Física aplicada à biologia e medicina  
até 18 de Junho

Lasers e aplicações: em comemoração do 50º aniversário da invenção do laser  
até 17 de Setembro

História e protagonistas da física em Portugal no séc. XX  
até 17 de Dezembro

A Gazeta de Física publica artigos, com índole de divulgação, considerados de interesse para estudantes, professores e investigadores em Física. Os artigos podem ter índole teórica, experimental ou aplicada, visando promover o interesse dos jovens pelo estudo da Física, o intercâmbio de ideias e experiências profissionais entre os que ensinam, investigam ou aplicam a Física.

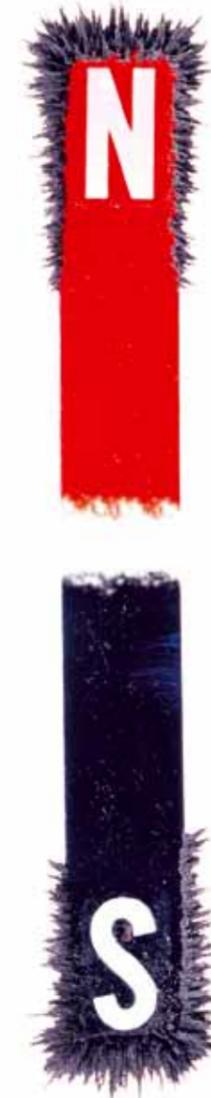
Mais informações em [www.gazetadefisica.spf.pt](http://www.gazetadefisica.spf.pt)

GAZETA DE  
física

Para os físicos e amigos da física.

[WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT](http://WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT)

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA / VOL. 33 - Nº 1 / 2010 / Publicação Trimestral / €5,00



**Das equações de Maxwell**  
aos monopolos magnéticos

**Aceleradores laser-plasma**  
aos ombros de Einstein

**A física vai** ao museu



artigo geral

2 **Aceleradores laser-plasma**  
aos ombros de **Einstein**

Samuel Martins  
Ricardo Fonseca  
Luís Silva

artigo geral

5 **Das equações de Maxwell**  
aos monopolos magnéticos

Filipe Moura

física sem fronteiras

7 **A Física vai ao Museu**

Maria Luísa de Carvalho, Sofia Pessanha, Marta Manso,  
Ana Guilherme, Milene Gil, José Pires Marques, Maria Isabel  
Cabaço, Susana Caldeira, Alexandra Marques, Ana Isabel Seruya

física e a sociedade

12 **Copérnico ou Galileu:**  
um problema mal colocado

Ana Simões

crónica: pensamentos quânticos

16 **A crise, a física e o Ronaldo**

Jim Al-Khalili

crónica: física divertida

17 **As descobertas da década**

Carlos Fiolhais

18 **Notícias**

Pedro Abreu, Vítor Amaral, Ana Eiró,  
Gonçalo Figueira, Mario Gonçalves Pereira

vamos experimentar

**Qual resiste mais?**

Constança Providência  
Camille Ducoin

sala de professores

23 **Efeito de Aharonov-Bohm**

Augusto Barroso

sala de professores

25 **O recorde para o lançamento do peso**  
não é batido há vinte anos.  
**Estará isso relacionado com a Física?**

Duarte Ferreira dos Santos  
Henrique Herculano de Carvalho  
João Afonso

sala de professores

30 **Planetário portátil**

Augusto Barroso

estórias e histórias

31 **Uma vida entre** prismas

Gonçalo Figueira

livros

35 **A física do quotidiano**  
do simples ao complexo

Pedro Patrício

36 **Um livro de perplexidades**  
e não de certezas

Emílio Ribeiro

Publicação Trimestral Subsidiada



FUNDAÇÃO  
CALOUSTE  
GULBENKIAN

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

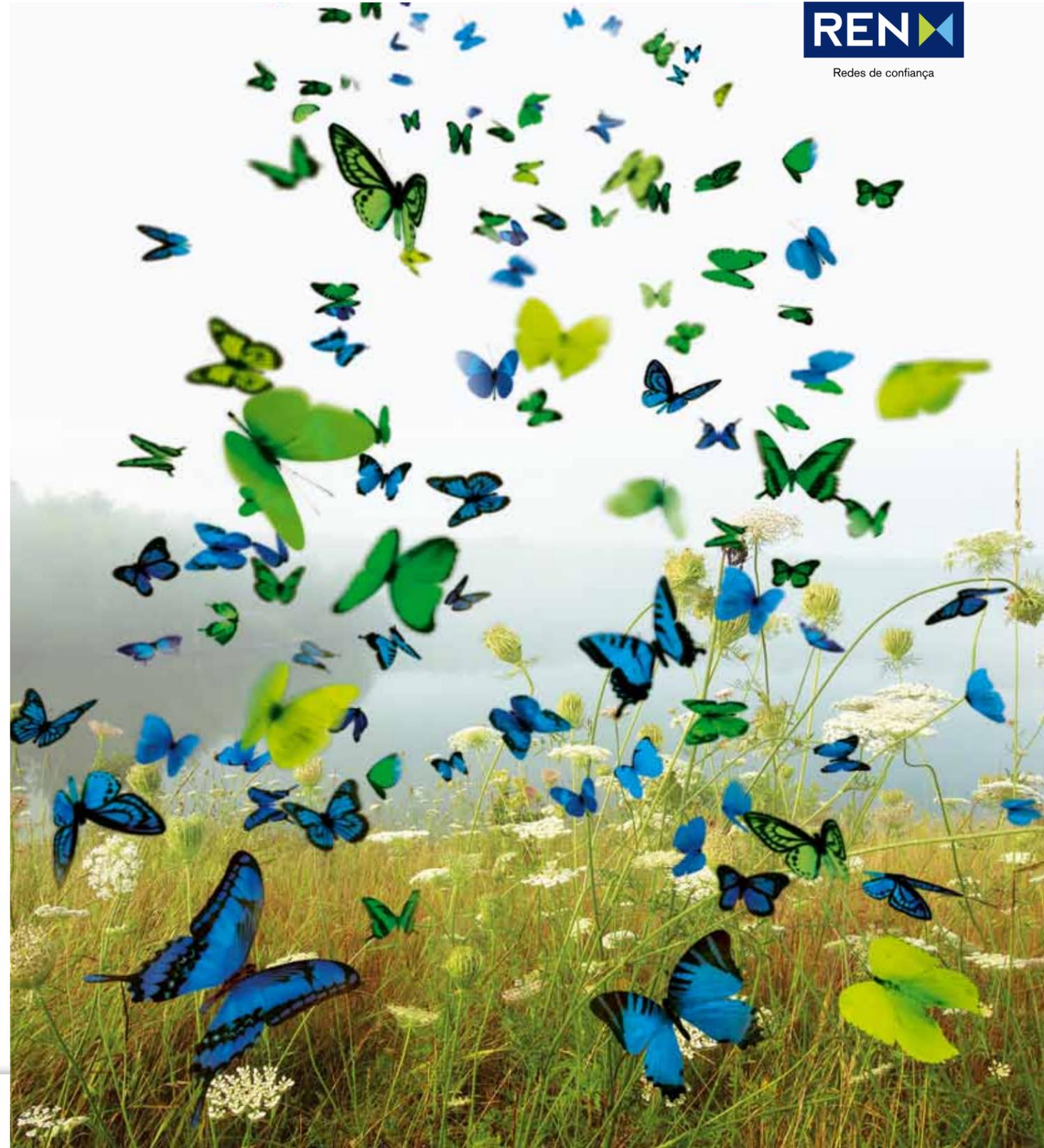


## A energia do país passa por nós.

Fazer chegar a energia onde ela é necessária é uma das nossas missões. Sempre com consciência e preocupação a nível social e ambiental e com altos critérios de qualidade e segurança. Por isso, a REN – Redes Energéticas Nacionais – assegura um canal de transporte eficaz de toda a energia do país, seja ela de muito alta tensão ou de alta pressão tendo em conta os elevados padrões de exigência do mercado. Porque é no futuro de todos nós que dedicamos toda a nossa energia – Electricidade ou Gás - onde é preciso. Em todo o país.



Redes de confiança



# Editorial

“Podemos imaginarmo-nos suficientemente pequenos para entrar num formigueiro (...). E podemos, igualmente, imaginar-nos suficientemente grandes para olhar de fora o sistema solar. Mas não (...) suficientemente pequenos para entrar num átomo e menos ainda no seu núcleo, nem suficientemente grandes para termos uma dimensão próxima da do Universo”. Estas palavras são de António Brotas, no livro “Relatividade e Física Clássica”, acabado de publicar pela IST Press. A revisão deste livro, feita por Emílio Ribeiro, físico e seu ex-aluno, pode ler-se nesta Gazeta.

No Instituto Superior Técnico, António Brotas marcou gerações, em cursos de Electromagnetismo e Termodinâmica. Há três décadas atrás, foi também ele quem me ensinou Relatividade, me apresentou ao cálculo tensorial e me fez maravilhar perante a formulação covariante do electromagnetismo e a curvatura do espaço-tempo. Nada mau para quem, no século XXI, gostosa e frequentemente dá publicamente como melhor definição de si próprio: “António Brotas, engenheiro do século XIX e físico dos anos 30”. Alguém que tem a sabedoria de viajar no tempo todos os dias. E que cita Santo Agostinho: “Se nada sobrevivesse, não haveria tempo futuro”. Numa vívida versão do pensamento matemático de Gödel, adaptado para físicos, sobre os limites do conhecimento auto-referencial, escreve Brotas: “A nossa capacidade de pensar está ligada à existência do nosso hardware biológico que tem cerca de 1,3 dm<sup>3</sup>.” E salienta que não somos apenas um ponto, desenterrando a memorável definição de José Anastácio da Cunha: um ponto é um corpo cuja dimensão é tal que “de não se atender a ela não resulta erro notável”. A operacionalidade da noção física, concreta, sobrepõe-se à universalidade do conceito matemático, abstracto. Brotas delicia-se e delicia-nos com este contraponto.

Mas a nossa extensão de seres humanos é também temporal. Por isso dedica o livro a figuras desaparecidas. A primeira é Conceição Bento, sua ex-aluna e ex-colega, prematura e inesperadamente desaparecida há um ano. “Em recordação da professora Conceição Bento, de uma geração que actualizou

a física portuguesa”, lê-se na dedicatória. Agradeço ao professor Brotas este reconhecimento – a uma geração inteira que é a minha! Em homenagem à Conceição Bento, devemos interiorizar a dedicatória como incentivo. E contrariar o pesadelo existencial do solipsismo de Jorge Luís Borges: “Antes de mim não existia tempo. Depois de mim não haverá mais tempo. Comigo nasceu o tempo, comigo vai morrer”. Mesmo que, à grande escala do universo e à luz da física, Borges tenha razão. Como explica Brotas, “o big-bang não deve ser entendido como o momento do aparecimento do Universo num tempo (e num espaço) pré-existent, mas sim como o momento do aparecimento simultâneo do Universo, do espaço e do tempo.” Os pontos devidamente nos ii. Como António Brotas sabe fazer. Regozijo, por comparação com as palestras usuais para o grande público. Físicos, mesmo reputados, induzem plateias a visualizar o crescimento do espaço (3D) como um balão a encher. Sem alertarem que a analogia é com o crescimento da superfície (2D) desse balão. É que a verdadeira visualização da dilatação do universo exige uma imagem 4D e ninguém consegue ver a 4D... sem ou com óculos! É a tal limitação biológica ao conhecimento físico, de que fala Brotas. Mas se, por um lado, estamos limitados “pela capacidade da espécie humana para descobrir o que há para descobrir”, por outro, o engenho humano contraria a biologia através da tecnologia. E conseguiu mesmo, indirecta ou virtualmente, entrar dentro dos átomos, e chegar ao pó das galáxias. Há dois grandes exemplos disto nesta número da Gazeta: a possibilidade de detectar monopolos magnéticos, isto é, de ao partir um íman não obter dois ímans, e a entrada em funcionamento do LHC, para encerrar ou abrir paradigmas de explicação do universo. Muito do conhecimento do mundo físico tenderá a ser mais virtual, expresso por simulações. É também uma das conclusões do artigo sobre aceleradores laser-plasma. A própria humanidade está a redefinir-se em termos de estruturas, redes e imagens virtuais. A fronteira entre o real e o virtual esbate-se. Não será porque também é assim que o nosso cérebro funciona (o hardware humano de que fala António Brotas)? E se o leitor quiser uma review curta mas completa das conquistas da última década, ainda há pouco tempo mera ficção científica, aconselho-o a não perder a crónica de Carlos Fiolhais.

Teresa Peña

## Ficha Técnica

### Propriedade

Sociedade Portuguesa de Física  
Av. da República, 45 – 3º Esq.  
1050-187 Lisboa  
Telefone: 217 993 665

### Equipa

Teresa Peña (Directora Editorial)  
Gonçalo Figueira (Director Editorial Adjunto)  
Carlos Herdeiro (Editor)  
Filipe Moura (Editor)  
Tânia Rocha (Assistente Editorial)  
Adelino Paiva (Assistente Editorial)  
Ana Sampaio (Tradutora)

### Secretariado

Maria José Couceiro  
mjose@spf.pt

### Colunistas e Colaboradores regulares

Jim Al-Khalili, Carlos Fiolhais, Constança Providência  
Ana Simões

### Colaboraram também neste número

Alexandra Marques, Ana Eiró, Ana Guilherme, Ana Isabel Seruya  
Ana Simões, Augusto Barroso, Camille Ducoin, Duarte Ferreira dos Santos, Emílio Ribeiro, Henrique Herculano de Carvalho, João Afonso, José Pires Marques, Luís Silva, Maria Isabel Cabaço, Maria Luísa de Carvalho, Mario Gonçalves Pereira, Marta Manso Milene Gil, Pedro Abreu, Pedro Patrício, Ricardo Fonseca  
Samuel Martins, Sofia Pessanha, Susana Caldeira, Vítor Amaral

### Design / Produção Gráfica

Dossier, Comunicação e Imagem  
www.dossier.com.pt

NIPC 501094628

Registo ICS 110856

ISSN 0396-3561

Depósito Legal 51419/91

Tiragem 1.800 Ex.

Publicação Trimestral Subsidiada

As opiniões dos autores não representam necessariamente posições da SPF.

Preço N.º Avulso €5,00 (inclui I.V.A.)

Assinatura Anual €15,00 (inclui I.V.A.)

Assinaturas Grátis aos Sócios da SPF.

# Aceleradores laser-plasma

## aos ombros de Einstein

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

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

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

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

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

### Aceleradores laser-plasma

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

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

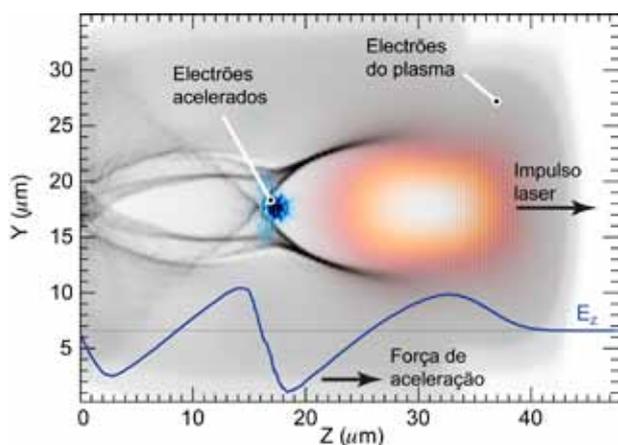


Fig. 1 - Ilustração de Acelerador Laser-Plasma. O laser (laranja) propaga-se para a direita através de um plasma de electrões (cinza). A sua força ponderomotriz afasta os electrões e cria uma onda caracterizada por fortes campos eléctricos (3 ordens de grandeza acima dos aceleradores convencionais).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

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

### Principais desafios

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

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

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

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

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

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

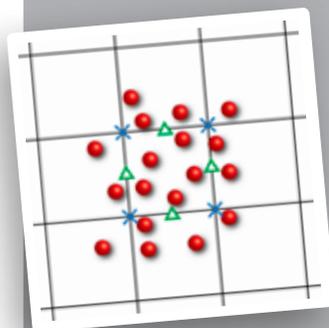


Ilustração da representação de um sistema de partículas num código *particle-in-cell*. As super-partículas (vermelho) correspondem a alguns milhares de partículas reais e interagem entre si através de campos eléctricos e campos magnéticos numa grelha (símbolos azuis e verdes, ilustrativos).

## O referencial *boosted* para acelerar as simulações

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

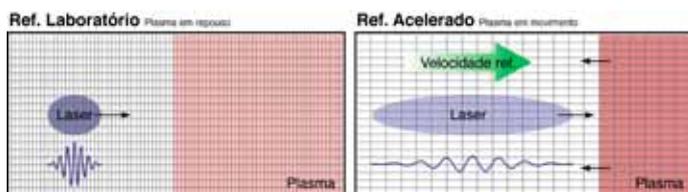


Fig. 2 - Ilustração da grelha numérica numa simulação de um acelerador laser-plasma. No referencial acelerado o plasma é mais curto, mais denso e propaga-se relativisticamente para a esquerda, enquanto que o laser é mais longo e menos intenso. Esta transformação permite utilizar células maiores na grelha,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

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

## O futuro dos aceleradores laser-plasma

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

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



### Samuel de Freitas Martins

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



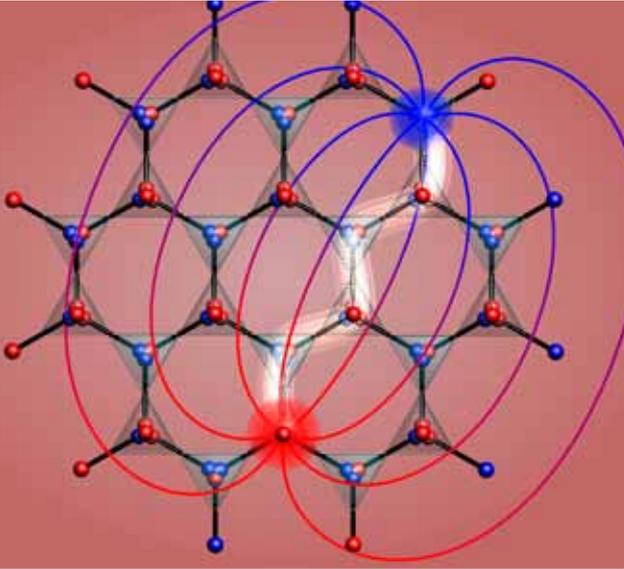
### Ricardo Fonseca

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



### Luís Oliveira e Silva

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



Na segunda metade do século XIX, o grande físico teórico escocês James Clerk Maxwell foi um precursor das teorias de unificação, tendo reunido a electricidade e o magnetismo, que se baseavam em leis empíricas, num conjunto de quatro equações diferenciais locais, obedecidas pelos campos eléctricos e magnéticos em cada ponto do espaço e instante de tempo: as equações de Maxwell.

Estas equações são expressas em termos dos operadores diferenciais divergência ( $\vec{\nabla} \cdot$ ), que quando aplicado a um vector traduz o seu fluxo elementar num ponto, e rotacional ( $\vec{\nabla} \times$ ), que traduz a circulação desse vector ao longo desse ponto. Dividem-se em dois grupos: as equações homogéneas (que admitem campos nulos como solução), e as não homogéneas (que incluem termos “fonte”, a densidade de carga eléctrica  $\rho$  e a densidade de corrente eléctrica  $\vec{j}$ ). No segundo grupo encontramos

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (1)$$

e

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

A equação (1) exprime a lei de Gauss do campo electrostático – o fluxo eléctrico total através de qualquer superfície fechada é proporcional à carga eléctrica total contida no interior dessa superfície – que, para o caso de uma carga pontual, se reduz à conhecida lei de Coulomb. A equação (2) exprime a lei de Ampère: a circulação do campo magnético em torno de um fio condutor é igual à corrente que percorre esse fio. O último termo desta equação,

a corrente de deslocamento, foi introduzido pelo próprio Maxwell para haver consistência com a equação da continuidade,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{j} \quad (3)$$

que traduz a conservação da carga eléctrica. As equações de Maxwell homogéneas são

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

e

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5)$$

A equação (4) exprime a lei de Gauss magnética: o fluxo magnético total através de qualquer superfície fechada é nulo. Como tal fluxo seria, por analogia com o caso eléctrico, proporcional à carga magnética total contida no interior dessa superfície, daqui se conclui que as “cargas magnéticas” não existem. A equação (5), por sua vez, exprime a lei de indução de Faraday: um fluxo magnético variável no tempo induz uma força electromotriz.

A diferença entre os campos eléctrico e magnético reside nas chamadas relações constitutivas entre os vectores  $\vec{D}$  e  $\vec{E}$ , por um lado, e os vectores  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$ , por outro. Enquanto a relação entre o deslocamento eléctrico  $\vec{D}$  e o campo eléctrico  $\vec{E}$  é linear e homogénea, dada por

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6),$$

a relação entre a indução magnética  $\vec{B}$  e o campo magnético  $\vec{H}$  é não homogénea (isto é,  $\vec{B}$  pode ser não nulo mesmo que  $\vec{H}$  se anule), e dada por

$$\vec{B} = \mu \vec{H} + \vec{M}_p \quad (7).$$

As constantes  $\epsilon$  e  $\mu$ , características do meio, são respectivamente a permissividade eléctrica e a permeabilidade magnética, sendo a velocidade da luz dada por  $(\sqrt{\epsilon\mu})^{-1}$ . O vector  $\vec{M}_p$  é a chamada magnetização permanente; anula-se no vácuo e na maior parte dos materiais, mas é não nulo para materiais ferromagnéticos como os ímanes.

É de notar que as equações de Maxwell homogéneas são justamente aquelas onde surge o vector não homogéneo  $\vec{B}$ . Estas equações podem ser reescritas de uma forma não homogénea se redefinirmos  $\vec{B}$ . Com efeito, substituindo (7) em (4) e (5), obtém-se respectivamente

$$\vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{H}) = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}_p \quad (8)$$

e

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial(\mu \vec{H})}{\partial t} - \frac{\partial \vec{M}_p}{\partial t} \quad (9)$$

Definindo uma a indução magnética homogénea  $\vec{B}_h = \mu \vec{H}$ , de modo a ter-se (para materiais ferromagnéticos)

$\vec{B} = \vec{B}_h + \vec{M}_p$ , e ainda as densidades de “carga magnética” e “corrente magnética”, dadas respectivamente por  $\rho_m = -\vec{\nabla} \cdot \vec{M}_p$  e  $\vec{J}_m = -\partial(\mu \vec{M}_p) / \partial t$ , as equações de Maxwell homogéneas (4) e (5) (mais precisamente, (8) e (9)) podem ser escritas numa forma não homogénea, em tudo análoga a (1) e (2):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}_h = \rho_m, \quad (10)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \vec{J}_m - \frac{\partial \vec{B}_h}{\partial t} \quad (11)$$

Estas “cargas magnéticas” também obedecem à equação da continuidade. Com efeito, de (8) e (10),

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \cdot (\mu \vec{H}) = \frac{\partial}{\partial t} \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_h = -\vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\partial(\mu \vec{M}_p)}{\partial t} \right),$$

ou seja,

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{J}_m,$$

isto é, a “carga magnética” também é conservada. É essencial salientar que todos os resultados que temos vindo a apresentar são aplicáveis partindo do pressuposto de que a magnetização permanente  $\vec{M}_p$  é não nula – as cargas e correntes magnéticas dependem deste vector. Para meios não magnetizados, em particular para o vácuo, a magnetização permanente é nula e não faz sentido falar de cargas magnéticas. Os materiais magnéticos aparecem assim sempre na forma (macroscópica) de dipolos: um pólo norte e um pólo sul, que nunca aparecem separadamente. Agora no interior destes materiais, um meio com  $\vec{M}_p$  não nula, poder-se-á falar de cargas magnéticas isoladas? No passado mês de Outubro, um grupo de cientistas do University College de Londres (UCL), liderado por Steve Bramwell, anunciou ter detectado perturbações magnéticas dentro de um material que se comportam como se fossem autênticas partículas. Estas cargas foram detectadas num material, o titanato de disprósio ( $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ ), que tem a propriedade de ser um gelo de spin, isto é, a temperaturas próximas do zero absoluto cristaliza em estruturas tetraédricas semelhantes às dos iões de hidrogénio num cristal de gelo. A interacção entre os spins neste material é ferromagnética, ou seja, a energia é minimizada para uma configuração de spins paralelos. Tal configuração não é possível

com a referida estrutura tetraédrica (diz-se por isso que o gelo de spin é um ferromagneto frustrado): o melhor que se consegue (minimizando a energia) é ter, em cada tetraedro, dois spins a apontarem para dentro e outros dois a apontarem para fora. (Esta configuração é degenerada, pelo que mesmo no zero absoluto a entropia não se anula.) O momento magnético resultante é não nulo, pelo que este é um meio com magnetização permanente.

Através de um feixe de neutrões foi possível inverter a orientação do spin de um vértice do tetraedro, de modo a que três vértices apontassem para dentro e um para fora. Este tetraedro actua como um monopolo magnético [1]. Como cada tetraedro partilha os vértices com os tetraedros adjacentes, inverter o spin de um vértice cria um monopolo de polaridade oposta no tetraedro seguinte. Estes monopolos, na presença de um campo magnético, actuam da mesma forma que cargas eléctricas na presença de um campo eléctrico [2].

A descoberta destes monopolos pode ter aplicações tecnológicas interessantes: com efeito, a maior parte das memórias dos computadores armazenam a informação magneticamente. A eventual utilização de cargas magnéticas (em vez das eléctricas) para ler e escrever bits e formar estas memórias pode ser vantajosa em velocidade e flexibilidade. Mas, por enquanto, trata-se apenas de uma possibilidade. Estes monopolos têm lugar perfeitamente numa

teoria electromagnética macroscópica, através das equações de Maxwell para um material magnético, e só num material deste tipo podem existir, sendo descritos pelo vector  $\vec{M}_p$ . Dada a sua natureza de excitações colectivas (“quase-partículas”) de um sistema magnético, estes monopolos não são, portanto, partículas elementares. Concluindo, esta descoberta, não deixando de ser notável, não é verdadeiramente revolucionária, pois não põe minimamente em causa a teoria electromagnética em vigor.



### Filipe Moura

é licenciado em Engenharia Física Tecnológica pelo Instituto Superior Técnico (1997) e doutorou-se em Física no Instituto C.N. Yang de Física Teórica da Universidade do Estado de Nova Iorque em Stony Brook, EUA (2003). Foi colaborador

da secção de Ciência do jornal “Público” e é editor da “Gazeta de Física”. É investigador auxiliar no Centro de Matemática da Universidade do Minho. Trabalha em supergravidade, teorias de supercordas e buracos negros.

1. C. Castelnovo, R. Moessner e S. L. Sondhi, “Magnetic monopoles in spin ice”, Nature 451, 42-45 (3 Janeiro 2008)
2. S. T. Bramwell, S. R. Giblin, S. Calder, R. Aldus, D. Prabhakaran e T. Fennell, “Measurement of the charge and current of magnetic monopoles in spin ice”, Nature 461, 956-959 (15 Outubro 2009)

# A Física vai ao Museu

Maria Luisa de Carvalho, Sofia Pessanha, Marta Manso,  
Ana Guilherme, Milene Gil, José Pires Marques, Maria Isabel  
Cabaço, Susana Caldeira, Alexandra Marques, Ana Isabel Seruya

Centro de Física Atómica da Universidade de Lisboa, Av. Prof. Gama Pinto 2, 1649-003 Lisboa

Vamos descrever neste trabalho algumas das intervenções do Grupo Experimental do Centro de Física Atómica da Universidade de Lisboa na área da Arte e Herança Cultural.

## Introdução

Conhecer a natureza dos objectos é o primeiro passo para reconstituir a sua história. Uma parte da história dos objectos e do modo de vida das populações está contida nos materiais à escala atómica e é esta informação que a Física vai procurar. Nos últimos anos desenvolveram-se equipamentos portáteis que permitem análise elementar *in situ* de objectos que de outra forma não seriam estudados. É possível deslocar os equipamentos aos locais de interesse, museus, escavações, de modo a caracterizar técnicas de fabrico de objectos antigos, identificar falsificações e restauros de obras de arte ao longo do tempo, conhecer condições ambientais e hábitos alimentares de civilizações desaparecidas, etc.

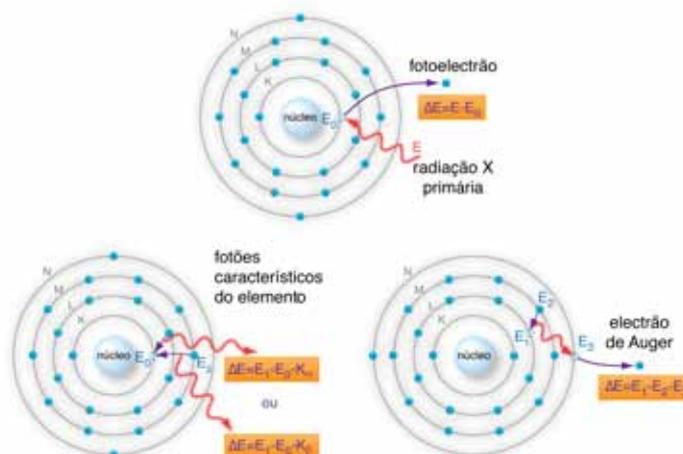
A investigação científica em Arqueometria e Herança Cultural é uma importante prática em muitas instituições dedicadas ao estudo e protecção do património cultural. A Física pode fornecer muitos dados científicos necessários para caracterizar e compreender a origem, os processos de degradação e o ambiente em que a obra foi criada ou tenha existido.

A fluorescência de raios X (XRF) é uma das técnicas mais utilizadas e é uma ferramenta perfeita para estudar a composição elementar dessas obras, porque permite a análise da peça sem necessidade de amostragem nem de causar quaisquer danos. Permite ainda estudar objectos que não podem ser deslocados do seu local original devido ao seu peso e dimensões, ou devido ao seu valor.

A fluorescência de raios X como técnica analítica tem um princípio físico muito simples [1]. Necessitamos de um feixe de radiação X primária para ionizar, num nível interno, os átomos constituintes da nossa amostra. Esses átomos, ao regressarem ao seu estado fundamental, emitem radiação correspondente

à diferença de energia dos níveis entre os quais se deu a transição. Esta energia é característica de cada elemento existente na amostra, permitindo-nos assim a sua identificação.

O átomo pode ainda regressar ao estado fundamental por uma transição não radiativa; nesse caso, a energia correspondente à transição do electrão do nível exterior para o inicialmente ionizado não é emitida, mas vai originar o arranque de um outro electrão, o electrão de Auger (Figura 1).



A intensidade da radiação emitida  $I_i$  está relacionada com a quantidade desse elemento na amostra, ou seja a sua concentração  $C_i$ , através da expressão

$$I_i = I_0 K_i A_i m C_i$$

onde  $I_0$  é a intensidade da radiação inicial,  $A_i$  o factor de absorção da radiação na amostra,  $K_i$  um factor de calibração experimental e  $m$  a massa da amostra.

O factor  $A_i$  é o parâmetro que corresponde à absorção da radiação na amostra. Depende da concentração e da massa do elemento em causa, da energia da radiação incidente, da energia da radiação emitida pelo elemento, dos ângulos que as radiações incidente e emitida fazem com a amostra,

do coeficiente de atenuação do elemento  $i$  para a energia da radiação incidente, e do coeficiente de atenuação do elemento para as energias emitidas pelos restantes elementos presentes na amostra.

O factor  $K_i$  tem em conta os parâmetros característicos da montagem experimental (ângulo sólido do detector,  $\Omega$ , a eficiência do detector para cada radiação  $\epsilon_i$ , a absorção da radiação na janela do detector e no ar e os parâmetros fundamentais característicos de cada elemento: o rendimento de fluorescência,  $\omega_i$ , a probabilidade de ionização,  $\sigma_i$ , e a probabilidade de transição,  $P$ , do nível  $n$  para o nível  $m$  do elemento  $i$ .

### Montagem experimental

No equipamento utilizado, a radiação X primária é produzida num tubo de raios X de pequenas dimensões.

Os electrões são produzidos no cátodo metálico por efeito termo-iónico, que consiste na emissão de electrões por um metal sempre que é aquecido. Este aquecimento resulta da passagem da corrente eléctrica (efeito Joule). Os electrões são acelerados em direcção ao ânodo, que está a um potencial positivo da ordem de algumas dezenas de milhares de Volts relativamente ao cátodo. Estes electrões, tal como qualquer outra carga eléctrica, perdem energia ao serem travados, emitindo radiação X.

O feixe de raios X emitido é dirigido para a amostra, cujos átomos são ionizados, e a radiação característica emitida é captada por um detector. O sistema tubo e detector está colocado numa estrutura que pode ser desmontada e que é deslocada ao local onde se vão fazer as análises (Figura 2)



[2, 3]. O sistema, que foi desenvolvido e construído por nós, dispõe ainda de dois lasers indicadores do ponto da amostra a estudar. Finalmente, software adequado permite registar e analisar o espectro emitido

pela amostra, o que nos possibilita a sua caracterização.

### Colaborando com a História e a Arqueologia.

O Período Calcolítico ou idade do Cobre é o período da história compreendido entre 5500-3000 a.C., em que pela primeira vez o Homem descobriu o metal.

A descoberta do metal deu origem ao comércio entre locais diferentes e mesmo entre civilizações remotas, que estabeleceram uma extraordinária rede de centros onde eram feitas as trocas comerciais. Até esta altura, o único material utilizado pela espécie humana era a pedra, incluindo as próprias armas, mas durante este período o aspecto mais importante reveste-se com a utilização extensiva e fabrico do cobre (armas fortes, utensílios de cozinha e ornamentações).

Uma das comunidades estudada através da fluorescência de raios X faz parte das escavações da Lapa da Furada (Se-

simbra) e foi identificada pelos arqueólogos como sendo do Período Calcolítico (Figura 3).

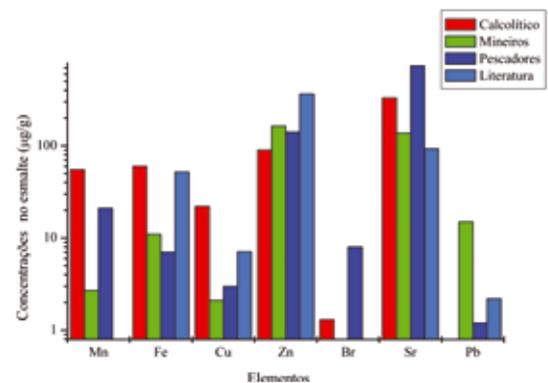
No total foram identificados 132 indivíduos: 32



homens, 34 mulheres e os restantes eram crianças. Juntamente com os restos humanos, foram encontrados muitos artefactos: utensí-

lios de pesca e de cozinha em cobre e pequenos objectos de decoração. Estes artefactos permitiram datar a primeira presença humana nesta gruta como sendo do fim do Calcolítico. Os nossos estudos referem-se a alguns dentes humanos ali encontrados e que contribuíram para confirmar a origem pré-histórica destes restos humanos.

Os resultados obtidos encontram-se resumidos na Figura 4, onde também apresentamos alguns

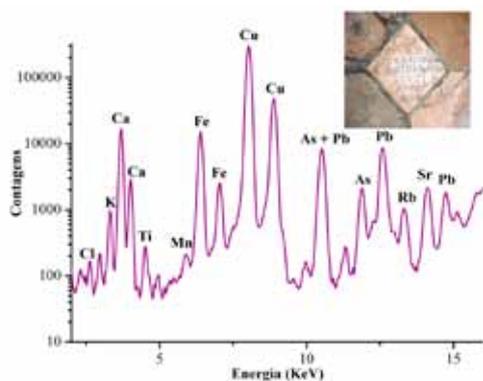


resultados de indivíduos nossos contemporâneos, nomeadamente um conjunto de dentes de mineiros e outro de pescadores, para comparação [4-6].

A análise dos resultados permitiu concluir que há elementos como o Mn e o Fe que são elementos contaminantes e que resultaram do solo em que os dentes estiveram enterrados ao longo dos anos. O Br é um elemento que está associado à presença marítima e dá-nos a informação que a população vivia próximo do mar. Tal como nos pescadores, a concentração deste elemento é elevada na população pré-histórica. O Sr é outro elemento que está relacionado com alimentação rica em peixe ou produtos marinhos. E novamente temos a confirmação de que os habitantes do Calcolítico, tal como os pescadores, se alimentaram à base de produtos do mar. Quanto ao cobre, também aqui vemos que a técnica nos dá a informação de que estes habitantes estavam contaminados com cobre, pois os elevados níveis deste elemento nos dentes são disso a prova. O chumbo encontrado, com elevada concentração nos dentes dos mineiros, resulta basicamente da poluição. Não existe chumbo nos dentes pré-históricos.

Fazemos aqui notar que a análise destes resultados

foi efectuada por uma equipa pluridisciplinar que integrou físicos, arqueólogos, geólogos e médicos. Um outro exemplo de aplicação desta técnica está relacionado com a área forense e foi mais uma contribuição para o esclarecimento das causas de morte do rei D. João VI através da análise das vísceras do rei [7]. Estes restos mortais encontravam-se enterrados numa sala do Convento de São Vicente de Fora em Lisboa, contígua à Capela do Panteão Real com os túmulos dos reis da 4ª dinastia. Os resultados obtidos revelaram uma elevada concentração de arsénio e chumbo nas vísceras do rei, o que é indício de envenenamento arsenical agudo. As elevadas concentrações de Fe e Cu são indicativas de contaminação através do solo (Figura 5). Com



efeito, o vaso, que conteve as vísceras durante mais de 170 anos, encontrava-se aberto e com alguma terra no seu interior. No entanto, a terra envolvente foi analisada e não continha quaisquer vestígios de As e Pb, contrariamente ao Fe e Cu. Isto permitiu-nos concluir que os elementos tóxicos provinham das vísceras do rei.

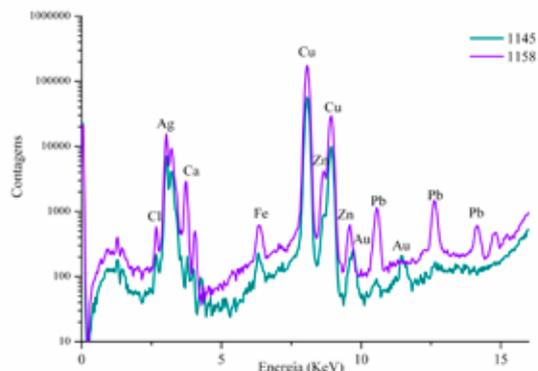
### Colaborando com a Polícia

A polícia é por vezes confrontada com situações que requerem a identificação de objectos desaparecidos. Outras vezes faz apreensões de objectos de que desconhece o valor e a proveniência. Numa dessas apreensões foi possível identificar um conjunto de condecorações, como sendo valiosas: umas eram feitas de prata, outras de prata e ouro, algumas continham decorações esmaltadas. Na Figura 6 mostram-se duas das peças identificadas.



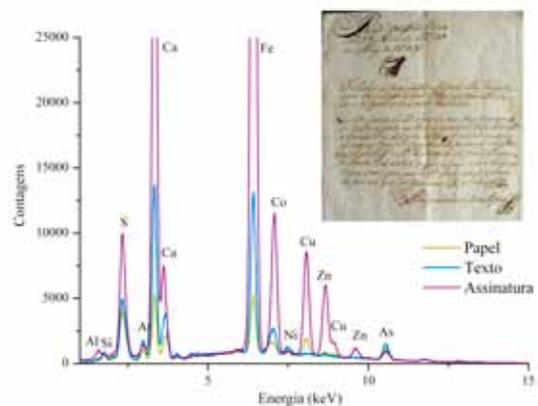
Após a primeira identificação dos elementos maioritários que definem se a peça é valiosa ou não, os elementos em muito baixa concentração (os elementos traço) são um dado crucial para saber a

história de cada peça e muitas vezes a sua origem. Os espectros obtidos para cada uma das medalhas encontram-se na Figura 7. Apesar de terem aspecto idêntico,



podemos observar que ambas as peças são constituídas à base de prata e cobre, mas distinguem-se facilmente pelos elementos minoritários que entram na sua composição elementar: A peça identificada como nº 1145 contém uma pequena quantidade de ferro e ouro e vestígios de zinco, enquanto a outra peça, nº 1158, é constituída por chumbo e apresenta zinco em maior quantidade.

A identificação de assinaturas é ainda uma outra possibilidade desta técnica e a sua utilização está demonstrada na Figura 8, onde se observou que num documento de 1779 a



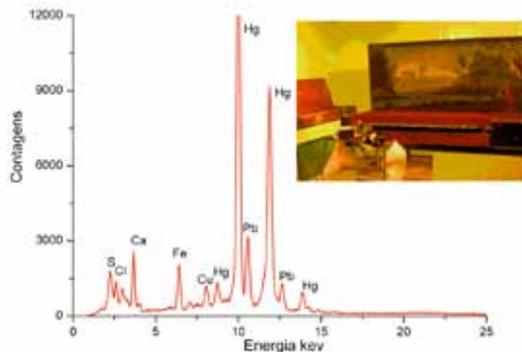
assinatura e o texto correspondiam a tintas diferentes, o que pode ser indicativo de falsificação [8-12].

Tendo em conta que no séc. XVIII só havia canetas de aparo, os documentos tinham que ser feitos e assinados com a mesma tinta, se todo o documento tivesse sido feito simultaneamente.

### Colaborando com o Museu da Música

Um cravo, um clavicórdio e um piano pertencentes às Oficinas Portuguesas de Instrumentos dos sécs. XVII e XVIII, da colecção do Museu da Música em Lisboa, foram também analisados *in situ*. Acredita-se que estes instrumentos foram pintados de verde, como uma estratégia para lhes dar uma aparência pouco atractiva durante as invasões francesas no início do séc. XIX. A tinta verde, geralmente designada de *merde d'oe*, revelou ser composta à base de Cu. Foi ainda encontrado Ba, provavelmente devido a branco de bário ( $BaSO_4$ ) nas regiões pintadas de verde. Este composto seria utilizado para tornar o tom de verde mais claro. Outras cores

e pigmentos foram encontrados na decoração de instrumentos como o vermelhão (Figura 9) e pigmento de ouro [12].



### Colaborando na conservação e restauro

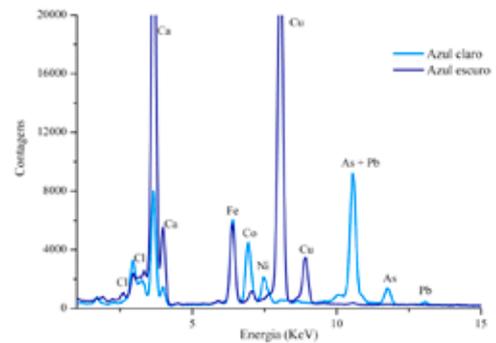
O restauro de murais antigos, tais como os da Igreja de Santo António dos Capuchos em Estremoz (Figura 10), foi



um dos trabalhos em que a nossa equipa participou com o objectivo de identificarmos os pigmentos utilizados nas decorações, de modo a serem utilizados pigmentos idênticos no restauro da obra. Este trabalho teve ainda outra componente que foi a da identificação da proveniência dos pigmentos utilizados. Seriam esses pigmentos obtidos na zona através das terras coradas existentes na região, ou teriam esses pigmentos sido importa-

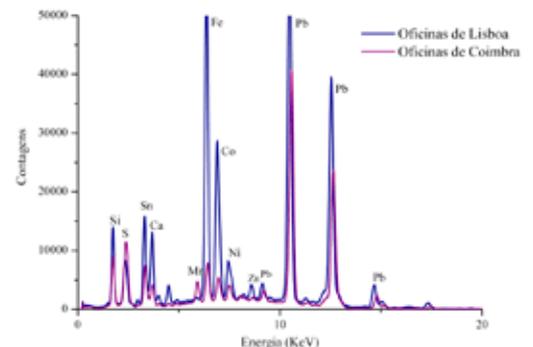
dos? Concluiu-se que havia pigmentos, de baixo custo, que eram obtidos na área, mas havia outros que foram importados, pois não eram provenientes daquelas zonas. Estas conclusões são dados importantes para os historiadores de arte. A existência de pigmentos importados pressupõe a existência de uma economia que permitisse a sua aquisição. Por outro lado, pode fazer-se uma associação com obras idênticas pertencentes à mesma ordem espalhadas pela Europa, e chegar à conclusão se havia, ou não, uma partilha de artesãos e materiais utilizados.

Feita a análise elementar dos vários pigmentos utilizados os resultados permitiram concluir que os vermelhos e os amarelos são as cores dominantes. Nos vermelhos, a presença de Ca, Zn, Pb e As indica que a maioria eram ocre resultantes da alteração de capas provenientes de minas de cobre da região. Os vermelhos escuros apresentaram Fe e Mn como elementos maioritários. O Mn é proveniente do óxido de manganésio conferindo um tom escuro ao pigmento. Nos amarelos, o fraco teor de Cu, Zn, Pb e As indica que, ao contrário dos vermelhos, a sua origem é terrosa. As análises efectuadas revelaram dois tipos de azuis (Figura 11). Por um lado alguns tinham elevado teor de Cu e ausência de Co, revelando tratar-se de azurite ( $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ ). Por outro lado, outros azuis revelaram a presença de Co, Ni e As, e ausência de Cu, indicando que o pigmento aplicado foi esmalte (vidro dopado com cobalto) [13, 14].



### Colaborando com os Museus do Azulejo e Machado de Castro

Em Portugal, a produção cerâmica desde sempre teve um grande impacto na nossa sociedade. Apesar das provas documentais da proveniência de determinadas peças, há ainda uma lacuna na caracterização científica das mesmas. Esta ausência de dados científicos foi em grande parte a motivação que nos levou a participar e colaborar com geólogos, historiadores de arte e arqueólogos, com o intuito de obter dados científicos que permitissem caracterizar cerâmicas vidradas portuguesas: faianças e azulejos [15-17]. Um dos trabalhos em curso é precisamente identificar e distinguir cerâmica vidrada de Coimbra e de Lisboa. A análise visual da técnica de aplicação dos pigmentos no vidrado é o ponto de partida. Enquanto que a cerâmica de Coimbra apresenta uma maior densidade cromática, realçando os contornos delineados pelas diferentes cores usadas no vidrado, as de Lisboa



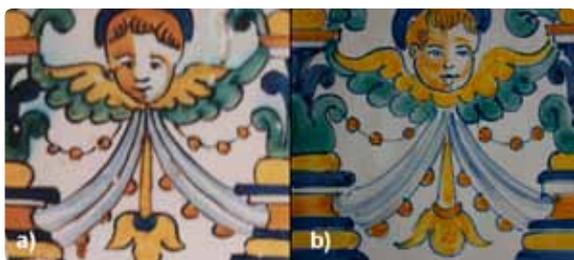
não apresentam estes detalhes.

No que respeita à composição elementar, a Figura 12 mostra a sobreposição de dois espectros correspondentes à cor azul em cerâmicas de Lisboa e Coimbra, da mesma época.

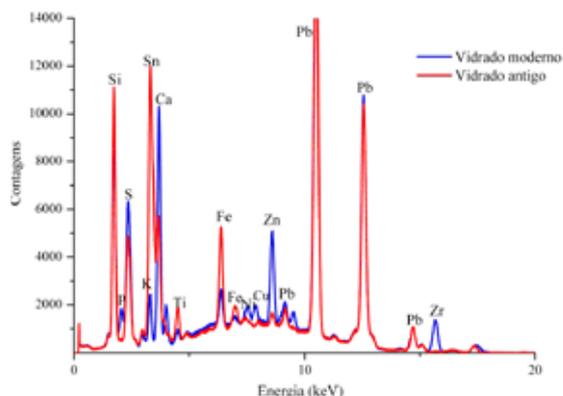
Enquanto que a cor azul da cerâmica de Coimbra contém Co e Mn, a de Lisboa apresenta maioritariamente Co. Este facto pode explicar-se considerando que o centro produtor de Coimbra era mais pobre, e em vez de se utilizar somente Co, utilizava-se uma mistura de Mn e Co para o tornar mais barato.

Na Figura 13 mostram-se dois azulejos, um original do final do séc. XVI e uma réplica do mesmo adquirida na loja do Museu Nacional do Azulejo.

As técnicas modernas de produção podem com facilidade reproduzir azulejos antigos, que por vezes nem os peritos conseguem distinguir. É neste tipo



de situações que a espectroscopia de raios X pode permitir uma atribuição inequívoca, como se vê na Figura 14. Quando comparamos o espectro obtido para o vidrado do azulejo antigo com o da réplica,



vemos que as suas composições elementares são bastante diferentes. Apesar de ambos os vidrados serem plumbíferos, o vidrado antigo possui ainda bastante estanho e ferro na sua composição, enquanto que o azulejo moderno possui zircónio e zinco. Foram ainda identificados pigmentos diferentes para as mesmas cores, o que permite facilmente a identificação de restauros e falsificações.

Em conclusão, podemos afirmar que a técnica de fluorescência de raios X é um precioso auxiliar de diagnóstico na identificação e caracterização de obras de arte, podendo ainda fornecer dados essenciais na conservação e restauro. Permite-nos identificar os elementos presentes numa amostra e determinar a sua concentração.

Tem as vantagens de ser uma técnica não destrutiva e de poder ser portátil, possibilitando estudar os objectos *in situ*.

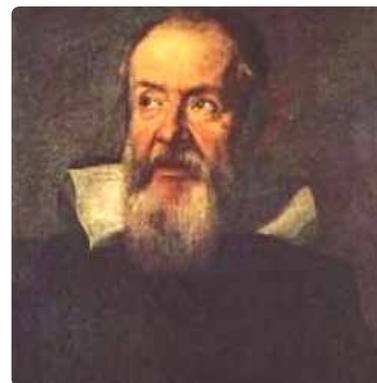
Estas são algumas das utilizações desta técnica, mas aplicações à determinação da contaminação do ambiente por metais pesados e estudos de conteúdos elementares em tecidos biológicos têm sido áreas de grande relevo no Centro de Física Atómica da Universidade de Lisboa.

1. R. Van Grieken e A. Markowicz, "Handbook of x-ray spectrometry", Marcel Dekker Inc, New York (1993)
2. A. Guilherme, A. Cavaco, S. Pessanha, M. Costa, e M. L. Carvalho, "Comparison of a portable and a stationary EDXRF spectrometers in the study of ancient metallic artefacts", X Ray Spectrometry 37, 444-449 (2008)
3. S. Pessanha, A. Guilherme, e M. L. Carvalho, "Matrix effects on portable and stationary EDXRF spectrometers: applications to cultural heritage", Applied Physics A 97, 497-505 (2009)
4. M. L. Carvalho, J. P. Marques, A. F. Marques, e C. Casaca, "Synchrotron microprobe determination of the elemental distribution in human teeth of the neolithic period", X-Ray Spectrometry 33, 55-60 (2004)
5. A. F. Marques, J.P. Marques, C. Casaca, e M. L. Carvalho, "X-ray microprobe SRXRF application on human teeth of renal insufficiency patients", Spectrochimica Acta B 59, 1675-1680 (2004)
6. M. L. Carvalho, C. Casaca, T. Pinheiro, J. P. Marques, P. Chevallier, e A. S. Cunha, "Analysis of human teeth and bones from the Calcolithic period by X-ray spectrometry", Nucl. Instrum. Meth. B 168, 559-565 (2000)
7. M. L. Carvalho, F. E. Rodrigues Ferreira, M. C. M. Neves, C. Casaca, A. S. Cunha, J. P. Marques, A. Amorim, A. F. Marques, e M. I. Marques, "Arsenic detection in 19th century Portuguese King post mortem tissues by energy dispersive x-ray fluorescence", X-Ray Spectrometry 31, 305-309 (2002)
8. M. L. Carvalho, "Tinta usada por D. Maria I continha elementos tóxicos", gravação em vídeo on line, 9-10-2007, (www.tvciencia.pt)
9. M. Manso, M. Costa, e M. L. Carvalho, "X-ray fluorescence spectrometry on paper characterization: case study on XVIII and XIX century documents" Spectrochimica Acta B 63, 1320-1323 (2008)
10. M. Manso e M. L. Carvalho, "Elemental characterization of a document paper by X-ray fluorescence spectrometry", J. Anal. At. Spectrom. 22, 164-170 (2007)
11. S. Pessanha, M. Manso, A. Guilherme, M. Costa e M. L. Carvalho "Investigation on historical documents for forensic purposes by energy dispersive x-ray fluorescence", Surface and Interface Analysis, DOI: 10.1002/sia.3085 (2009)
12. S. Pessanha, M. Manso, A. Guilherme, e M. L. Carvalho, "Non-destructive elemental characterization in art and cultural heritage research", Newsletter of Research, of International Atomic Energy Agency, IAEA's Laboratories, Seibersdorf, Issue No. 15, (Jul. 2008)
13. M. Gil, M. L. Carvalho, A. Seruya, I. Ribeiro, P. Alves, A. Guilherme, A. Cavaco, J. Mirão, e A. Candeias, "Pigment characterization and state of conservation of an 18th century fresco in the Convent of S. António dos Capuchos Estremoz", X Ray Spectrometry 37, 328-337, (2008)
14. S. Pessanha, A. Guilherme, M. L. Carvalho, M. I. Cabaço, K. Bittencourt, Jean L. Brunel e Marcel Besnard, "Study of a XVIII century hand-painted Chinese wallpaper by multianalytical non-destructive techniques", Spectrochimica Acta B 64, 582-586 (2009)
15. A. L. M. Silva, J. F. C. A. Veloso, C. A. B. Oliveira, A. L. Gouvêa, J. M. F. dos Santos e M. L. Carvalho, "EDXRF imaging of Pb in glazed ceramics using a micropattern gas detector", Anal. Bioanal. Chem. 395, 2073-2080 (2009)
16. A. Guilherme, S. Pessanha, M. L. Carvalho, J. M. F. dos Santos, J. Coroado, "Micro energy dispersive X-ray fluorescence analysis of polychrome lead-glazed Portuguese faiences", Spectrochimica Acta B, DOI: 10.1016/j.sab.2009.12.010 (2009)
17. A. Guilherme, J. Coroado e M. L. Carvalho, "Chemical and mineralogical characterization on glazes of ceramics from Coimbra (Portugal) from XVI-XIX centuries", Analytical and Bioanalytical Chemistry 395, 2051-2059 (2009)

#### Legendas das figuras

- Fig. 1 - Reorganização do átomo após ionização devida à radiação X incidente. A radiação emitida é característica do átomo e dos níveis entre os quais se deu a transição.
- Fig. 2 - Fotografia do equipamento portátil de fluorescência de raios X com detector e tubo de raios X montados segundo uma geometria de 90°. Os dois lasers indicadores são também visíveis.
- Fig. 3 - Fotografia tirada no local de escavação da Lapa da Furada, juntamente com um dos dentes caninos humanos encontrados nesta escavação
- Fig. 4 - Comparação das concentrações (micrograma por grama) obtidas para o esmalte dos dentes do Período Calcolítico encontrados nesta escavação e valores da literatura para cidadãos contemporâneos.
- Fig. 5 - Espectro obtido por XRF de uma amostra das vísceras do Rei D. João VI juntamente com a pedra identificativa do local de enterramento das vísceras.
- Fig. 6 - Fotografia de duas das medalhas analisadas neste estudo
- Fig. 7 - Comparação dos espectros obtidos por XRF para as medalhas com n.º inv. 1145 e 1158.
- Fig. 8 - Fotografia do documento analisado. Comparação dos espectros obtidos por XRF para o papel e para as duas tintas do documento revelando composições diferentes.
- Fig. 9 - Fotografia de um instrumento analisado. Espectros obtido por XRF para a tinta vermelha.
- Fig. 10 - Fotografia do mural da Igreja de Santo António dos Capuchos em Estremoz.
- Fig. 11 - Comparação dos espectros de XRF obtidos para dois tons de azul do mural.
- Fig. 12 - Comparação dos espectros de XRF obtidos para tons de azul de oficinas de Lisboa e de Coimbra.
- Fig. 13 - (a) Fotografia de um azulejo original do séc. XVI existente no Museu Nacional do Azulejo em Lisboa e comparação com (b) réplica desse azulejo.
- Fig. 14 - Comparação dos espectros de XRF obtidos para vidrado antigo e moderno.

# Copérnico ou Galileu: um problema mal colocado



Ana Simões

Centro Interuniversitário de História das Ciências e Tecnologia  
- Pólo Universidade de Lisboa

**Não posso estar mais de acordo com Jim Al-Khalili, professor de física na Universidade de Surrey e conhecido divulgador das ciências, quando refere o fascínio que a história da astronomia exerce sobre o grande público, constatando de seguida que a sua “história é muitas vezes mal contada.” [1]**

Mas já tenho enormes reservas quanto à argumentação que desenvolve ao longo do seu artigo “Quem mexeu na minha Terra?”, para defender que Galileu, e não Copérnico, é o “verdadeiro pai da astronomia moderna” e que, por isso mesmo, o Ano da Astronomia (2009) tinha que estar associado ao nome de Galileu. Está e muito bem! Mas não precisamos de o justificar diminuindo a relevância da obra de Copérnico e, muito menos, apoiados na certeza de que assim deve ser pois Copérnico não foi o primeiro em nada. Não foi o primeiro a propor um modelo heliocêntrico – Aristarco fê-lo muitos séculos antes. Não foi o inventor das várias técnicas de cálculo de que se socorreu: com efeito, continuou a usar os auxiliares geométricos (excêntricos, epiciclos e deferentes) inventados pelos matemáticos-astrónomos gregos Eudóxio, Hiparco e Apolónio para estudar o movimento dos planetas no contexto do modelo geocêntrico. E tal como os seus precursores, não foi um astrónomo observador, o que não é de admirar pois a astronomia greco-helenística era uma disciplina matemática. Terá tido (possivelmente) conhecimento dos trabalhos dos astrónomos da Escola da Sabedoria de Bagdade, não se tendo certezas sobre o impacto da circulação desses conhecimentos no mundo ocidental. E, mais outro defeito de Copérnico: não tinha a noção de gravidade “que surgiria mais tarde pela mão de Newton” [2]? Claro que não tinha como não tinha Galileu. O erro de Copérnico foi não ter sido também Galileu e Newton?

Galileu foi o primeiro a apontar a luneta-telescópio para o céu. Galileu foi único. Verdade, claro. Mas não porque “observou o céu pela primeira vez com o seu recém-inventado telescópio e confirmou uma das ideias mais importantes na história da humanidade: que nós não estamos no centro do Universo.” [3] Como é que uma observação permite tal confirmação? Nem metaforicamente tal é possível.

No que se segue, e à laia de resposta ao artigo de Al-Khalili publicado num número passado da “Gazeta de Física”, revisitarei aspectos das contribuições de Copérnico e de Galileu que considero mais relevantes para uma avaliação das respectivas obras astronómicas no contexto da época

em que viveram, destacando aspectos inovadores e tradicionais na obra de Copérnico, discutindo a relação do seu modelo com as ideias de Aristarco e, finalmente, o papel da luneta na mudança de objetivos da astronomia galilaica face aquela que tinha sido praticada no passado. Terminarei com alguns comentários a propósito do papel dos historiadores e de todos aqueles que se debruçam sobre o passado das ciências.

## Copérnico, conservador radical ou revolucionário cauteloso?

Como muitas obras fundacionais da história das ciências, a gestação do “De Revolutionibus” foi longa, muito longa mesmo, e precisou da pressão exercida pelo jovem luterano Joachim Rheticus para ser finalmente publicada, em 1543 [4].

Obra de astronomia técnico-matemática assente nas observações que Copérnico (1473-1543) herdou do passado, esta obra monumental inicia-se pelo Livro I, a única secção que não é técnica e que, por isso, pode ser entendida por qualquer leitor interessado, no passado como agora, e em que considerações heurísticas fornecem argumentos para os movimentos da Terra. Não admira, pois, que no prefácio assinado por Copérnico e dedicado ao Papa Paulo III, o autor acautelasse possíveis críticas restringindo a sua obra ao universo dos leitores especialistas. E enumerasse também uma lista de matemáticos que antes dele tinham discutido o movimento da Terra. Não se apresentava como um inovador mas como o herdeiro de uma tradição antiga. E é assim, mais uma vez, que num outro prefácio, só mais tarde atribuído inequivocamente ao luterano Andreas Osiander, o supervisor da impressão final da obra, se defendia o carácter instrumentalista do novo modelo astronómico, típico das construções astronómicas do período helenístico. Ora era a este respeito que a postura epistemológica de Copérnico entrava em ruptura frontal com o passado. Não via o seu modelo como mais uma maneira “de salvar as aparências” mas, muito pelo contrário, como um modelo físico que descrevia o movimento real dos planetas através do sistema solar.

Terão sido vários os factores que conduziram Copérnico à proposta de um modelo heliocêntrico. Influências do neo-platonismo renascentista e, em particular, de Marsilio Ficino, poderão ter apoiado a posição privilegiada e o estatuto singular que atribuiu ao Sol e também a sua insistência no carácter



físico, não apenas matemático, do seu sistema. Ou então questões astronómicas – a igualdade dos períodos de rotação dos deferentes de Mercúrio e de Vénus, e a igualdade do período de rotação dos epísculos de Marte, Júpiter e Saturno, com

o período de rotação do Sol em torno da Terra – sugeriram possivelmente uma relação íntima entre o Sol e os planetas que apontava para as vantagens de uma mudança do centro do modelo, da Terra para o Sol. Ou uma confluência de todos estes factores.

E Copérnico soube explorar as vantagens de uma tal mudança. O movimento de rotação da Terra em torno do seu eixo substituiu o movimento da esfera das estrelas fixas, que passava a ser meramente aparente, colocando em repouso uma esfera de enormes dimensões. O segundo movimento, o movimento de translação da Terra em torno do Sol, era acompanhado de uma série de vantagens. Explicava naturalmente as retrogradações dos planetas, esses movimentos irregulares que tinham suscitado as propostas do passado, como simples resultado do movimento da Terra.<sup>1</sup> Explicava ainda o período variável dos planetas como um movimento aparente resultante, mais uma vez, do movimento da Terra e a proximidade de Mercúrio e de Vénus do Sol, em resultado da sua qualidade de planetas interiores. Além de tudo isto, permitia ainda calcular rigorosamente os períodos dos movimentos planetários, sujeitos a várias indefinições no modelo ptolemaico assim como calcular as distâncias dos planetas ao Sol (tomando-se a distância Terra-Sol como unitária), o que Aristarco já fizera também. Eram, afinal, estes últimos cálculos, que permitiam ordenar de forma unívoca os planetas em função das suas distâncias ao Sol que, segundo Copérnico, conferiam à sua proposta o apelo inquestionável de uma descrição integrada dos movimentos planetários, contrastando com o tratamento ptolemaico que discutia de forma independente os movimentos de cada planeta. Esta vantagem de carácter estético-filosófico era apresentada por Copérnico de forma metafórica:

Também não conseguiram [os astrónomos ptolemaicos] descobrir ou concluir a partir desses círculos um facto de mais interesse ou seja a forma do Universo e a justa simetria das suas partes, mas aconteceu-lhes como a alguém que fosse buscar a diferentes pessoas mãos, pés, cabeça e outros membros, perfeitamente apresentados sem dúvida mas sem formarem um corpo uno, e sem qualquer espécie de correspondência mútua entre si, de tal maneira que resultaria deles mais um monstro que um homem [5].

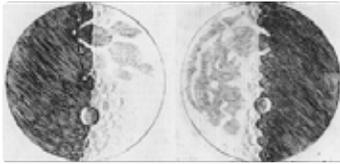
Mas nem tudo eram vantagens – o movimento de translação fazia prever a existência de um movimento aparente das estrelas, que veio a ser conhecido por paralaxe estelar. Uma previsão nova que, contudo, não era confirmada.<sup>2</sup> Para justificar tal anomalia Copérnico desde logo adianta uma justificação muito simples associada a uma estimativa das novas dimensões do cosmo: a distância a que as estrelas se encontram é muito grande quando comparada com a distância do Sol à Terra; mais precisamente, a distância da Terra às estrelas fixas teria que aumentar (~ 75 vezes), o que implicava um aumento assustador do volume do cosmo (~ 400 000 vezes), para que o movimento estelar não fosse observado. E para além desta consequência astronómica do movimento da Terra não era fácil contornar os outros tipos de objecções ao seu movimento, de origem física, teológica e de senso comum, o que Copérnico tentou corajosamente. Mas o seu esboço de resposta não foi suficientemente longe – afinal o processo de substituição da física aristotélica foi um processo muito árduo e lento. Finalmente, todas estas novidades computacionais, toda a simplicidade explicativa do modelo coperniciano simplificado (um círculo por planeta), perdiam-se (ou talvez não, se nos colocarmos na óptica de um contemporâneo) no modelo sofisticado, o único que podia oferecer uma alternativa computacional credível ao modelo ptolemaico. Assim, Copérnico usa com profusão círculos excêntricos, deferentes e epísculos. Mas rejeita ferozmente o equanto ptolemaico que interpreta como uma distorção inadmissível do programa platónico original.<sup>3</sup> E, por isso, tendo em vista este aspecto, há quem considere Copérnico o último dos astrónomos da antiguidade e não o primeiro dos modernos. Não admira pois que o “De Revolutionibus” não tenha sido um sucesso editorial [6], e que a aceitação do copernicianismo tenha sido lenta e oportunista, cada um aproveitando-se dela de acordo com critérios pessoais. Isolaram-se amiúde as técnicas de cálculo, de fácil adopção, da tese cosmológica, que se rejeitava.

### Precusores e prioridades: Aristarco versus Copérnico

Antes de Copérnico já Aristarco (~280 a.C.) tinha proposto um modelo heliocêntrico. Certo. E, principalmente, tinha realizado cálculos geométricos simples, muito elegantes e bastante precisos, tanto das dimensões aparentes da Lua e do Sol como das distâncias da Terra à Lua e ao Sol. Conhecemos a proposta heliocêntrica através do relato de Arquimedes, um defensor do geocentrismo, no seu “Arenário”. Um relato curioso em que interpreta as palavras de Aristarco tentando até resolver algumas incoerências no que se refere às proporções do cosmo. Curioso, pois não transparece qualquer sombra de animosidade, o que nos remete para a suspeita de que nesta altura, no início do período helenístico, teria havido grande liberdade na discussão de modelos cosmológicos alternativos, sem a oposição que mais tarde, na Idade Média e no Renascimento, se estabeleceria entre eles. Por outro lado, tudo leva a crer que uma das características deste período teria sido a capacidade de distinguir entre modelos matemáticos, por um lado, e suas implicações físicas, por outro. A força da matemática parecia então sobrepor-se

1. No seu movimento orbital a Terra ultrapassa os planetas exteriores e é ultrapassada pelos planetas interiores visto que se desloca mais depressa que os planetas exteriores e mais lentamente que os interiores. Copérnico considera ainda um terceiro movimento, de que não falarei aqui.

2. A paralaxe estelar foi confirmada pela primeira vez no início do século XIX por Bessel (1838).



à física e às suas consequências ontológicas [7].

A tradução latina do “Arenário” apareceu pouco depois da publicação do “De Revolutionibus”. Mas antes

circularam na Europa obras, entre as quais de Plutarco e de pseudo-Plutarco, que nos informam sobre ela. Será que Copérnico as conhecia e, por isso, sabia da existência da proposta heliocêntrica de Aristarco? Ou teria sabido dela através de documentos escritos em grego? E se a conhecia porque é que na versão final da sua obra não há referências ao heliocentrismo de Aristarco? Para poder clamar a primazia desta ideia? Mas se fosse assim porque refere, no prefácio dedicado ao Papa, tanto Filolau como Heraclides e Ecfante, que apresenta como pitagóricos, e que discutiram o movimento da Terra? A procura de respostas para estas questões conduz-nos à conclusão de que Copérnico conhecia a proposta de Aristarco mas terá optado por não se referir a ela, não para reclamar prioridade para si, mas por ter clara consciência dos limites que lhe eram impostos pelo meio em que se movimentava e, nomeadamente, pela certeza de que se quisesse ter o apoio do Papa, um erudito de forte pendor neo-pitagórico, certos nomes podiam ser mencionados mas outros deveriam ser evitados a todo o custo. Ora Copérnico precisava de apoios e o patrocínio do Papa era um deles, não sendo nada avisado, e até contraditório, dedicar-lhe um prefácio que o enfurecesse. E, nesta altura, a discussão do movimento de rotação da Terra em torno do seu eixo não levantava o mesmo tipo de problemas que causava o movimento de translação em torno do Sol. Este último movimento seria até, algumas décadas mais tarde, classificado como herético [8]. Cautela, medo até, devem ter pesado bastante no atraso de 30 anos na publicação do “De Revolutionibus”. E, neste contexto, não é de admirar a opção final de Copérnico.

### Dois intrusos na história da astronomia: Galileu e a luneta

Foi numa das suas deslocações frequentes a Veneza, quando era professor de matemática na Universidade de Pádua, que Galileu (1564-1642) recebeu a notícia de um óculo construído na Holanda que permitia aproximar objectos muito longínquos. Exímio construtor de instrumentos, universitário-artesão, Galileu pôs imediatamente mãos à obra, juntando um tubo, uma lente plano-côncava e outra plano-convexa. Se a primeira tentativa proporcionou apenas uma ampliação de 3, tentativas futuras permitiriam duplicá-la. A esta proeza seguiu-se uma outra. Galileu apontou a luneta não para a terra ou para o mar ... mas para o céu. Fez várias observações, interpretou-as, divulgou-as e tentou usá-las para credibilizar o modelo copernicano às expensas do modelo ptolemaico. Foi o “Sidereus Nuncius” (1610) que revelou ao mundo um mundo novo [9].

Nesta pequena obra, misto de livro científico, de divulgação e de panfleto, Galileu anunciava as manchas da superfície lunar. Não era o primeiro a notá-las, claro está, mas era o primeiro a interpretá-las como acidentes da superfície lunar, e calculava até a altura aproximada de algumas dessas montanhas. Anunciava ainda novas estrelas na constelação de Oríon, afirmava que a mancha leitosa conhecida por Via



Láctea era, afinal, composta por uma miríade de estrelas, e apresentava os quatro satélites de Júpiter. Estas observações demoliam alguns dos sacrosantos pilares do edifício aristotélico-ptolemaico: a perfeição dos objectos celestes, a imutabilidade dos céus e o carácter singular da Terra, materializado pela sua Lua. Baptizou então os satélites de Júpiter com o nome de estrelas

de Médici, numa clara manobra estratégica de persuasão que o conduziria a filósofo e matemático da corte do grão-duque da Toscana. Alguns anos mais tarde revela a existência de manchas solares, entrando em controvérsia com o jesuíta Scheiner que reclamava prioridade nessa descoberta e a explicava pela interposição de objectos opacos entre a Terra e o Sol. Revelava ainda as “orelhas” ou anéis de Saturno, e a sequência completa das fases de Vénus, provando que este planeta orbita o Sol, não a Terra.

Mas não bastou fazer as observações. Era preciso convencer astrónomos, teólogos, aristocratas, e público leigo, que a luneta não produzia imagens virtuais da realidade, ensinar as pessoas a observar através da luneta, a comparar e a confirmar observações. Não foi tarefa fácil. Só um processo longo permitiu conferir credibilidade ao novo instrumento que, além de tudo o mais, se vinha intrometer no domínio da astronomia de então, técnica, precisa e quantitativa. Se inicialmente permitia apenas fazer observações qualitativas, o novo instrumento acabará por alterar radicalmente a face da astronomia. Era necessário finalmente conferir autoridade aos novos observadores dos céus. E isso era tanto mais crucial quanto Galileu quis usar a luneta para abrir o caminho à adopção do copernicanismo.

Fê-lo com mestria e com uma lógica tipicamente sua: escamoteando constantemente que as suas observações eram compatíveis tanto com o modelo copernicano como com o modelo de Tycho Brahe,<sup>4</sup> que ganhava cada vez mais adeptos entre a elite culta e os matemáticos jesuítas. E tudo isto com a agravante de Galileu não ser um astrónomo no sentido tradicional do termo, pois nunca pretendeu desenvolver modelos matemáticos do movimento dos planetas. Não era isso que lhe interessava, daí ter sempre desvalorizado – no que foi bastante injusto – a obra do grande Kepler, seu incondicional admirador. Queria ser um filósofo, e não um mero professor universitário de matemática, e queria ser reconhecido como tal. Conseguiu-o: foi afinal a descoberta dos satélites de Júpiter que lhe abriu as portas desse outro céu, a corte dos Médici, e lhe conferiu o estatuto e reconhecimento tão desejados. A distância entre a Universidade de Pádua e a

3. O programa platónico baseava-se na descrição dos movimentos dos planetas como combinações de movimentos circulares e uniformes. O equanto, introduzido por Ptolomeu, era um ponto equidistante do centro do excêntrico relativamente à Terra, tal que o movimento era uniforme mas não circular relativamente a ele.

corde florentina dos Médici não se media apenas em milhas mas também em graus de uma hierarquia socio-profissional muito difícil de transpor. Com o “Sidereus Nuncius” Galileu tornou-se um homem célebre.

### O problema das histórias mal contadas

A atribuição de prioridades faz parte do universo de valores dos cientistas e traduz o reconhecimento da comunidade científica pela importância das suas contribuições. Por vezes, muitas vezes até, é usada com intuítos nacionalistas, reclamando-se a prioridade do cientista de uma nacionalidade face ao de outra, por vezes historicamente rival.<sup>5</sup>

Há muito que deixou de fazer parte das questões relevantes para os historiadores das ciências. É claro que os historiadores precisam de identificar e conhecer os factos do passado. Mas os factos históricos não constituem, por si só, história. Uma narrativa do passado das ciências vai para além da mera descrição de factos, apresentando uma interpretação de um determinado conjunto de acontecimentos. Por isso, basear uma argumentação histórica única e exclusivamente na base da atribuição do primeiro lugar a um cientista não nos leva longe e, aliás, arreda-nos da discussão que é verdadeiramente interessante. Copérnico não foi o primeiro a propor um sistema heliocêntrico, mas Galileu foi o primeiro a fazer observações do céu com a luneta, logo Galileu, e não Copérnico, foi o “verdadeiro pai da astronomia moderna” e, por isso, o Ano da Astronomia tinha que ser dedicado a Galileu, diz-nos Al-Khalili. Chegadas a este ponto, estou certa que o leitor entende perfeitamente porque discordo deste tipo de argumentação.

Interessa-me muito e, atrevo-me a dizer, a todos os que gostam de reflectir sobre o passado das ciências, historiadores, divulgadores, cientistas ou leigos, perceber o que levou Copérnico a avançar com o heliocentrismo, que tipo de problemas queria resolver e como considerava dever resolvê-los, o que levou Galileu a tentar construir uma luneta e a apontá-la para o céu, como é que estas observações se enquadravam na sua agenda científica e como é que esta se articulou com o meio socio-político em que se moveu. Finalmente, a procura de *um único* pai para a origem de um acontecimento, descoberta ou invenção está associada à concepção da instantaneidade das descobertas científicas, à perpetuação de míticos gritos arquimédicos “eureka, eureka”. Ignora que as descobertas científicas são processos prolongados espaço-temporalmente para os quais contribuem vários cientistas, com uma ou várias peças do puzzle, de maneiras e perspectivas diferentes e, por vezes, contraditórias.

Uma narrativa histórica focada na questão da prioridade é uma história mal contada porque não chega sequer ao princípio da narrativa. Oferece uma visão simplista do passado histórico das ciências. E cria

ou reforça no público leigo ideias erradas sobre o que é, e o que tem sido, o empreendimento colectivo a que chamamos ciência. Com más lentes, Galileu sabia nada poder observar, daí que não aproveitasse mais que 1%. Da mesma maneira, lunetas desfocadas não nos podem oferecer senão visões enubladas e distorcidas do passado das ciências.

1. Jim Al-Khalili, “Quem mexeu na minha Terra?”, *Gazeta de Física* 32, 32 (2009). Dois livros recentes dirigidos ao grande público que incorporam teses historiográficas actuais e incluem temas abordados neste artigo, e muitos outros, são: Patricia Fara, “Science. A four thousand year history” [Oxford University Press, Oxford (2009)]; Ronald Numbers, org., “Galileo goes to jail and other myths about science and religion” [Harvard University Press, Harvard (2009)]. Aconselho vivamente a sua leitura.
2. *Ibid.*
3. *Ibid.*, ênfase minha.
4. A bibliografia sobre Copérnico é imensa. Referimos aqui apenas um livro central - Thomas Kuhn, “The Copernican Revolution. Planetary astronomy in the development of Western thought” [Harvard University Press, Harvard (1957)], tradução portuguesa Edições 70, 1990) e alguns traduzidos em português que, entre outros tópicos, se referem a Copérnico: Richard S. Westfall, “A construção da ciência moderna. Mecanismos e mecânica” [Porto Editora, Porto (2003)]; Allen Debus, “O homem e a natureza no Renascimento” [Porto Editora, Porto (2004)]; Yves Gingras, Peter Keating, Camille Limoges, “Do Escriba ao Sábio. Os detentores do saber da Antiguidade à Revolução Industrial” [Porto Editora, Porto (2007)].
5. Nicolau Copérnico, “As revoluções dos orbes celestes” (2ª ed.), Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (1996), introdução e notas de Luís Albuquerque, pág. 8.
6. A primeira edição de Nuremberga teve uma tiragem de 1000 exemplares. Seguiram-se quatro reimpressões em quatrocentos anos (Bale, 1566; Amsterdão, 1617; Varsóvia, 1854; Torun, 1873). À laia de comparação, recorde-se que o manual de astronomia de Sacrobosco teve, pelo menos, 59 edições, e que o “Tratado da Esfera” do jesuíta Clavius teve dezasseis edições em cinquenta anos. Veja-se Owen Gingerich, “The book nobody read. Chasing the revolutions of Nicolau Copernicus” [Walker & Company, New York (2004)].
7. Jean Christianidis, Dimitris Dialetis, Kostas Gavroglu, “Having a knack for the non-intuitive: Aristarchus’s heliocentrism through Archimedes’s geocentrism”, *History of Science* xl, 147-168 (2002).
8. Kostas Gavroglu, “Um inoportuno problema histórico de consequências historiográficas benéficas: o problema da prioridade,” *O passado das ciências como história*, Porto Editora, Porto (2007), págs. 171-185.
9. Anuncia-se a publicação da primeira tradução em português do “Sidereus Nuncius”: Galileu Galilei, “Sidereus Nuncius. O Mensageiro das estrelas” [Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa (2010)], tradução, estudo e notas por Henrique Leitão. O estudo introdutório analisa com grande profundidade as questões abordadas neste artigo. A não perder. Não sendo aqui o lugar para referir a extensa bibliografia sobre Galileu, indicamos apenas dois livros recentemente publicados em Portugal: Mario Biagioli, “Galileu cortesão. A prática da ciência na cultura do Absolutismo” [(Porto Editora, Porto (2003)]; Michael Sharratt, “Galileu, inovador” [Porto Editora, Porto (2010)].

4. Neste modelo a terra está em repouso no centro, a Lua e o Sol giram à sua volta e os restantes planetas à volta do Sol.

5. Ao reclamar a importância dos trabalhos muçulmanos, Al-Khalili chama a atenção para uma faceta interessantíssima desta história que não tem sido de maneira nenhuma esquecida pelos historiadores da ciência.

# A crise, a física e o Ronaldo

Jim Al-Khalili

**Ao mesmo tempo que escrevo esta coluna, no Reino Unido a comunidade académica de físicos, astrónomos e outros cientistas do espaço procura avaliar os prejuízos causados pelos enormes cortes no financiamento para a investigação que foram anunciados em Dezembro passado pela instituição que financia a ciência no Reino Unido, o Science and Technology Facilities Council (STFC).**

Mas será que os nossos gritos de protesto deveriam ser ouvidos com mais atenção do que os de todo o restante sector público? É claro que a recessão mundial atingiu todas as áreas de investimento público, incluindo a ciência, e no contexto actual o futuro financeiro imediato não é promissor para ninguém. Talvez não nos devêssemos queixar.

Estes cortes governamentais parecem ter afectado de uma forma desproporcional os físicos nucleares. Dois dos três projectos nacionais de investigação actualmente financiados foram cancelados, bem como todos os sete projectos futuros que haviam sido propostos, o que representa um corte significativo de 52%. Que isto suceda quando o Reino Unido está a debater um novo programa de energia nuclear e a discutir os problemas dos resíduos nucleares demonstra uma inacreditável falta de visão a médio prazo.

Um relatório recente sobre a física e engenharia nucleares no Reino Unido realçou a necessidade de se manter uma base sólida de ciência nuclear, e afirmou muito claramente que a física nuclear tem aplicações em inúmeros campos. As suas aplicações nos cuidados de saúde, no ambiente, na indústria nuclear e na segurança nacional necessitam de um bom número de pessoas especializadas nesta área, que em grande medida terão de receber formação por físicos nucleares académicos. O relatório afirma que “continuar os cortes de financiamento poderá causar a morte desta área científica, o que levará à perda de um conjunto importante de capacidades técnicas, atingindo negativamente o fornecimento de cursos de mestrado”. Muitos dos grupos de investigação nas universidades de todo o Reino Unido coordenam e apoiam cursos de mestrado como um *spin-off* da sua investigação básica que fornece pessoas formadas que entram directamente nos sectores nuclear, radiológico e de cuidados de saúde.



Continuar a ter trabalhadores especializados para a indústria nuclear é claramente uma questão prioritária para o Reino Unido, dado que, embora tenhamos deixado de projectar e construir centrais energéticas nucleares, precisamos de ser clientes inteligentes quando encomendamos reactores ao estrangeiro. Também precisamos de peritos em física nuclear para lidar com o desmantelamento dos reactores nucleares antigos e para tratar dos nossos resíduos nucleares em segurança. De onde é que o STFC pensa que os profissionais especializados em física nuclear e na instrumentação e medida associadas de que o Reino Unido precisa hão-de vir? Comparado com a França e a Alemanha, o Reino Unido gasta apenas um vigésimo destes em investigação em física nuclear – será que podemos estar assim tão errados?

O que é fundamental discutir agora é como é que a comunidade académica de físicos nucleares, o governo e as agências de financiamento podem trabalhar em conjunto para garantir a sobrevivência destas áreas de conhecimento técnico, essenciais para o futuro da nação. Limitar-se a protestar para que as decisões já tomadas sejam anuladas pode até ser contraproducente, dado que provavelmente haverá muitíssimos grupos de pressão a gritar “não aos cortes na minha área”. Temos também de garantir que o nosso governo compreende o entusiasmo, a importância e a relevância da investigação que fazemos em física nuclear, desde estudar porque é que as estrelas brilham e como fabricam todos os elementos, até aplicar os nossos conhecimentos ao desenvolvimento de novos tratamentos para o cancro. Se a nossa disciplina acabar, os ministros do governo terão de pensar como irão explicar no futuro porque é que não apoiaram a física nuclear quando o orçamento necessário era bem menor que o salário de Ronaldo no Real Madrid. Espero que a situação não tenha atingido este extremo em Portugal.



# As descobertas da década

Carlos Fiolhais

**No final de cada década é costume fazer uma lista do que se passou de mais importante. A física não foge à regra, razão pela qual o APS News, boletim da Sociedade Americana de Física, apresenta no seu número de Fevereiro passado um top ten das notícias da Física mais badaladas nos últimos dez anos.**

Mais badaladas significa que foram as histórias da Física que, amplificadas pelos média, suscitaram mais interesse. Tomaram no passado recente o nosso tempo, embora isso não signifique que, na história da Física, sejam aquelas que ocupem mais espaço, ou que venham sequer a ocupar espaço. Em primeiro lugar, surge, destacada, a construção e entrada em funcionamento do Grande Colisionador de Hadrões (LHC), no CERN, perto de Genebra na Suíça. É a maior máquina do mundo e também a mais cara. É bem conhecido que, inaugurada em 2008, sofreu uma avaria e só há pouco tempo começou a fornecer dados. Espera-se a descoberta da partícula de Higgs ou... de outras. Como já alguém disse, espera-se o inesperado. Relacionada com o LHC está a sopa de quarks-gluões, que existiu pouco depois do *Big Bang*, que foi recriada no CERN em 2000 e em Brookhaven em 2005, e que poderá vir a ser revisitada no CERN. E ainda descobertas astrofísicas fundamentais: o pormenorizado *scanning* da radiação cósmica do fundo efectuado pela WMAP (Sonda de Anisotropia de Microondas Wilkinson), em operação desde 2001, que permitiu datar o *Big Bang* há 13,7 mil milhões de anos; a prova directa da matéria negra encontrada, em 2006, numa colisão de galáxias, matéria essa cuja

constituição está ainda por identificar; e ainda os primeiros resultados da Gravity Probe B, a sonda lançada em 2004 para testar a teoria da relatividade geral, ao medir a curvatura do espaço-tempo.

Baixando dos céus à Terra, a década passada assistiu à criação e manipulação do carbono sob várias formas, como os nanotubos e o grafeno. Essas formas prometem novos materiais ultra-resistentes e nova electrónica. Ou muito me engano ou o grafeno, isto é, as folhas isoladas da grafite, ainda poderá dar um Prémio Nobel. Assistiu ainda à criação, desde 2006, de materiais com índice de refração negativo, com potencial para proporcionar a capa da invisibilidade da série *Star Trek*. E, ainda no domínio da ficção científica, a década passada deu-nos espectaculares progressos em experiências ditas de teletransporte quântico, que, apesar do nome, está ainda longe das ascensões do capitão Kirk da mesma série. Um outro fenómeno que só aparecia na ficção científica foi materializado com a paragem de um feixe de luz numa nuvem de rubídio, conseguida por físicos norte-americanos em 2001.

Finalmente, a década que em breve terminará assistiu à construção de supercomputadores cada vez mais poderosos, através da ligação em paralelo de milhares de processadores. Estas máquinas têm fornecido uma maior compreensão de uma grande variedade de sistemas físicos e não só. Não é arriscado prever que os computadores vão ficar ainda mais poderosos e, com isso, crescerá ainda mais a nossa compreensão de muitos sistemas complexos. A primeira década do século XX deu-nos a teoria quântica e a teoria da relatividade. Nem uma nem outra parecem estar por ora em causa. Mas as duas continuam a espantar-nos ao permitir a descrição de novos fenómenos. Quem diria, no início do século XXI, que o *"top ten"* mediático da Física era este?

tcarlos@teor.fis.uc.pt

# Aconteceu

## ENCONTRO NACIONAL DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA

**Vitor Amaral**

Departamento de Física - Universidade de Aveiro

Nos dias 18 e 19 de Fevereiro decorreu no Instituto Superior Técnico em Lisboa o Encontro Nacional 2010 de Física da Matéria Condensada, que contou com a presença de 85 participantes, investigadores e estudantes da área. Este encontro teve como propósito a criação de laços mais fortes, no seio da comunidade científica portuguesa, numa área que congrega aspectos de ciência básica e aplicada, por um lado, e a física teórica e experimental.

Durante os dois dias, foram apresentadas 68 comunicações, 40 orais e 28 posters, abordando temas como: física do grafeno, magnetismo, multiferróicos, supercondutividade, cristais líquidos, interfaces e polímeros, condensados Bose-Einstein, células solares, filmes finos e ainda aspectos interdisciplinares.

A Organização do Encontro, coordenada por Pedro D. Sacramento e Vítor Rocha Vieira (IST, Universidade Técnica de Lisboa), resultou da colaboração de docentes e investigadores de várias Universidades e Laboratórios: Manuel Almeida (Instituto Tecnológico e Nuclear, Sacavém), João Pedro Alpuim (Universidade do Minho), Vítor Amaral (Universidade de Aveiro), Miguel Araújo (Universidade de Évora), José Carmelo (Universidade do Minho), Ricardo Dias (Universidade de Aveiro), Margarida Godinho (Universidade de Lisboa), João Lopes dos Santos (Universidade do Porto) e Iveta Pimentel (Universidade de Lisboa). Teve o patrocínio do CFIF (Centro de Física das Interações Fundamentais, IST, Lisboa).

Refira-se ainda que deste modo foram retomadas iniciativas anteriores da comunidade, iniciadas num já longínquo 1º encontro realizado no Porto em 1976. O próximo Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada está previsto para 2012. No site do encontro (<http://cfif.ist.utl.pt/~encontro2010>) podem ser consultados os resumos e as comunicações apresentadas.



Aspecto da Audiência



## 2010, ANO DO LASER

**Gonçalo Figueira**

No dia 16 de Maio de 1960 uma nova luz brilhou pela primeira vez. Nesse dia, o físico americano Theodore Maiman demonstrou a criação de um impulso luminoso amplificado por emissão estimulada de radiação – aquilo a que se veio a chamar laser.

Se, na altura, pareceu ser apenas uma curiosidade científica, passados cinquenta anos é unânime que o laser se tornou uma ferramenta fundamental na construção do mundo como o conhecemos. Desde os leitores de cd's e dvd's, às telecomunicações ópticas, cirurgia ocular, corte de precisão, impressão, leitura de códigos de barras, são inúmeras as aplicações que justificam que o laser seja uma das principais invenções do séc. XX. Em 2010, celebramos os cinquenta anos do seu nascimento. Está em preparação um conjunto de iniciativas terá lugar a nível global, com vista a divulgar a história do laser e a explorar o impacto que as suas aplicações têm na nossa sociedade. O programa LASERFEST, uma iniciativa conjunta da American Physical Society, Optical Society of America, SPIE e IEEE Photonics Society, serve de plataforma de divulgação e de base de informação e recursos para a criação de novos eventos.

Para saber mais:  
<http://www.laserfest.org>

## LHC ENTRA EM FUNCIONAMENTO

**Pedro Abreu**

LIP

No passado dia 30 de Março, o CERN conseguiu obter no LHC - o novo acelerador do CERN - as primeiras colisões entre protões com a fantástica energia de 3,5 TeV cada um, a maior energia jamais alcançada em aceleradores na Terra. Com este muito importante sucesso, o LHC entra agora na fase normal de funcionamento para a Física, produzindo milhões de colisões que irão ser analisadas pelas seis experiências instaladas no LHC. A figura mostra a imagem reconstruída de um dos primeiros acontecimentos recolhidos pela experiência ATLAS à energia de 7 TeV.



(c) CERN 2010

# Acontece

## MEDIR OS CÉUS PARA DOMINAR A TERRA

Ana Eiró

Museu de Ciência da Universidade de Lisboa

Exposição sobre Astronomia  
no Museu de Ciência da Universidade de Lisboa  
Rua da Escola Politécnica nº 56, Lisboa



Continuando o programa do Museu de Ciência de revelar ao público o património científico histórico português, e enquadrada no Ano Internacional da

Astronomia 2009, esta exposição pretende mostrar ao público a importância do ensino de Astronomia no século XIX no contexto da Escola Politécnica de Lisboa entre 1837 e 1911, naturalmente associado ao Observatório Astronómico existente neste local. Os instrumentos existentes na colecção do Museu e todo o arquivo parte do nosso acervo permitem entender quão crucial foi o ensino da Astronomia na afirmação do Estado Português no século XIX. Na época, e para que fosse possível o desenvolvimento do Reino, era preciso antes de tudo fazer um levantamento cartográfico do País, elemento absolutamente essencial para conhecer os limites do território, elaborar mapas, organizar a administração e projectar infraestruturas telegráficas e ferroviárias. A Astronomia era precisamente uma das ferramentas essenciais para a concretização desse objectivo. Era preciso “Medir os Céus para dominar a Terra”... Esta é pois uma exposição histórica onde se expõem objectos que foram usados no Observatório Astronómico da Escola Politécnica. O que se ensinava, como se ensinava e porque se ensinava astronomia, definem as três áreas da exposição que foca de um modo muito especial a personagem de Filipe Folque, o professor da 4ª cadeira – *Astronomia e Geodesia* - de maior importância nesta época, que incutiu um cunho essencialmente prático ao ensino aqui ministrado, preparando aqueles que haveriam de integrar as comissões nacionais de cartografia do Reino.

A natural associação da astronomia com a matemática e a vontade de alargar o âmbito desta exposição histórica levou-nos a fazer uma parceria com a Sociedade Portuguesa de Matemática, e incluir nesta exposição uma área onde se explica como desde a antiguidade foi possível, a partir das observações dos astros, fazerem-se outras medidas... com muita imaginação e alguma geometria!

E assim mostramos como se pode “Medir Tempo, medir o Mundo, medir o Mar”, dando o mote para a realização de actividades pedagógicas ligadas à utilização de relógios de sol, astrolábios, quadrantes

e balestilhas.

A exposição está aberta de terça a sexta entre as 10h e as 17h, sábados e domingos entre as 11h e as 18h (entrada na Rua da Escola Politécnica nº 56). Marcações para visitas orientadas e actividades educativas podem ser feitas através de [geral@museus.ul.pt](mailto:geral@museus.ul.pt) ou do telefone 213921808. Prolongada até 29 de Agosto de 2010.

## Vai acontecer

### FÍSICA 2010

Mario Gonçalves Pereira

Univ. Trás-os-Montes e Alto Douro

Este evento, que compreende a 17ª Conferência Nacional de Física (CNF) e o 20º Encontro Ibérico para o Ensino da Física (EIEF), irá realizar-se em Vila Real, na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD), entre 1 e 3 de Setembro de 2010.

A FÍSICA 2010 oferece aos participantes 3 dias de grande actividade. As manhãs serão dedicadas a sessões plenárias realizadas por oradores convidados, essencialmente estrangeiros, mas de referência nas áreas da Física dos Plasmas, Geofísica, Gravitação e Cosmologia, Física Nuclear, Física das Partículas e Física médica. As tardes serão reservadas para as sessões orais específicas, a realizar em paralelo, e para uma sessão de cartazes conjunta. Os participantes do EIEF terão ainda a possibilidade de realizar mini-cursos em áreas específicas da Física e ver a sua participação creditada. A Comissão Organizadora é constituída por Carlos Herdeiro (FCUP), Joana Almeida e Silva (EB2,3 Monsenhor Jerónimo do Amaral), António Joaquim Fortuna (ES/3 Camilo Castelo Branco) e José Manuel Almeida, Marco Duarte Naia e Mário Gonzalez Pereira (UTAD).

A Comissão Científica da CNF é constituída pelos actuais coordenadores das divisões da SPF, enquanto a Comissão Científica do EIEF integra Vítor Teodoro (UNL), da divisão de Educação da SPF, Joaquim Bernardino Lopes (UTAD), Jorge António Valadares (U Aberta) e, indicados pela Real Sociedade Espanhola de Física, Verónica Tricio Gómez (UBurgos) e José Maria Pastor Benavides (I.E.S. Benito Pérez Galdós).

### VISITA AO CERN - PROFESSORES DE ESCOLAS PORTUGUESAS

Pedro Abreu

LIP

De 5 a 10 de Setembro de 2010, irá ter lugar no CERN a 4ª Escola de Física para Professores em Língua Portuguesa. Podem candidatar-se professores/educadores/monitores das áreas de Física ou Ciências Físico-Químicas, a trabalhar em Escolas e outras Instituições Portuguesas. Para mais informações (prazos de candidatura, por ex.) por favor consulte a página:

[http://www.lip.pt/cern\\_em\\_portugues/](http://www.lip.pt/cern_em_portugues/)

# Qual resiste mais?

Constança Providência  
Camille Ducoin

Papéis variados testados pelos alunos do 2A da Escola da Solum

## Material

- cliques grandes (tamanho 10)
- papel de várias espessuras
- agrafador
- envelopes de papel
- 50 porcas de tamanho 12 mm
- furador de papel



Fig. 1 - Montagem para testar a resistência do papel

## Resistência do papel

Todos nós temos problemas com as folhas dos dossiers: se não temos cuidado, as folhas acabam sempre por se rasgar, ficando soltas. Mas, afinal o que podemos fazer para evitar que o papel se rasgue?

Propomos-te uma experiência que te permite descobrir qual é o papel mais resistente. Deste modo já sabes qual deverás comprar para não teres tantos problemas com folhas arrancadas.

Faz com um furador um buraco no topo de uma folha e enfia um clipe grande nesse buraco. Na extremidade oposta fixa um envelope de papel com agrafos. Deve ficar bem preso. Pede a um colega para segurar o clipe com a folha pendurada. Com cuidado e lentamente vai deitando porcas para dentro do envelope. Quantas porcas tiveste de deitar até o papel rasgar? Experimenta outros tipos de papel e regista o número de porcas necessárias para



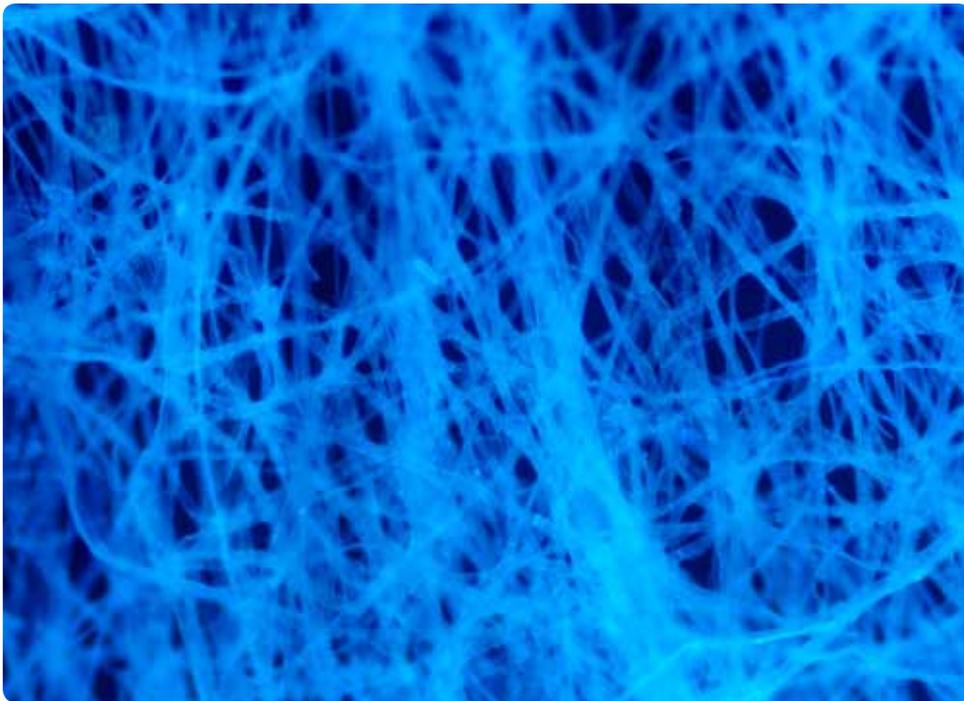


Imagem de um lenço de papel através de um microscópio identificando-se facilmente as fibras do papel (fonte: Wikipedia; autor: Richard Wheeler / Zephyris).

do modo como levantas o papel: se o fizeres lentamente e com cuidado conseguirás levantar o papel sem o rasgar mais vezes do que se o fizeres rapidamente e com movimentos bruscos. Usa sempre o mesmo método ao testares a influência do número de porcas.

Qual é o papel que preferes usar no teu caderno? Agora já percebes em que condições o papel se rasga e o que deves fazer para evitar que ele se rasgue.

O papel é feito de fibras de celulose retiradas da madeira ou de outras plantas. Na figura vêes uma imagem das fibras dum lenço de papel. A palavra papel deriva do termo grego que designava o material utilizado no Antigo Egipto para escrever, o papiro, produzido da planta papiro. Produzem-se vários tipos de papel, uns com fibras mais fortes e outros com fibras mais fracas. Terás de escolher o mais adequado conforme o uso que lhe queiras dar. Certamente que não vais usar para embrulhar uma encomenda o mesmo papel que utilizarias para te assoar.

### Agradecimentos

Esta actividade foi realizada na turma do 2A da Escola EB1 da Solum em Coimbra no âmbito da disciplina Estudo do Meio. Agradecemos a toda a turma e à Professora Conceição Nave o entusiasmo com que exploraram as propriedades do papel.

Número de folhas	Número de porcas
1 folha	14, 11, 14, 15, 14
2 folhas	23, 29, 30, 30, 28
3 folhas	39, 41, 40, 37, 45

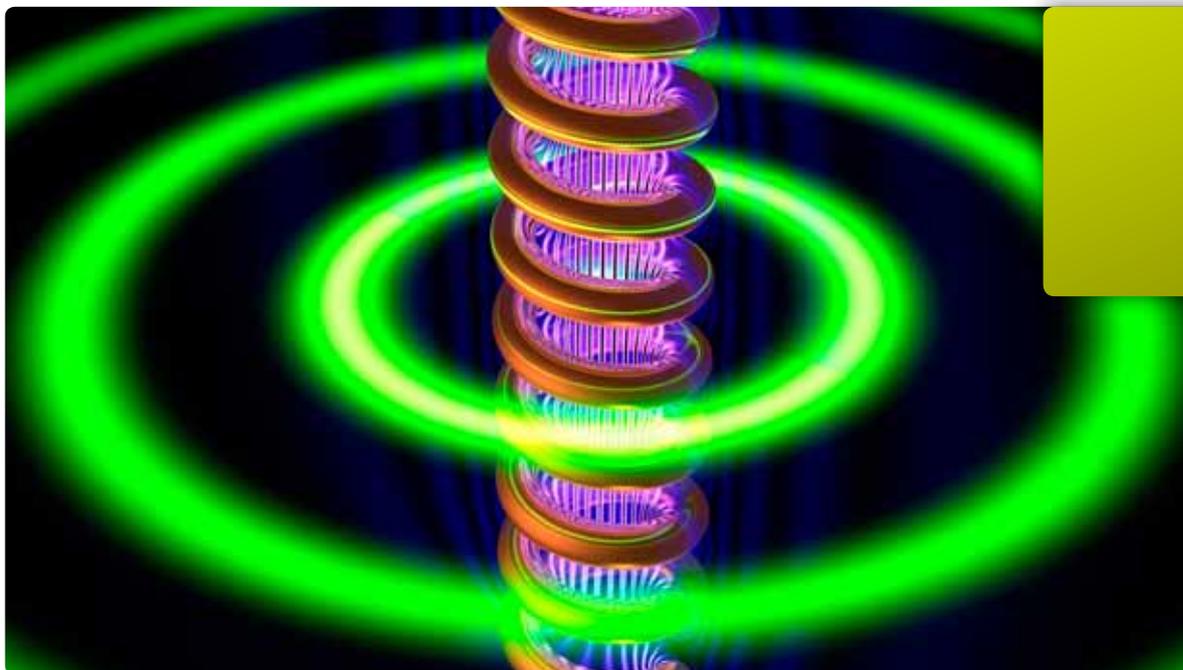
Tabela 2 - Resultados de várias medições da resistência de uma ou mais folhas do mesmo tipo de papel. Foi usado papel de 60g/m<sup>2</sup>.

Número de porcas	Número de vezes levantado
5	204
7	100
9	16

Tabela 3 - Resistência à fadiga em função do número de vezes que o papel é levantado de cima da mesa (método lento). Foi usado papel de 60g/m<sup>2</sup>.

Número de porcas	Número de vezes levantado
5	76
7	50
9	13

Tabela 4 - Resistência à fadiga em função do número de vezes que o papel é levantado de cima da mesa (método rápido). Foi usado papel de 60g/m<sup>2</sup>.



# Efeito de Aharonov-Bohm

Augusto Barroso

É praticamente impossível não iniciar o estudo do electromagnetismo pela electrostática.

Após o estudo da lei de Coulomb é usual definir o campo eléctrico  $\vec{E}$  como uma força por unidade de carga. Como nesta altura os alunos já sabem identificar o que são forças conservativas é fácil, invocando este conceito, introduzir o potencial  $V$ , tal que:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (1)$$

Infelizmente por vezes não se dá o devido relevo ao facto desta equação ser aproximada. De facto, o campo eléctrico não é conservativo. Com efeito, a equação correcta é:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2)$$

em que  $\vec{A}$  é o potencial vector. O rotacional deste vector é o campo magnético  $\vec{B}$ , i. e.,

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \wedge \vec{A}. \quad (3)$$

As equações (2) e (3) dão-nos os campos eléctrico e magnético como derivadas dos potenciais,  $V$  e  $\vec{A}$ . Apesar disso, é usual sublinhar o papel dos campos  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  em detrimento dos potenciais. Alguns livros vão mesmo ao ponto de atribuírem natureza física aos primeiros e relegarem os potenciais para a categoria de grandezas matemáticas auxiliares. Dada uma função  $\chi(t, \vec{r})$ , as transformações

$$\begin{aligned} \vec{A} &\rightarrow \vec{A}' = \vec{A} + \vec{\nabla}\chi \\ V &\rightarrow V' = V - \frac{\partial \chi}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

introduzem novos potenciais  $V'$  e  $\vec{A}'$ . Contudo, a simples substituição destas equações nas equações (2) e (3) mostra que o campo eléctrico e o campo magnético permanecem os mesmos. Esta liberdade na escolha dos potenciais designa-se por liberdade de gauge. O electromagnetismo é pois uma teoria em que existe esta **liberdade de escolha da gauge**. Outras teorias que explicam as interacções forte e fraca gozam também desta propriedade.

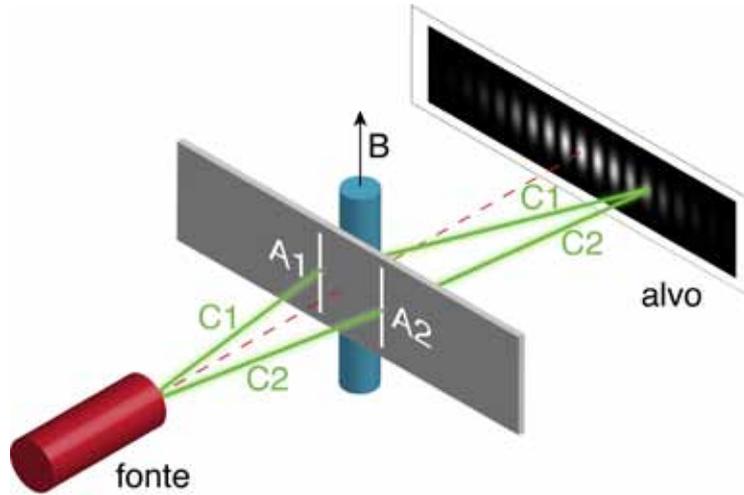
A dinâmica de uma partícula de carga eléctrica e colocada num campo electromagnético é dada pela equação:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}) \quad (5)$$

onde  $\vec{p}$  é o momento linear da partícula e  $\vec{v}$  a sua velocidade. Mais uma vez, os potenciais não aparecem. É este facto que justifica a ideia de que os potenciais **não têm significado físico!**

Para verificarmos que esta ideia é errada, consideremos a partícula de carga e descrita por uma equação quântica. Em vez da eq. (5) teremos agora:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = \left[ \frac{(\vec{p} - e\vec{A})^2}{2m} + eV \right] |\psi\rangle \quad (6)$$



Neste caso, a dinâmica da carga colocada num campo electromagnético depende directamente dos potenciais. Mesmo o leitor menos familiarizado com a mecânica quântica não deixará de reconhecer em (6) a equação de Schrödinger. Apenas lhe recordo que  $\vec{p}$  é agora o operador quântico momento linear,  $\vec{p} = -i\hbar\nabla$ . Se nesta equação usar para  $V$  o potencial devido ao núcleo,  $V = -Ze/r$  e desprezar o termo em  $\vec{A}$ , obtemos a equação na forma em aparece como ponto de partida para o estudo dos átomos. Esse não será o nosso caminho aqui. O nosso objectivo é mostrar que o aparecimento directo dos potenciais na eq. (6) origina um efeito mensurável.

Consideremos então a célebre experiência da dupla fenda realizada com um feixe de electrões. A figura acima ilustra a montagem. Entre as duas fendas  $A_1$  e  $A_2$  existe um solenóide  $B$ , cujo campo magnético no seu interior é perpendicular ao papel. Como sabemos, este campo é nulo no exterior. Na ausência de corrente eléctrica no solenóide, teremos a experiência clássica da dupla fenda. No alvo fluorescente  $P$  aparecem riscas alternadamente claras e escuras, cuja explicação em termos de ondas é muito simples. As ondas que seguem os dois caminhos  $A_1$  ou  $A_2$  chegam ao alvo com uma diferença de fase e interferem. Quando esta diferença é de  $\pi$  existe interferência destrutiva e a amplitude da onda resultante é nula. Pelo contrário, nos pontos onde as duas ondas chegam em fase existe reforço e a amplitude é máxima.

Imaginemos então que estamos a realizar esta experiência e que, para uma dada energia do feixe, determinámos as posições das riscas. Podemos perguntar: o que acontecerá se no solenóide passar corrente eléctrica? À primeira vista poderíamos pensar que tudo ficava na mesma. Com efeito, o solenóide está escondido de trás da parede onde estão as fendas de modo que os electrões não passam no seu interior. Poderemos até reforçar a blindagem do solenóide e fazê-lo suficientemente comprido para que as suas extremidades estejam muito para além da zona da parede atingida pelo feixe incidente. Assim, na zona onde passam os electrões (exterior do solenóide) o campo magnético é nulo. Na verdade o que se observa é que a figura de interferência se altera. Continuamos a ter riscas mas a sua posição não é a mesma. Porquê? Porque para o mesmo ponto do alvo, a diferença de fase já não é a mesma.

A mecânica quântica permite mostrar que existe uma fase adicional  $\phi$  dada por

$$\phi = \frac{ie}{\hbar c} \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS \quad (7)$$

O integral é um integral de superfície calculado sobre a superfície  $S$  limitada pelos caminhos  $c_1$  e  $c_2$ . O valor deste integral é o fluxo do campo magnético através da superfície. É a existência desta fase adicional que altera o espectro de riscas. Este efeito foi previsto em 1959 por Aharonov e Bohm [1] e a primeira experiência foi feita no ano seguinte por Chambers [2].

Comemoramos este ano o cinquentenário desta experiência. Talvez seja tempo dela ser descrita de forma simples nos livros do ensino secundário.

1. Y. Aharonov, D. Bohm, "Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory", *Phys. Rev.* 115, 485 (1959)
2. R. G. Chambers, "Shift of an electron interference pattern by enclosed magnetic flux", *Phys. Rev. Lett.* 5, 3 (1960)

# O recorde para o lançamento do peso não é batido há vinte anos. Estará isso relacionado com a Física?

**Duarte Ferreira dos Santos**

duartecsantos@gmail.com

**Henrique Herculano de Carvalho**

rikehmmc@gmail.com

**João Afonso**

jafonso0@hotmail.com

Externato Marista de Lisboa

Orientação: Prof. Rui Pedro Pinto

**Desde o ano de 1990 que o recorde para o lançamento do peso, no caso das provas destinadas ao sexo masculino, não é batido.**

**Quais as razões para tal fenómeno, se hoje em dia há melhores condições de treino e uma preparação física desportiva mais eficaz?**

**Quais as condições e a posição geográfica no momento desse lançamento que ditou o actual recorde?**

Ao estudar o tema “Física aplicada ao Desporto”, foi desenvolvido um projecto que teve como objectivo avaliar as condições ideais para a prática do lançamento do peso, e avaliar qual é a influência da força de resistência do ar nesta modalidade específica. Ao longo do trabalho foram investigados quais os factores que influenciam a força gravítica, avaliados os factores que possam originar um alcance menor do que o esperado, e analisado um vídeo de um atleta de alta competição para determinar a sua velocidade inicial, e o seu ângulo de lançamento, de forma a verificar se a técnica utilizada foi a mais correcta e as razões para tal, para além da comparação entre valores teóricos e reais. Foi ainda feita uma análise do ângulo de lançamento em função da altura e da necessidade de os atletas desta modalidade serem muito altos.

## A Modalidade

O lançamento do peso é um dos inúmeros desportos nos quais intervêm movimentos de projecteis na atmosfera, sujeitos à força gravítica e a forças relacionadas com as características da nossa atmosfera.

Esta modalidade começou a ser praticada entre os séculos XIII a XII a.C., tendo sido inventada por soldados para ocupação dos tempos livres. No tempo do cerco a Tróia já havia relatos de concursos de lançamento de pedras entre os soldados. No século

XIV d.C., os soldados passaram a usar os projecteis dos canhões de guerra para fazer os lançamentos. Foi este tipo de bola, com cerca de 7,50 quilogramas de peso, que os universitários ingleses adoptaram nos torneios que realizavam em meados do século XIX, jogo que foi o verdadeiro antecessor do actual lançamento do peso (“peso” de 7,26 quilogramas) [6]. O objectivo do lançamento do peso é, conseqüentemente, atirar uma esfera de metal o mais longe possível. A esfera tem de cair dentro de uma área específica. Até finais da década de quarenta, o lançamento era feito com o atleta virado de frente para o campo de lançamento, mas nos anos cinquenta desenvolveu-se um novo estilo, em que o atirador roda 180° a fim de atingir uma maior velocidade de lançamento (nesta altura um pensamento de “físico” provocou uma alteração da técnica). Essa estratégia foi adoptada até aos dias de hoje pela sua notável eficiência.

## Factores que influenciam o lançamento do peso

Um projectil lançado obliquamente está sob o efeito da força gravítica e da força de resistência do ar. Como tal, o valor da força gravítica no momento do lançamento tem uma influência considerável no alcance do projectil. Mas o valor do módulo da força gravítica não é sempre o mesmo? Em cada ponto do planeta existe um valor diferente para a aceleração da gravidade, a partir da qual é calculado o valor da força gravítica (em Lisboa, por exemplo, é de  $9,801 \text{ ms}^{-2}$ ) que está essencialmente dependente de factores como a latitude, a altitude, e até a pressão atmosférica. Mas porque

é que estes factores têm uma influência tão grande? Em primeiro lugar, curiosamente, um dos factores que mais influencia o valor da força gravítica é a latitude a que é efectuado o lançamento. Tendo em conta que a Terra tem uma forma achatada, e que a força gravítica varia inversamente com o quadrado da distância entre o projectil e o centro do planeta (para um sistema com a mesma massa), é fácil concluir que, sendo o raio menor na zona dos pólos, o valor máximo para a aceleração gravítica é obtido precisamente nestas zonas do planeta, com um valor de aproximadamente  $9,830 \text{ ms}^{-2}$ . Contrariamente ao que acontece nos pólos, a zona do planeta na qual a distância ao centro é maior é a zona do Equador, diminuindo o valor da aceleração da gravidade no local, que passará a ser de  $9,780 \text{ ms}^{-2}$ . Assim, dado que a aceleração gravítica varia entre  $9,780 \text{ ms}^{-2}$  e  $9,830 \text{ ms}^{-2}$ , no Equador o valor do alcance devia ser superior para a mesma massa, se o único factor condicionante fosse a latitude.

Em segundo lugar, outro dos factores que também influencia o valor da força gravítica é a altitude a que é efectuado o lançamento. Pelas mesmas razões apresentadas no caso anterior, é fácil concluir que quanto maior for a altitude no momento do lançamento, maior será a distância entre o centro do planeta e o projectil, e como tal, menor será o valor da aceleração da gravidade e consequentemente o módulo da força gravítica. Ou seja, o valor do alcance para uma mesma massa devia ser superior no cimo de uma montanha.

Há uma série de outros factores que, curiosamente, se descobriu também terem alguma influência no valor da força gravítica, tais como a topografia e geologia dos locais de lançamento – a presença de sistemas montanhosos na envolvente ou mesmo a densidade das rochas existentes no local – rochas densas, com minerais, aumentam o valor da aceleração da gravidade. (Hill, P.; Bankey, V. & Langenheim, V., 1997). A correcção de Bouguer é um exemplo de uma correcção feita caso a medição esteja sujeita à interferência de uma montanha. [4]

Para além da força gravítica, a força de resistência do ar é, sem dúvida nenhuma, outro dos inúmeros factores capazes de influenciar um lançamento oblíquo como é o caso do lançamento do peso. Mas afinal, qual é a real influência da força de resistência do ar num lançamento como o do peso? Em primeiro lugar, é necessário compreender que o módulo desta força depende do quadrado da velocidade ( $v^2$ ) com que o corpo é lançado, do coeficiente aerodinâmico do corpo ( $c$ ) em questão (para uma esfera como o caso do peso é de aproximadamente 0,50, para um camião é de aproximadamente 0,90), e ainda da densidade ou massa volúmica do ar ( $\mu$ ) no momento de lançamento e da área da secção recta do projectil ( $A$ ) na direcção perpendicular à do movimento. A seguinte expressão relaciona as grandezas anteriormente enumeradas, permitindo calcular a força de resistência do ar num determinado momento do movimento do projectil.

$$F = \frac{1}{2} c \mu A v^2$$

Ou seja, tendo em conta que a velocidade de lançamento do peso é relativamente baixa, e que o seu coeficiente, por ser uma esfera, é também ele relativamente baixo, a força de resistência do ar acaba por não ter, teoricamente, muita influência no alcance do corpo, sendo por isso normalmente desprezada. Mas será realmente assim?

Por último, provavelmente o factor mais importante é o ângulo com que o projectil é lançado. De facto, é possível verificar que se o atleta lançar o peso com um ângulo muito baixo (próximo de  $0^\circ$ ) ou muito alto (próximo de  $90^\circ$ ) o alcance que irá obter será muito diferente do obtido se o atleta lançar com um ângulo próximo dos  $45^\circ$ , que permite a obtenção de muito melhores resultados. Desprezando a resistência do ar, esse ângulo pode ser obtido da forma descrita em baixo, sendo que o máximo da expressão ocorrerá quando  $\sin 2\theta = 1$ . Assim, o ângulo para o qual o alcance é máximo é  $45^\circ$ .

$$\begin{aligned} & \begin{cases} y = y_0 + v_0 \sin(\theta)t + \frac{1}{2} at^2 \\ x = x_0 + v_0 \cos(\theta)t + \frac{1}{2} at^2 \end{cases} \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \begin{cases} 0 = v_0 \sin(\theta)t - \frac{1}{2} gt^2 \\ x = v_0 \cos(\theta)t \end{cases} \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow \begin{cases} t = \frac{2v_0 \sin(\theta)}{g} \\ x = \frac{2v_0^2 \sin(\theta) \cos(\theta)}{g} \end{cases} \Leftrightarrow \\ & \Leftrightarrow x = \frac{v_0^2 \sin(2\theta)}{g} \end{aligned}$$

Sendo  $x$  a posição do corpo em  $xx$  (m),  $x_0$  a posição inicial em  $xx$  (m),  $V_0$  a velocidade inicial (m/s),  $y_0$  a altura inicial (m),  $y$  a altura (m),  $t$  o tempo de voo (s) e  $a$  a aceleração (da gravidade neste caso,  $g$ ) ( $\text{ms}^{-2}$ ).

### Análise dos recordes mundiais e de um atleta

Tendo em conta os cinco últimos recordes, procedeu-se a uma análise de qual foram os locais de lançamento, a sua latitude e altitude, de forma a investigar se algum dado interessante poderia estar relacionado com tal fenómeno. Os resultados foram os apresentados na Tabela 1 (IAAF, 2009).

Observando a tabela de pesquisas, verificamos que, tendo em conta os factores que influenciam o lançamento apresentados anteriormente, a latitude, nos cinco lançamentos mais longos, não parece ter influenciado os resultados (todos os lançamentos foram efectuados a latitudes médias).

Contudo, o lançamento mais longo jamais efectuado decorreu em 1990 a 1563 metros de altitude. Este facto, bastante curioso, não foi, obviamente, o principal responsável, mas tendo em conta que a diferença entre os dois principais recordes é de 0,06 m, a altitude pode perfeitamente ter sido a chave do sucesso.

Result.	Atleta	Nacionalidade	Local	Latitude	Altitude	Ano
<b>23,12 m</b>	<b>Randy Barnes</b>	<b>EUA</b>	<b>Westwood, E.U.A</b>	<b>40° 3'</b>	<b>1563,00 m</b>	<b>1990</b>
23,06 m	Ulf Timmermann	Alemanha	Chania, Grécia	35° 3'	1,00 m	1988
22,91 m	Alessandro Andrei	Itália	Viareggio, Itália	43° 9'	3,00 m	1987
22,84 m	Alessandro Andrei	Itália	Viareggio, Itália	43° 9'	3,00 m	1987
22,72 m	Alessandro Andrei	Itália	Viareggio, Itália	43° 9'	3,00 m	1987

Tabela 1 - Recordes Mundiais (IAAF) [7]

De forma a investigar quais as razões que levam a que o recorde do lançamento do peso não seja batido há vinte anos, decidimos analisar um vídeo de um atleta de alta competição [5], conseguindo obter dados reais para o ângulo de lançamento, velocidade inicial e comparar com os valores teóricos. O atleta analisado foi Christian Cantwell, no lançamento que foi o seu recorde pessoal, de 22,54 m, e um dos dez recordes mundiais. Para a análise, investigou-se qual é a altura do atleta, que é 1,98 m, de forma a ter uma escala para a análise do vídeo. Através dos três fotogramas apresentados de seguida, foi possível obter dados para a velocidade inicial do projectil e para o ângulo de lançamento do mesmo. Cada fotograma tem a duração de 1/30 de segundo.



Tendo em conta uma altura do atleta de aproximadamente dois metros (1,98 m), e medindo a distância percorrida pelo peso entre os fotogramas 1 e 2, 0,50 m, calcula-se a velocidade inicial do lançamento: 15,0 m/s. Através da análise do fotograma 3, mediu-se geometricamente o ângulo, tendo o solo como referência, sendo o ângulo de lançamento de aproximadamente 37°. Utilizando um simulador, o alcance obtido teoricamente seria de 24,10 metros. Tendo em conta que o lançamento deste atleta teve como alcance real a distância de 22,54 metros, a diferença entre o valor real e o valor teórico foi de 1,56 metros, diferença bastante aceitável tendo em conta que a análise que foi feita ao lançamento é pouco rigorosa, e que as condições no dia do lançamento são diferentes das teóricas.

### A altura do atleta e o alcance

Curiosamente, quando se observa a altura dos atletas de lançamento do peso, conclui-se que provavelmente não haverá nenhum atleta com menos do que 1,90 metros de altura. De facto, não é de descurar a altura do atleta pois, curiosamente,

chega-se à conclusão que atletas com uma altura maior têm tendência a obter melhores resultados do que os atletas mais baixos.

Utilizando o programa '*lançamento com resistencia.exe*', mencionado na secção 'Programas informáticos para o efeito', foram feitos cálculos para estabelecer a relação entre a altura de ombro do atleta e o alcance máximo (para a mesma velocidade de lançamento e considerando o ângulo ideal para cada altura diferente, demonstrado na secção 'Análise do ângulo de lançamento para cada altura'):

Altura (m)	Alcance (m)
1,00	23,76
1,10	23,85
1,20	23,95
1,30	24,04
1,40	24,14
1,50	24,23
1,60	24,33
1,70	24,42
1,80	24,51
1,90	24,60
2,00	24,70

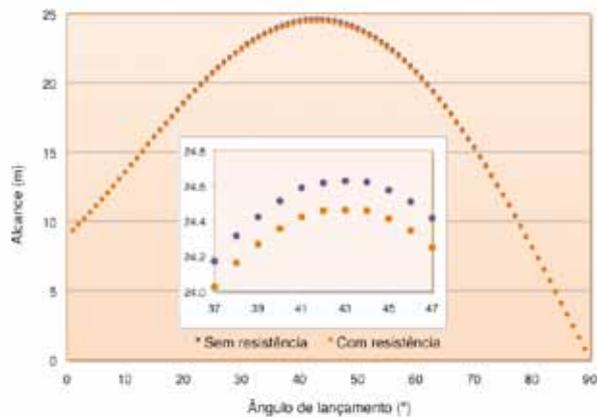
Mas como é que se explica esta diferença de alcance? Se a posição dos atletas em xx é exactamente igual, um projectil que seja lançado com uma altura superior terá um tempo de voo também ele superior, e essa pequena diferença no tempo provocará também uma diferença no alcance do projectil, constituindo um pormenor extremamente relevante.

Análise do melhor ângulo para o lançamento do peso  
Considerando as condições obtidas na análise ao vídeo, procedeu-se à investigação de qual seria o melhor ângulo para o lançamento desse atleta, com e sem resistência do ar (utilizando o programa '*bestangle.exe*', também mencionado na secção 'Programas informáticos para o efeito', que permitiu a obtenção do alcance de um peso lançado por um atleta de 1,75 m, com a mesma velocidade inicial de 15 m/s, a diferentes ângulos):

O ângulo para o qual o alcance é maior é um ângulo de 43°. Contudo, tendo em conta a expressão apresentada ante-

Ângulo (°)	Com resistência do ar	Sem resistência do ar
47	24,248	24,414
46	24,345	24,509
45	24,412	24,574
44	24,458	24,620
<b>43</b>	<b>24,463</b>	<b>24,628</b>
42	24,459	24,614
41	24,423	24,588
40	24,356	24,513

riormente, o ângulo ideal seria de 45°. Porquê esta diferença? Ora, está a considerar-se uma altura de lançamento de 1,75 metros, e o ângulo de 45° seria sim o ideal se a altura de lançamento fosse ao nível do solo. Por outro lado, observa-se que existe, de facto, uma ligeira diferença entre os lançamentos no qual é considerada a força de resistência do ar e os que não a consideram. Para uma melhor análise e compreensão destes dados, procedeu-se ao traçado de dois gráficos (altura de ombro 1,75 m), a partir dos dados obtidos pelo mesmo programa, em que são comparados os alcances do peso (por um atleta de 1,75 m, a uma velocidade de 15 m/s), lançado a 90 ângulos diferentes (de 0 a 89 graus). Com estes dados é possível obter uma linha, cujo máximo se encontra nos 43°, com e sem resistência do ar (o gráfico pequeno inserido representa os resultados entre 37 e 47 graus, para maior clareza):



### Optimização do ângulo de lançamento para cada altura

Na análise que foi feita, concluiu-se que, como a altura inicial não é a altura ao nível do solo, o valor do ângulo ideal não seria 45°. Mas qual será afinal o melhor ângulo para cada altura? E haverá alguma relação de proporcionalidade entre ângulo ideal e altura? Para responder a esta questão, usando programa *'bestangle.exe'*, testou-se qual o ângulo ideal para atletas com diferentes alturas, com uma velocidade de lançamento igual, a partir do qual se obteve a seguinte tabela: Analisando a tabela pode concluir-se que quanto mais alto for o atleta, menor será o ângulo ideal para o lançamento do peso. A que se deve este facto? Sendo a altura inicial superior, o projectil estará mais tempo no ar sem que seja necessário imprimir uma componente vertical da velocidade tão elevada ( $v_y$ ) no momento de lançamento. Se o atleta não

Altura (m)	Ângulo ideal (°)
1,00	43,6
1,10	43,4
1,20	43,2
1,30	43,2
1,40	43,2
1,50	43,2
1,60	43,0
1,70	42,9
1,80	42,8
1,90	42,4
2,00	42,4

tem de imprimir uma velocidade vertical tão elevada, poderá otimizar a sua força para imprimir uma velocidade horizontal superior ( $v_x$ ) que fará o alcance ser superior. Assim se explica que atletas mais altos obtenham melhores resultados e que o ângulo ideal de lançamento seja tanto menor quanto maior for a altura do atleta, pois este poderá imprimir uma velocidade horizontal superior ao projectil por já não necessitar de uma velocidade vertical tão elevada (diminuindo o ângulo de lançamento) [3] Desta forma, é possível alertar para a importância do pormenor de que, quando se fala de um ângulo ideal na ordem dos 45°, esses dados são para uma altura ao nível do solo, pois se a altura de lançamento for superior ao mesmo, o ângulo ideal irá variar, tendo de ser optimizado em função da tabela anterior.

Contudo, há outro pormenor que não pode deixar de ser referido. O atleta, ao imprimir uma força que provoque uma aceleração na componente vertical ( $a_y$ ), vai ter que contrariar a força do peso, pelo que terá de gastar mais energia para aumentar a velocidade vertical. No entanto, para acelerar o peso na componente horizontal ( $a_x$ ) ele não tem que contrariar a força gravítica, pelo que conseguirá mais facilmente atingir uma maior velocidade. Assim, na prática, os atletas conseguirão um maior rendimento da força aplicada sobre o peso se diminuírem um pouco mais o ângulo, para valores próximos de 35° [3], para além de que, sendo os atletas altos, a altura inicial será superior e, como já foi referido, não será necessária uma componente vertical de velocidade tão elevada, podendo o atleta focar-se na componente horizontal. Estes dois factores estão assim intrinsecamente ligados um ao outro.

Um aspecto a salientar é que os programas criados para este projecto (como o *'bestangle.exe'*) apenas têm em conta a velocidade com que o projectil é lançado, pelo que a variável da força imprimida pelo atleta não é tida em conta. Assim, os ângulos dados (aproximadamente 43°, segundo a tabela) serão superiores aos ângulos ideais reais pois a componente da força do atleta também adquire uma importância extrema.

## Programas informáticos para o efeito

Uma das dificuldades encontradas durante a realização do projecto foi a de conjugar as expressões matemáticas da força de resistência do ar com as do movimento e da distância percorrida pelo peso. Tal deve-se ao facto de a resistência do ar e a velocidade se influenciarem mutuamente, alterando-se ao longo do tempo. Assim, apesar de ser possível calcular a velocidade e a força de resistência do ar para um determinado instante, tornou-se muito difícil definir com exactidão os valores da trajectória, ao longo do tempo de voo (tendo em conta o programa leccionado no ensino secundário).

Para se solucionar o problema, utilizou-se uma abordagem diferente: procedeu-se à criação de alguns programas informáticos, em linguagem C, para calcular a posição do peso a cada milissegundo do voo, assim como o valor das forças que actuam sobre ele em cada um desses instantes. Deste modo conseguiu-se uma simulação muito próxima da variação dos valores da resistência do ar e da velocidade do peso ao longo do tempo de voo do projectil. Os cálculos foram efectuados pelo computador da seguinte forma: num determinado instante do voo (como por exemplo o instante 0 ms - instante exacto em que o atleta larga a esfera), o programa, tendo os dados sobre o vector velocidade do corpo, calcula o valor da resistência do ar para esse mesmo instante (utilizando também os valores da massa volúmica do ar, do coeficiente aerodinâmico do corpo e da área da sua secção recta).

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} c\mu Av^2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow ma &= \frac{1}{2} c\mu Av^2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow a &= \frac{c\mu Av^2}{2m} \end{aligned}$$

A partir do valor obtido, e tendo também em conta a aceleração gravítica, calcula o módulo, direcção e sentido do vector aceleração aplicado ao corpo nesse momento.

Tendo os dados sobre a posição e sobre os vectores velocidade e aceleração, é calculada para o instante seguinte (1 ms, seguindo o exemplo): a posição, utilizando uma expressão do género  $x=x_1+v_1t+0,5a_1t^2$  e a velocidade, segundo a expressão  $v=v_1+at$ .

Tendo obtido estes novos dados sobre a posição e a velocidade, o computador inicia um ciclo idêntico de cálculos, processando os dados para o instante seguinte (ex: 2 ms) e assim sucessivamente, até ao momento em que o corpo atinge o limite definido como o solo, terminando-se assim o ciclo de cálculos.

Deste modo, por se conseguirem realizar estes milhares de operações por segundo num computador de gama média, obtêm-se dados sobre o que seria a trajectória num lançamento real do peso, sob mesmas circunstâncias.

Utilizando este método de cálculo nos programas que foram criados, foi possível obter vários dados importantes para o projecto, através de quais se destacam, entre outros, o alcance (a partir do programa *'lançamento com resistencia.exe'*) e o ângulo ideal para o qual o atleta consegue otimizar a sua força (a partir do programa *'bestangle.exe'*).

## Conclusões

O lançamento do peso, cujo recorde não é batido há vinte anos, é influenciado por uma série de forças, nomeadamente a força gravítica que actua no projectil e a força de resistência do ar (que neste caso específico não tem muita influência). Ao analisar os dados obtidos concluímos que a razão de os atletas desta modalidade serem sempre muito altos se relaciona com o facto de quanto mais alto for o atleta, maior o alcance do peso, com uma velocidade igual e um ângulo ideal que permite que o atleta aplique a sua força essencialmente no plano horizontal no qual é mais fácil imprimir aceleração ao projectil (sendo o atleta mais alto, a componente vertical da velocidade não terá de ser tão elevada).

Deste modo, o ângulo ideal, tendo em conta todos os factores, rondará os 35° para atletas mais altos, permitindo que a componente horizontal da velocidade seja superior, aumentando o alcance do projectil. Foram desta forma analisadas todas as componentes que influenciam o alcance do peso consoante a altura do atleta.

Através deste trabalho de investigação foi possível utilizar os conhecimentos teóricos sobre projecteis para um estudo aprofundado de uma situação real como é o lançamento do peso. Quem sabe se a razão de o recorde não ser batido há tanto tempo não está no pouco pensamento “físico” dos atletas?

## Agradecimentos

Ao professor Rui Pedro Pinto, pela orientação deste projecto, à professora Teresa Tasso de Figueiredo e ao Externato Marista de Lisboa.

1. G. Ariel, “Biomechanical Analysis of the Shot-Put Event at the 2004 Athens Olympic Games”. Institute for Biomechanical Research, Coto Research Center, California (2005).
2. V. Bankey, P. Hill e V. Langenheim, “Introduction to Potential Fields: Gravity.” United States Geological Survey, Denver, Estados Unidos da América (1997).
3. McGinnis, “Biomechanics of Sport and Exercise”. p. 71-74. Human Kinetics: Estados Unidos da América (1999).
4. R. Vajk, “Bouguer Corrections With Varying Surface Density”. Standard Oil Company (N.J.), New York City (1956). In Geophysics - Volume 21, Issue 4.
5. Vídeo do lançamento: <http://www.youtube.com/watch?v=M5jpErXKvvg> YouTube®. Consultado em 2 de Dezembro de 2009.
6. História da modalidade: [http://www.infopedia.pt/\\$lançamento-do-peso](http://www.infopedia.pt/$lançamento-do-peso) - consultado em 5 de Dezembro de 2009.
7. IAAF - Recordes oficiais das modalidades de Atletismo, 2009, pág. 557.

# Planetário portátil



A Escola Cooperativa de Vale S. Cosme – Didáxis uniu-se também à celebração do Ano Internacional da Astronomia (AIA 2009) cuja sessão de encerramento de actividades em Portugal será no dia 17 de Março. Decorreram um conjunto de sessões sobre Astronomia num planetário portátil, destinadas aos alunos do 7º ano de escolaridade, após a celebração de um protocolo de colaboração entre a escola e o Centro de Astrofísica da Universidade do Porto (CAUP) colocando o projecto Astronomia nas Escolas mais uma vez em acção.



Os alunos assistiram a sessões orientadas por dois monitores que fizeram uma viagem guiada pelo Sistema Solar, o que permitiu a ampliação dos seus conhecimentos sobre as características de cada planeta, assim como uma visão de um céu luminoso com milhares de estrelas, abordando também diversos temas específicos da Astronomia. A exploração do Universo foi uma importante referência: desde as observações efectuadas por Galileu há 400 anos com a sua luneta até hoje, por exemplo, ao telescópio VLT construído pelo ESO, ocorreu uma grande evolução que permitiu aos astrónomos revelar alguns dos segredos do Universo, formação estelar, classificação e evolução galáctica e a dimensão do próprio Universo.



Numa viagem de 40 minutos, os monitores, em diálogo com os alunos, ajudaram-nos a descobrir o nosso Universo!



## PLANETÁRIO PORTÁTIL – OPINIÃO DOS ALUNOS

Eu achei o Planetário Portátil muito giro pois deu para compreender melhor os conceitos que estava a estudar nas aulas. Consegui saber mais sobre o Universo que nos rodeia, sobre a sua origem, características dos todos os planetas do Sistema Solar, etc. Eu simplesmente adorei...

Daniela Fernandes

Foi uma tarde de conhecimento onde todos saíram mais enriquecidos – adorei!

Inês Machado

Gostei muito do planetário e aprendi bastante. Foi uma experiência engraçada, embora já tenha participado no 5º ano. Mas de resto foi bom e não me importava de repetir. Se houver mais actividades educativas, vou sempre que puder.

Ana Filipa Peixoto

Eu gostei particularmente da ideia que tiveram de fazer um insuflável redondo! Gostei muito de fazer uma visita pelo Universo sem ter de sair da escola.

Daniela Alves

Gostei muito de ir ao planetário! Gosto de saber cada vez mais de Astronomia, de saber mais curiosidades sobre planetas, estrelas, espaço...Gostei da apresentação dos nossos guias, a forma de apresentar e também a facilidade de entusiasmar sobre a astronomia. Aprendi muito com esta visita ao planetário, e gostava de repetir a experiência.

Francisca Antunes

Gostei de ver as estrelas e de aprender mais sobre os planetas. Só fiquei desconfortável com o pesoço de olhar para cima, mas o que podiam eles fazer? Mas de resto foi uma excelente actividade.

Ângela Vieira

Achei maravilhoso, e ainda por cima os instrutores eram muito simpáticos. Algumas das imagens que nós estivemos a ver sobre o sistema solar pareciam bolachas Choco Flakes com leite, outras pareciam a praia entre muitas outras coisas. Foi uma actividade muito interessante e valeu também a pena ter perdido a minha tarde de sexta-feira livre, mas aprendemos muitas coisas novas e também nos divertimos muito. Adorei!

Ana Pinto

Eu adorei participar no Planetário Portátil pois permitiu-me esclarecer algumas dúvidas. Recomendo a participação de todos pois é uma experiência única.

Ana Patrícia

Gostei de participar nesta actividade pelo facto de me ajudar a compreender melhor os temas abordados nas aulas de Físico-Química. Não me importava de repetir.

Hélder Magalhães

# Uma vida entre prismas

Gonçalo Figueira

**Newton afirmou que, se viu mais além, foi por que subiu aos ombros de gigantes. Do grande físico americano Robert W. Wood poderia dizer-se, num espírito mais prático, que viu mais além por ter utilizado as técnicas fotográficas, películas e filtros adequados.**

Este ano celebra-se o centenário de uma das suas mais importantes contribuições para a ciência: em Outubro de 1910 foram publicadas as primeiras fotografias no infravermelho, obtidas por Wood. Ele foi o primeiro a conjugar as técnicas necessárias para as realizar, e a reconhecer a importância de registar a informação para lá do visível. A Royal Photographic Society – cuja revista publicou as fotografias de Wood – coordena as comemorações do centenário, período durante o qual a fotografia de infravermelhos se expandiu para fora do laboratório, tornando-se uma forma de arte com um grande número de adeptos.

Wood é também considerado o “pai” da fotografia no ultravioleta: inventou um filtro específico (filtro de Wood), e uma lâmpada nessa zona espectral (lâmpada de Wood), usada em dermatologia; foi o primeiro a fotografar a fluorescência de ultravioletas, e descobriu a ressonância de fluorescência. Alcançou uma notável reputação internacional pelo seus vastos conhecimentos de óptica e espectroscopia, profunda curiosidade e criatividade, e pela invulgar capacidade para visualizar e conceber uma experiência engenhosa e elegante.

Wood provavelmente teria tido uma carreira de sucesso em qualquer área científica; o facto de o ter alcançado na óptica é quase fruto do acaso. Nasceu em 1868, começou por estudar para padre,

mas o interesse pelo mundo natural depressa se sobrepôs à vocação. Estudou química em Harvard, concluindo o curso em 1891. Passou depois pelas universidades Johns Hopkins e de Chicago, com a intenção de se doutorar em química, mas o seu interesse pela física começou a crescer; acabaria por desistir do doutoramento. Quando, anos mais tarde, conseguiu uma posição de assistente na Universidade do Wiconsin, foi-lhe pedido que desse aulas de óptica física – assunto que jamais tinha estudado. Durante um ano inteiro, estudou por conta própria, usando os manuais da época. Insatisfeito com a falta de actualidade destes, decidiu escrever o seu próprio livro, o que lhe demorou cinco anos: “Physical optics”, terminado em 1905, tornou-se um clássico, traduzido em múltiplos idiomas, e ainda hoje editado.

Os interesses de Wood abrangeram muitos outros para além da física, incluindo as artes, a arqueologia, a psicologia e o desmascaramento das pseudo-ciências. Escreveu um livro de ficção científica e outro de versos para crianças. Era famoso pela vivacidade e entusiasmo das suas apresentações públicas, em que transmitia a mensagem de que a ciência pode ser extremamente divertida. Ele certamente sempre a encarou assim, dentro e fora do laboratório – mesmo adulto, adorava pregar partidas aos colegas.

## O mistério dos raios-N

Um dos episódios mais insólitos e célebres em que Wood participou terá sido a sua contribuição fulcral para resolver o mistério dos chamados raios-N. Nunca ouviu falar destes raios? Não se preocupe: é que eles simplesmente não existem. Mas durante cerca de um ano houve muita gente ilustre que julgou o contrário. É sempre útil e educativo revistar este curioso incidente da história da física.

Após a descoberta dos raios-x por Röntgen, em 1895, e das emissões radioactivas alfa, beta e gama nos cinco anos seguintes, os físicos estavam autenticamente num estado excitado: existiam formas de radiação desconhecidas até então, e não seria de estranhar que aparecessem outras

ainda não detectadas. Assim, foi com naturalidade que o mundo reagiu ao anúncio do francês René Blondlot de que tinha encontrado um novo tipo de radiação, que baptizou de raios-N.

Blondlot, da Universidade de Nancy (daí a escolha do “N”), era um físico altamente reputado, membro da Academia de Ciências francesa, e com larga experiência no estudo do espectro electromagnético. Tal como muitos colegas seus contemporâneos, estava empenhado na exploração das propriedades dos (então novos) raios-x. Em particular, o problema que se propôs estudar era de grande importância para a física do início do século XX: os raios-x seriam ondas ou partículas?

Foi em 1903, no decorrer de uma experiência para tentar perceber se os raios-x podiam ser polarizados, que Blondlot fez aquela que pensou ser a maior descoberta da sua vida. A sua montagem consistia num par de finos eléctrodos entre os quais brilhava uma pequena faísca rectilínea, que era atravessada pelo feixe de raios-x. A direcção da faísca podia ser orientada em torno do eixo do feixe; Blondlot pensou que se os raios-x fossem polarizados, quando a faísca atravessasse o plano de polarização o seu brilho aumentaria. E foi precisamente o que pensou ter observado, para sua grande satisfação. Só que, sendo um físico cauteloso, quis certificar-se que eram realmente os raios-x, e não outra forma de radiação electromagnética, que estavam a causar o efeito. O teste podia ser feito colocando um prisma de quartzo no caminho do feixe, que desviaria as outras formas de luz, deixando passar os raios-x. Infelizmente, a radiação que estava a fazer a faísca brilhar foi desviada: tinha que ser outra coisa qualquer. Após mais alguns testes que descartaram outras possibilidades, Blondlot ficou convencido – erradamente – de que acabara de descobrir algo completamente novo. Tinha nascido os raios-N.

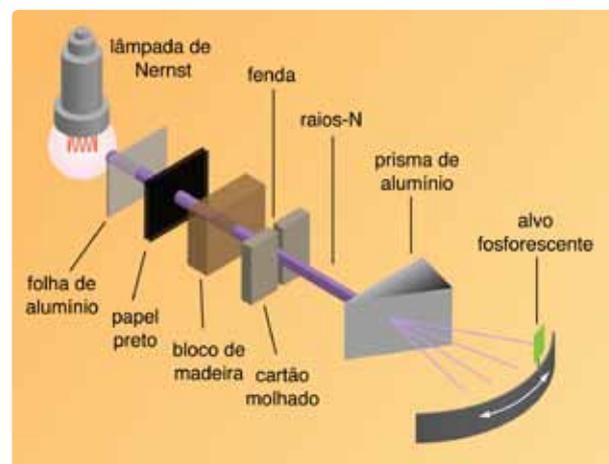
A notícia foi acolhida com grande entusiasmo, sobretudo em França – afinal, era a orgulhosa resposta nacional a Röntgen e aos alemães. A investigação em raios-N disparou, e espalhou-se a químicos, médicos e biólogos. As fascinantes propriedades destes novos raios deram lugar a dezenas de artigos em revistas respeitadas. Aparentemente, havia um grande número de fontes de raios-N, incluindo o sol, os vegetais, e até o corpo humano. Os raios atravessavam metal e madeira, mas eram bloqueados pela água. Em 1904, no auge da febre, Blondlot recebeu o prestigioso Prémio Leconte da Academia Francesa, em reconhecimento da sua brilhante carreira de cientista.

No estrangeiro, contudo, o panorama era mais morno. Cientistas europeus e americanos – incluindo, por exemplo, Kelvin e Crookes – admitiram que eram incapazes de repetir as experiências de Blondlot. O acumular de insucessos levou a que a desconfiança começasse a tomar forma: aparentemente, havia um novo fenómeno físico que só funcionava em França...

É aqui que entra Wood. Inicialmente interessado nos novos raios, desistiu de continuar a fazer experiências depois de, conforme conta, ter desperdiçado “uma manhã inteira” com o assunto... Em Setembro de 1904, incitado pelos colegas, decidiu fazer uma viagem a Nancy para assistir a uma demonstração com os seus próprios olhos. Blondlot

recebeu-o e mostrou-lhe algumas das experiências mais famosas, com as quais tinha obtido os resultados mais badalados. Wood achou que as medições tinham uma forte influência subjectiva, e não ficou convencido.

A dada altura, foi-lhe mostrado um espectrómetro de raios-N, com o qual Blondlot afirmava ser capaz de medir com grande precisão o espectro de riscas da radiação-N (ver figura). O aparelho consistia num emissor de raios, que eram desviados por um prisma de alumínio (recordemos que os raios-N atravessam metal) em direcção a um alvo, formado por um cartão com um risco de tinta fosforescente montado num suporte circular. À medida que o cartão era rodado em torno do prisma, usando um parafuso de precisão, a risca fosforescente brilharia nas posições correspondentes aos picos do espectro. O brilho era muito ténue, pelo que a experiência tinha que se fazer praticamente às escuras. Blondlot garantiu que, com este método, conseguia detectar estas posições com uma precisão de 0,1 milímetros. Wood observou a montagem e, vendo que a abertura da fenda do emissor por onde saíam os raios tinha cerca de 2 milímetros, perguntou-lhe como era possível tamanha resolução. Blondlot não se atrapalhou e tranquilizou-o: “é uma coisa fascinante que estes raios têm – é que não seguem as leis conhecidas da ciência, é preciso tratá-los como uma coisa à parte, e ir descobrindo as suas próprias leis”.



Espectrómetro de raios-N (ilustração baseada em I. M. Klotz, 1980)

Por esta altura, Wood estava fortemente desconfiado e decidiu fazer um teste radical. Começou por pedir para ver novamente como é que faziam as medições. Assim que se apagou a luz, e antes que Blondlot começasse a rodar o parafuso, Wood estendeu a mão em direcção ao prisma de alumínio e, num gesto rápido e dissimulado... meteu-o no bolso. Blondlot repetiu os mesmos valores precisos, sem dar por nada. No final, ainda às escuras, Wood recolocou o prisma e, satisfeito com as suas observações, agradeceu e despediu-se. No dia seguinte escreveu um artigo de duas páginas para a revista Nature, a relatar as conclusões da visita. Segundo ele, toda esta história tinha resultado da predisposi-

ção de cientistas mais crédulos para observarem uma coisa que já estavam à espera de observar, levando-os a desleixar o cuidado nas medições: uma espécie de “crer para ver”. Blondlot não era decerto um charlatão, mas apenas a primeira vítima da ilusão.

Um observador imparcial concluiria que quer as variações de brilho da fásca, quer o aumento de luminosidade da tira fosforescente eram demasiado fracos e irregulares para se poder chegar a uma conclusão tão extraordinária. Blondlot simplesmente tinha andado a enganar-se a si próprio, escolhendo inconscientemente as medições que confirmavam as suas convicções e “corrigindo” aquelas que as contrariavam. É certamente uma lição histórica a reter por todos os praticantes de ciência experimental quando chega a hora de interpretar os resultados do laboratório. O estratagema de Wood e o seu veredicto foram suficientes para condenar à morte a investigação em raios-N – que, curiosamente, começou com um prisma e acabou por causa de outro.

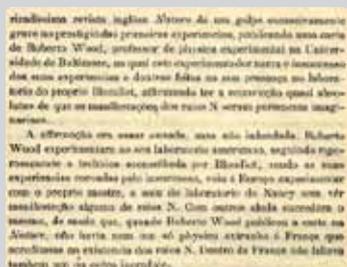
## Legado

Robert Wood viria a receber muitas distinções ao longo da vida, entre prémios e medalhas, e veio mesmo a dar o seu nome a uma cratera na face oculta da Lua. Foi nomeado para o prémio Nobel da física em 1930, junto com C. V. Raman. Em 1933 recebeu a medalha Frederic Ives, a mais elevada condecoração da Sociedade Americana de Óptica. Em 1975, no vigésimo aniversário da sua morte e em sua homenagem, esta sociedade criou o Prémio Robert W. Wood: “em reconhecimento de uma descoberta, invenção, ou feito científico ou tecnológico notáveis”. Difícilmente se encontraria alguém mais adequado para esta descrição.

## Para saber mais:

- Irving M. Klotz, “The N-ray affair”, Scientific American 242, 168 (Maio 1980)
- William Seabrook, “Dr. Wood: Modern wizard of the laboratory”, Harcourt Brace (1941).
- G. H. Dieke, “Robert W. Wood (1868-1955) – A biographical memoir”, National Academy of Sciences (reimpressão), 1993
- Barry R. Masters, “Robert W. Wood: the scientist who played with optics”, Optics and Photonics News 20, 42 (Out. 2009)
- Langmuir, “Pathological science”, Physics Today 42, 36 (Out. 1989)
- Robert W. Wood, “The N-rays”, Nature 70, (1904) 530-531.

## Os raios N vistos de Portugal



Apesar de por cá não haver registo de experiências com raios N, o assunto foi divulgado na imprensa da época, que acompanhou a polémica em detalhe. Em Abril de 1905, escreve

Amadeu de Vasconcelos (usando o seu pseudónimo “Mariotte”) [1]:

*“Ha já longos meses que o mundo scientifico tem a attenção presa a um importante problema que marcará um acontecimento sensacional na historia das sciencias. Existem os raios N? Tal é a momentosa questão scientifica que ha mêses sobreleva... todas as outras.”*

O artigo prossegue ao longo de várias páginas fazendo uma detalhada cronologia dos sucessivos episódios da história, desde a sua descoberta e fulgurante ascensão, até à dúvida e estrondosa queda:

*“...quando Roberto Wood publicou a carta na Nature, não havia nem um só physico extranho á França*

*que acreditasse na existencia dos raios N.”*

O autor descreve as experiências que levaram à proclamação dos raios N, e discute as possíveis causas do erro. A análise contemporânea quanto à influência nociva da sugestão na objectividade dos resultados é bastante esclarecida:

*“... a suggestibilidade dos operadores e os numerosos factores de variação da phosphorescencia... [os operadores] deixaram-se influenciar mutuamente nos trabalhos, o que é gravissimo... [...] Desde que se saiba que se deve ou pode vêr uma differença fraquissima na luminescência duma pequena mancha phosphorescente, basta a ideia preconcebida para poder modificar ou provocar a sensação.”*

Contudo, e de forma extremamente lúcida, ele reconhece que mesmo um resultado negativo é uma mais-valia científica:

*“Quer experiências... provem a existência dos raios N, quer elles tenham de passar à história como um erro de suggestão, a sua importância para a sciencia será sempre immensamente grande. É que no primeiro caso a physica é enriquecida com um novo capitulo assaz maravilhoso e mysterioso; no segundo irão elles enriquecer um capitulo da psychologia, mostrando a*

*imensa força da sugestão.”*

Como moral da história, aproveita para dar um valioso conselho que, passados mais de cem anos, e para nosso infortúnio, é com demasiada frequência esquecido:

*“...radicar-se-ha no espirito do publico este util ensinamento: não receber como irrefragavel artigo de fé scientifica qualquer descoberta derivada de complicadas e difficeis experiencias... senão depois de numerosas contraprovas estabelecidas nos laboratorios dos sabios.”*

Passado um ano, o mesmo autor retoma o tema, para dar uma actualização do que tem sido a investigação em raios N desde que o assunto caiu no ridículo fora de França [2]. O artigo analisa exaustivamente algumas medições experimentais de espectros de raios N, a falta de concordância entre diversos experimetalistas, e as desculpas avançadas pelos crentes. Por exemplo, ficamos a saber que Blondlot tem agora uma explicação irrefutável para a falta de objectividade das medições, e para o facto de só alguns sortudos conseguirem ver qualquer radiação:

*“Blondlot, após os primeiros insucessos e as primeiras criticas iconoclastas... declarou que... [o alvo fosforescente] não recebia realmente nenhum augmento de brilho objectivo... os raios N, caíndo sobre a retina, é que a tornavam mais sensível a qualquer luminescência. Se assim é... como se comprehende que se continue a querer pôr a descoberto os controversos raios pelo augmento de brilho [do alvo]?”*

A conclusão perspicaz é que os raios N são um fenómeno muito precisamente localizado no espaço:

*“Em Nancy tudo se vê e tudo se encontra; fóra de Nancy nada se vê e nada se encontra.”*

1. Mariotte, “Uma controvérsia célebre”, Estudos Sociaes Anno I, Nº 4, pág. 183, Coimbra, Imprensa da Universidade (Abril de 1905); <http://purl.pt/739>
2. Mariotte, “A questão dos raios N”, Estudos Sociaes Anno II, Nº 3, pág. 129, Coimbra, Imprensa da Universidade (Março de 1906); <http://purl.pt/739>



Palmeiras brancas... no infravermelho (fotografia do autor).

## Fotografia de infravermelhos

Estamos habituados a ver o mundo a cores – é esse o nome que damos às diferentes impressões que nos causam as frequências electromagnéticas situadas na banda do visível, entre o vermelho e o violeta. No entanto, a natureza à nossa volta também brilha em muitas outras “cores” às quais os nossos olhos são completamente cegos, tais como o infravermelho e o ultravioleta. Felizmente, é possível ter uma ideia do aspecto desse mundo invisível recorrendo à fotografia, graças a filtros e/ou películas especiais.

A fotografia de infravermelhos, em particular, é hoje facilmente acessível usando câmaras digitais (cujos sensores de tipo CCD ou CMOS têm alguma sensibilidade na zona do infravermelho próximo) e um filtro adequado. O filtro, que bloqueia a luz visível, tem um aspecto completamente opaco, ou vermelho muito escuro; isto dá às fotografias uma tonalidade típica rosada ou avermelhada. Os objectos aparecem mais ou menos brilhantes, consoante reflectirem mais ou menos a luz infravermelha que os ilumina. Como não temos noção disto na nossa visão normal, os resultados podem ser surpreendentes.

Além disso, produzem-se várias alterações fascinantes no aspecto da imagem, intimamente relacionadas com a óptica e a propagação da luz na atmosfera. O efeito mais óbvio é que o céu fica fortemente escurecido: isto é consequência do mesmo fenómeno que lhe dá a sua cor azul – a dispersão de Rayleigh – que é mais fraca nos comprimentos de onda mais elevados. Ao cortarmos a luz visível, praticamente deixa de haver luz dispersa na atmosfera e o céu fica negro, fazendo um contraste dramático com o branco das nuvens. Perto do horizonte, onde a espessura da atmosfera que os raios têm que atravessar é maior, há mais dispersão nos comprimentos de onda mais altos (basta recordar o tom alaranjado do pôr-do-sol), e vemos que o céu começa a clarear.

Igualmente impressionante é a cor branca intensa que adquirem as folhas das plantas e das árvores – o chamado “efeito Wood”, em homenagem ao seu descobridor – ao reflectirem fortemente o infravermelho (ver imagem). As sombras e os contornos ficam mais nítidos, e as massas de água tornam-se sinistros espelhos do céu negro.

Uma vez que as fotografias no infravermelho não têm cores definidas, é possível introduzi-las artificialmente, por exemplo ajustando digitalmente a distribuição de brilho pelos canais de cor (RGB). As estranhas imagens resultantes, que parecem saídas de um sonho (ou de outro planeta!), causam uma impressão simultaneamente inquietante e apelativa.

# A física do cotidiano

## do simples ao complexo

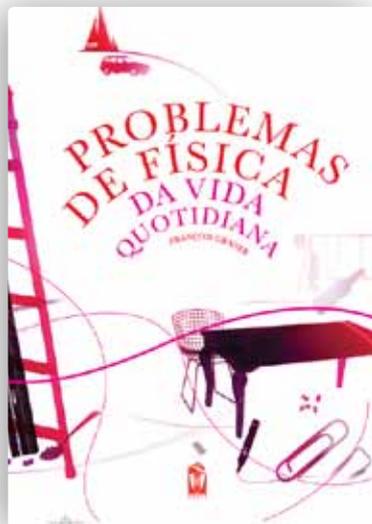
Pedro Patrício

### Problemas de física da vida quotidiana

François Graner (trad. Susana Machado)

IST Press, Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia - n.º 32

ISBN: 978-972-8469-82-5



O livro “Problemas de física da vida quotidiana” não é um livro de divulgação científica. A sua versão original, em francês, parte de uma recolha de problemas propostos aos alunos que pretendiam entrar na École Normale Supérieure. Os problemas apresentados poderiam igualmente servir de base a

um exame ou entrevista a realizar aos candidatos a professores de Física, para avaliar a solidez da sua formação geral ou, simplesmente, destinados a todos os apaixonados pela Física que procurem compreender, com alguma profundidade, os fenómenos mais curiosos ou até banais que presenciamos no dia-a-dia, e cuja explicação é por vezes simples, por vezes particularmente complexa.

A lista dos problemas propostos toca em quase todos os domínios da Física, desde a Mecânica (estática, cinemática, fluidos ou oscilações), à Termodinâmica (difusão, radiação, balanços energéticos), à Óptica ou ao Magnetismo. Também compreende problemas da vida quotidiana que podem ser observados na cozinha ou ao ar livre, que explicam o funcionamento de jogos de crianças ou de dispositivos curiosos, que se podem hoje em dia comprar em lojas especializadas.

Para além dos enunciados dos problemas, este livro apresenta as reflexões e resoluções detalhadas do autor que, utilizando um estilo profundo e descontraído, não hesita em escrever todo o arsenal

de equações da Física (desde as leis da cinemática para corpos rígidos, às leis de Biot-Savart ou de Stefan, entre outras), nem em confessar quantas vezes errou no cálculo de uma expressão subtil, ou se enganou no raciocínio a seguir para chegar ao essencial da física de um determinado problema. Da mesma maneira podemos ver, lado a lado, nas referências das resoluções, artigos do “American Journal of Physics” ou “European Journal of Physics” e os livros do Tintim, ou a cena da grande escadaria do “Couraçado Potemkine”, de Eisenstein – quando se analisa por exemplo o movimento dum berlinde a cair por umas escadas.

Ao contrário de alguns livros de divulgação, o autor não se abstém de levar um cálculo matemático até ao fim, passo a passo. Quando as equações matemáticas são complicadas, apresenta as simplificações necessárias para as ultrapassar, ou a maneira de chegar a estimativas preciosas, mesmo sem as resolver. Deixa por isso claras as suas conclusões. Ao contrário de livros que não apresentam quaisquer fórmulas ou expressões matemáticas, as ideias deste livro deixam de ser os dogmas da ciência, para passarem a ser raciocínios físicos que podem ser postos em causa, pois temos acesso aos pressupostos de base e aos seus desenvolvimentos matemáticos.

Por se tratar de problemas da vida quotidiana, são fáceis de explicar aos alunos e assim motivá-los para o estudo da Física. Também podem servir de tema de conversa entre colegas professores, que rapidamente encontram novas variantes para estudar. E quando um determinado fenómeno suscita maior curiosidade, facilmente se pode repetir a experiência em casa ou ao ar livre. Pessoalmente, dei por mim a confirmar que não conseguia queimar uma folha de papel branco com uma lupa, mas bastava pintar uma mancha escura na folha para o conseguir fazer (ou, já agora, a re-experimentar a dor na minha pele quando foquei o Sol na palma da mão). Dei por mim entretido dentro de uma loja de *gadgets* e, entre crianças, a experimentar um “levitador” magnético, ou a construir no meu gabinete um “anagyrius” com ovos de plástico lastrados...

# Um livro de perplexidades e não de certezas

Emílio Ribeiro

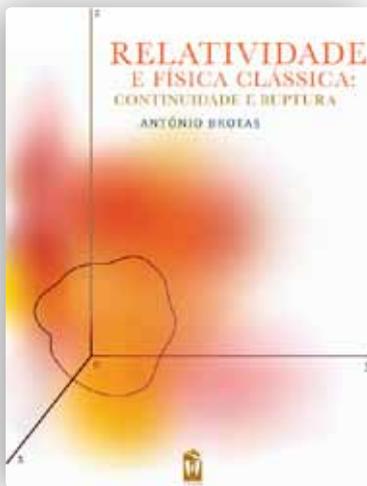
Centro de Física das Interações Fundamentais, IST

## “Relatividade e física clássica – continuidade e ruptura”

António Brotas

IST Press, Coleção Ensino da Ciência e da Tecnologia - n.º 31

ISBN: 978-972-8469-91-7



Tive a honra [1] e o prazer de apresentar, em sessão pública no Instituto Superior Técnico, o último livro do Professor António Brotas intitulado “Relatividade e física clássica – continuidade e ruptura”. Este livro, mais de que um livro de Física, é um olhar sobre o modo como os físicos, pessoas humanas concretas, fazem a física. É um livro de perplexidades e não de certezas. É, sendo um livro de Física,

um livro que fala de Cultura, que fala sobre a permanente e antiga escolha entre o tudo explicar, não calculando nada e o tudo calcular para nada explicar. É um livro que fala de nevoeiros e rupturas: a separação iniciada no séc. XVIII, entre uma física que tudo explicava e nada calculava para uma física que tudo calculava e nada explicava.

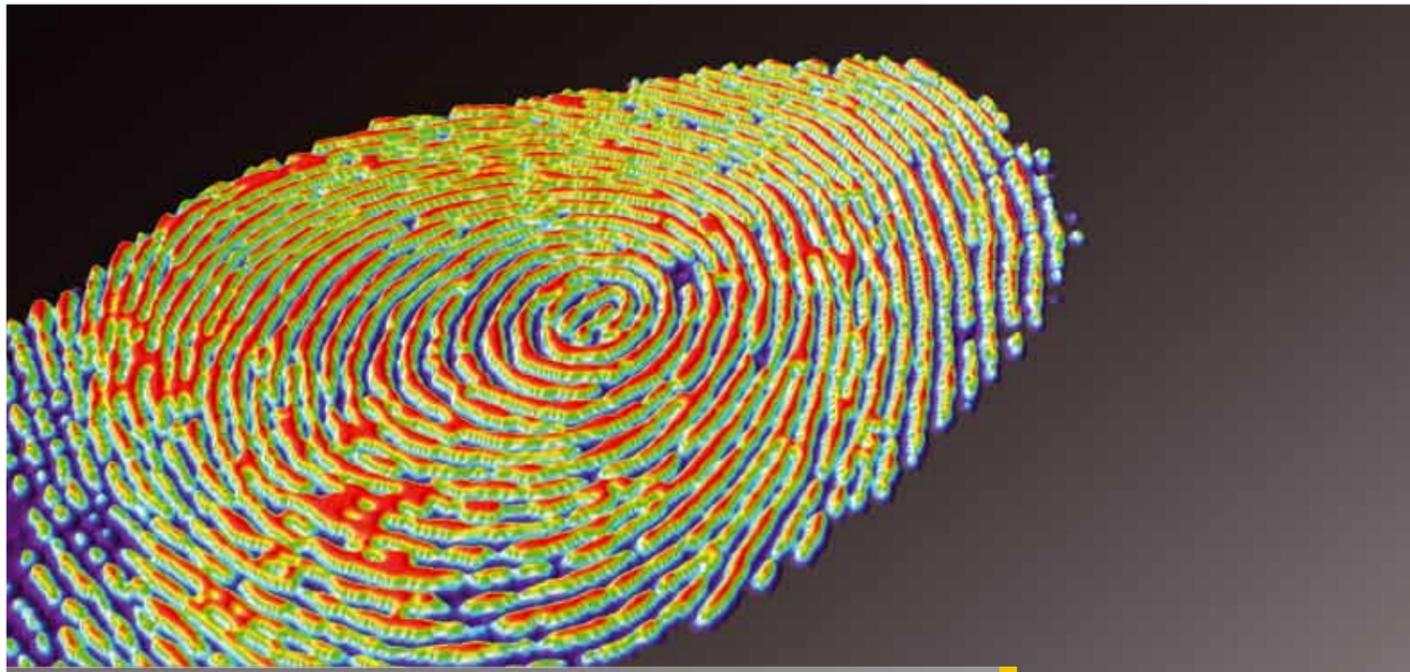
O conflito que vinha a ser preparado desde Newton, Coulomb (1780), Volta e Galvani, Oersted (1820), Ampère, Biot e Savart, Laplace, Faraday, Maxwell (1870), Michelson, Morley, (1881), Lorentz (1905), Poincaré (1905) e Einstein (1905). Como vem expresso no livro: “Minkowski que tinha sido professor de Matemática de Einstein e, ao que parece, não se lembrava dele, afirmou numa conferência proferida para médicos ‘daqui em diante os conceitos de espaço e de tempo considerados como autónomos vão desvanecer-se como sombras e somente se reconhecerá uma espécie de união entre eles.” Paralelamente na Mecânica, que se tinha visto privada do éter, vivia-se como que o dual do mesmo impasse. Como se pode ler: “Em 1911 Ehrenfest fez notar que, tendo um disco a rodar, uma métrica não Euclidiana-Born (1909) – no caso de ser indeformável então não pode parar porque, se parasse, a sua métrica passaria a Euclidiana, para o que teria de se deformar.”

Começava em 1909 a discussão, tão cara ao Professor António Brotas, sobre o que é indeformável e o que é rígido. O problema do disco a rodar tinha chamado a atenção de Einstein para o papel que poderiam ter em física os espa-

ços de Riemann na reformulação da conservação do tensor de impulsão-energia. O ano 1911 viu a chegada da relatividade generalizada [2] e a teoria da elasticidade de Herglotz que, após desenvolver a teoria e para a concretizar, precisava de um Lagrangeano... O livro descreve o percurso histórico dos erros e acertos até à elaboração da teoria da elasticidade relativística. O livro descreve, também, a ruptura do século XX. Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, E. Schrödinger são os intérpretes dessa ruptura.. Lê-se: “Muitos físicos desenvolvem assim o seu trabalho sem se importarem com a relatividade... Uma física do comportamento das coisas passou a ser também uma física da existência das Coisas...” Surgiu assim a ruptura entre físicos relativistas que nada sabiam de física quântica e físicos, quânticos, que nada sabiam de relatividade. Finalmente o electrão de Mie, a pesca em buracos negros e uma pequena história ficcional, completam este livro. Enfim, um livro que lança um olhar original, aqui e ali autobiográfico, mas sempre apoiado na Grande História da Física, sobre esta grande saga que é compreender como funcionam as coisas do Universo. A ler.

1. Fui aluno do Professor Brotas num tempo de rupturas e, apesar de tudo, também de continuidades. O Professor Brotas apareceu na vida de pessoas como eu, como uma luz nova que atravessou o nevoeiro em que a Universidade Portuguesa estava envolta. O nevoeiro aqui e além estava a levantar, graças aos esforços de pessoas como o Prof. António da Silveira que mantinha, contra tudo e todos, uma pequena Aldeia Gaulesa que resistia: o Instituto de Física e Matemática. Foi aí que nós, alunos de Electrotecnia que queríamos ser físicos, recebemos as primeiras lições sobre Relatividade dadas pela Madame Tonnelat, que tinha sido também o que modernamente poderíamos chamar de supervisora do Prof. Brotas. Infelizmente, esse Instituto já não existe e parece que os seus novos senhores se preparam para dar ao magnífico edifício que o albergava utilizações bem diferentes daquela para o que foi criado.

2. Já em 1922, o avô do Prof. Brotas, o Prof. Santos Lucas, punha como problema aos alunos, o cálculo do desvio da luz devido a uma massa gravítica: notas do curso de Francisco de Paula Leite Pinto, que viria a ser Ministro de Educação.



# call for papers 2010

A Gazeta de Física convida os seus leitores a submeterem propostas (abstracts) de artigos nos seguintes temas:

Física aplicada à biologia e medicina  
até 18 de Junho

Lasers e aplicações: em comemoração do 50º aniversário da invenção do laser  
até 17 de Setembro

História e protagonistas da física em Portugal no séc. XX  
até 17 de Dezembro

A Gazeta de Física publica artigos, com índole de divulgação, considerados de interesse para estudantes, professores e investigadores em Física. Os artigos podem ter índole teórica, experimental ou aplicada, visando promover o interesse dos jovens pelo estudo da Física, o intercâmbio de ideias e experiências profissionais entre os que ensinam, investigam ou aplicam a Física.

Mais informações em [www.gazetadefisica.spf.pt](http://www.gazetadefisica.spf.pt)

GAZETA DE  
física

Para os físicos e amigos da física.  
[WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT](http://WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT)

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA / VOL. 33 - Nº 1 / 2010 / Publicação Trimestral / €5,00



**Das equações de Maxwell  
aos monopolos magnéticos**

**Aceleradores laser-plasma  
aos ombros de Einstein**

**A física vai ao museu**



artigo geral

2 **Aceleradores laser-plasma**  
aos ombros de **Einstein**

Samuel Martins  
Ricardo Fonseca  
Luís Silva

artigo geral

5 **Das equações de Maxwell**  
aos monopolos magnéticos

Filipe Moura

física sem fronteiras

7 **A Física vai ao Museu**

Maria Luísa de Carvalho, Sofia Pessanha, Marta Manso,  
Ana Guilherme, Milene Gil, José Pires Marques, Maria Isabel  
Cabaço, Susana Caldeira, Alexandra Marques, Ana Isabel Seruya

física e a sociedade

12 **Copérnico ou Galileu:**  
um problema mal colocado

Ana Simões

crónica: pensamentos quânticos

16 **A crise, a física e o Ronaldo**

Jim Al-Khalili

crónica: física divertida

17 **As descobertas da década**

Carlos Fiolhais

18 **Notícias**

Pedro Abreu, Vítor Amaral, Ana Eiró,  
Gonçalo Figueira, Mario Gonçalves Pereira

vamos experimentar

**Qual resiste mais?**

Constança Providência  
Camille Ducoin

sala de professores

23 **Efeito de Aharonov-Bohm**

Augusto Barroso

sala de professores

25 **O recorde para o lançamento do peso**  
não é batido há vinte anos.  
**Estará isso relacionado com a Física?**

Duarte Ferreira dos Santos  
Henrique Herculano de Carvalho  
João Afonso

sala de professores

30 **Planetário portátil**

Augusto Barroso

estórias e histórias

31 **Uma vida entre** prismas

Gonçalo Figueira

livros

35 **A física do quotidiano**  
do simples ao complexo

Pedro Patrício

36 **Um livro de perplexidades**  
e não de certezas

Emílio Ribeiro

Publicação Trimestral Subsidiada



FUNDAÇÃO  
CALOUSTE  
GULBENKIAN

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



## A energia do país passa por nós.

Fazer chegar a energia onde ela é necessária é uma das nossas missões. Sempre com consciência e preocupação a nível social e ambiental e com altos critérios de qualidade e segurança. Por isso, a REN – Redes Energéticas Nacionais – assegura um canal de transporte eficaz de toda a energia do país, seja ela de muito alta tensão ou de alta pressão tendo em conta os elevados padrões de exigência do mercado. Porque é no futuro de todos nós que dedicamos toda a nossa energia – Electricidade ou Gás - onde é preciso. Em todo o país.



Redes de confiança

