



## 100 anos da experiência de Stern-Gerlach

Nanopartículas magnéticas para diagnóstico e tratamento do cancro

Muografia e a sua aplicação na Mina do Lousal

# Índice

## 1 Editorial

artigo geral

### 2 100 anos de experiência de Stern-Gerlach

Fernando Nogueira, Carlos Fiolhais

artigo geral

### 4 Muografia e a sua primeira aplicação em Portugal, na Mina do Lousal

Pedro Teixeira, Alberto Blanco, Bento Caldeira, Bernardo Tomé, Isabel Alexandre, João Matos, Jorge Silva, José Borges, Lorenzo Cazon, Luís Afonso, Luís Lopes, Magda Duarte, Mário Pimenta, Mourad Bezzeghoud, Paolo Dobrilla, Pedro Assis, Raul Sarmento, Rui Oliveira, Sofia Andringa

artigo geral

### 10 Nanopartículas no diagnóstico e tratamento do cancro - oportunidades e desafios

Sara Freitas, Sofia Caspani, Ricardo Magalhães, Célia Sousa, João H. Belo

histórias e estórias

### 16 Lev Landau “A ousadia é a coisa mais importante da vida”

Rui Borges

crónicas

### 20 A experiência de Stern-Gerlach: peripécias, mérito e acaso

Carlos Herdeiro

livros e multimédia

### 22 «Ciência, Tecnologia e Medicina na Construção de Portugal»

José Braga

vamos experimentar

### 24 O que é o vento?

Helena Arede, Marta Henriques, Joana Pancas, Constança Providência, Rita Wolters

## 43 Notícias

- Magnetism in Portugal
- Prémios Incentivo à Excelência
- 4CF PLP
- Young Minds' Movie Night
- Física 2022

## CRÉDITOS

**Imagem da capa:** Placa comemorativa na fachada do edifício do Instituto de Física em Frankfurt, comemorando o trabalho dos físicos Otto Stern e Walther Gerlach. A inscrição refere: “Em fevereiro de 1922, neste edifício do Instituto de Física, em Frankfurt, foi feita a descoberta fundamental da quantificação espacial dos momentos magnéticos dos átomos. A experiência de Stern-Gerlach é a base de desenvolvimentos científicos e tecnológicos importantes do século 20, como a ressonância magnética, os relógios atômicos ou os lasers. Otto Stern foi agraciado com o Prémio Nobel da Física em 1943 por esta descoberta.”. Foto de Frank Behnsen via Wikipedia ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FFM\\_Physikalischer\\_Verein\\_Stern-Gerlach-Tafel.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FFM_Physikalischer_Verein_Stern-Gerlach-Tafel.jpg))

### Ficha Técnica

#### Estatuto Editorial

<http://www.spf.pt/gazeta/editorial>

#### Propriedade | Sede | Redacção | Editor

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

#### Director

Bernardo Almeida

#### Editores

Francisco Macedo  
Olivier Pellegrino

#### Secretariado

Maria José Couceiro - [mjose@spf.pt](mailto:mjose@spf.pt)

#### Comissão Editorial

José António Paixão - Presidente da SPF  
Gonçalo Figueira - Anterior Diretor Editorial  
Teresa Peña - Anterior Diretor Editorial  
Carlos Fiolhais - Anterior Diretor Editorial  
Ana Luísa Silva - Física Atómica e Molecular  
Ana Rita Figueira - Física Médica  
Augusto Fitas - Grupo História da Física  
Carlos Portela - Educação  
Carlos Silva - Física dos Plasmas  
Constança Providência - Física Nuclear  
Joaquim Moreira - Física da Matéria Condensada  
José Marques - Física Atómica e Molecular  
Luís Matias - Geofísica, Oceanografia e Meteorologia  
Manuel Marques - Óptica e Laser, Universidade do Nuno Castro - Física Partículas  
Rui Agostinho - Astronomia e Astrofísica  
Sofia Andringa - Física Partículas

#### Correspondentes

André Pereira - Delegação Norte  
Fernando Amaro - Delegação Centro  
José Marques - Delegação Sul e Ilhas

#### Design / Produção Gráfica

FR Absolut Graphic Lda.  
[frabsolutg@gmail.com](mailto:frabsolutg@gmail.com)

NIPC 501094628

ISSN 0396-3561

Tiragem 1 000 Ex.

Registo ERC 110856

Depósito Legal 51419/91

Periodicidade: 3 x Ano

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.



Por vezes, algumas das descobertas científicas mais interessantes, inovadoras e com enormes consequências teóricas e práticas acontecem de forma inesperada e a experiência de Stern-Gerlach é um desses exemplos. Envolvendo o estudo da deflexão das trajetórias de átomos sujeitos a campos magnéticos não-homogêneos, teve enorme importância para o desenvolvimento da Física e, em particular, da Mecânica Quântica.

A experiência de Stern-Gerlach foi inicialmente pensada por Otto Stern como uma forma de mostrar que a quantificação da orientação espacial do momento angular, proposta pela teoria de Bohr-Sommerfeld-Debye, estava errada. De facto, Otto Stern era oposto a esta visão, tendo até feito um voto, com Max von Laue, de abandonar a Física caso o modelo de Bohr estivesse correto. No entanto, a experiência, implementada em conjunto com Walther Gerlach, acabaria por mostrar precisamente o oposto, confirmando a quantificação direcional do momento angular e levando à descoberta do spin do eletrão, um facto que foi apenas reconhecido após a formulação do conceito de spin por George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit, alguns anos mais tarde. Nesse âmbito, Otto Stern acabaria por ganhar o prémio Nobel da Física em 1943, pelos seus trabalhos com feixes moleculares e “pela descoberta do momento magnético do protão”. Atualmente, em 2022, comemora-se o centenário da experiência de Stern-Gerlach e a Gazeta dedica-lhe este número. Nela, Carlos Fiolhais e Fernando Nogueira contam-nos as vicissitudes e atribulações em torno da experiência, do seu desenvolvimento e do seu significado. Na sua Crónica, Carlos Herdeiro dá também algumas notas biográficas sobre Stern e Gerlach e de como foi possível implementar a experiência.

Para além do seu enorme interesse científico, a experiência de Stern-Gerlach teve também consequências tecnológicas. A compreensão da Física em torno da experiência, acabaria por levar ao desenvolvimento da Imagem por Ressonância Magnética (MRI), cuja utilidade no diagnóstico e tratamento de doenças se encontra vastamente demonstrada, sendo hoje de importância inquestionável.

Uma das vantagens da MRI é a sua capacidade de permitir estudar os tecidos humanos de forma não invasiva. Entre os agentes de contraste, utilizados para melhorar a definição das imagens por MRI, as nanopartículas magnéticas têm-se revelado importantes em anos recentes. Assim, neste número da Gazeta, Sara Freitas faz uma revisão dos avanços atuais nas aplicações biomédicas de nanopartículas magnéticas, envolvendo não só a MRI como uma gama alargada de outros campos onde elas são aplicadas. A Gazeta apresenta ainda um artigo em que a muografia é aplicada, pela primeira vez em Portugal, a estudos de Geofísica. A muografia é uma técnica de sondagem não invasiva que usa muões para observar o interior das estruturas atravessadas. No seu artigo, Pedro Teixeira aplica a muografia ao estudo da Mina do Lousal. Com ele, pretende-se compreender o terreno envolvente da Mina, melhorar e otimizar o desempenho do telescópio de muões e desenvolver ferramentas de análise de muografia, tendo em vista a sua aplicação em trabalhos de campo futuros.



Boas leituras

# 100 anos da experiência de Stern-Gerlach

Fernando Nogueira<sup>1</sup>, Carlos Fiolhais<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, Universidade de Coimbra

Os editores da revista *Zeitschrift für Physik* receberam a 26 de agosto de 1921 um artigo escrito por Otto Stern, assistente de Max Born no Institut für theoretische Physik, da Universidade de Frankfurt am Main, no qual era proposta uma maneira de testar experimentalmente a quantização direcional no campo magnético<sup>1</sup>. O artigo sugeria uma montagem experimental para medir o momento magnético de um átomo isolado, acompanhada de uma estimativa dos eventuais resultados da experiência. Embora só Otto Stern assinasse este artigo, uma nota de rodapé indicava que a experiência estava a ser planeada e realizada em conjunto com Walther Gerlach.

A este artigo sucederam-se mais três, todos eles assinados conjuntamente por Stern e Gerlach<sup>2</sup>, recebidos pela revista entre 18 de novembro de 1921 e 1 de abril de 1922, mas publicados apenas em dezembro de 1922. Os resultados da experiência de Stern e Gerlach aparecem nos terceiro e quarto artigos, enviados com um mês de diferença aos editores, mas publicados em páginas consecutivas do volume 9 da revista: um feixe de átomos de prata que percorre uma região onde há um campo magnético não homogêneo é defletido em duas direções distintas, indicando que os átomos de prata possuem dois momentos magnéticos distintos na direção do campo (Figura 1).

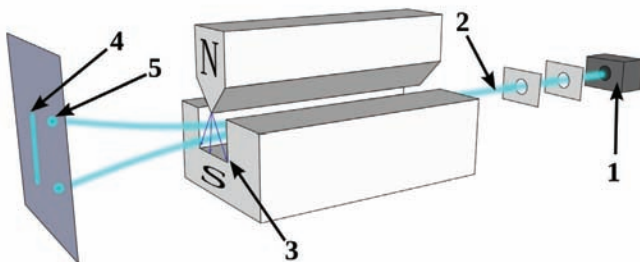


Figura 1 - Esquema da experiência de Stern-Gerlach: um feixe de átomos de prata (2) é produzido no forno (1), atravessando uma região onde há um campo magnético não homogêneo (3) e dividindo-se em vários feixes, de acordo com a teoria de Larmor (4), ou em dois feixes, de acordo com a teoria de Bohr-Sommerfeld (5).

Stern e Gerlach pretendiam provar que Niels Bohr, Arnold Sommerfeld e Peter Debye estavam errados ao propor que os elétrons num átomo se deslocavam em órbitas com um valor bem definido do momento angular. Uma carga numa órbita circular ou elíptica é equivalente a uma corrente numa espira, estando a ela associado um momento magnético proporcional ao momento angular orbital. Colocados num cam-

po magnético, os átomos deveriam interagir com ele de acordo com os valores possíveis para a componente do momento magnético atômico na direção do campo. Sendo o campo magnético não homogêneo, a interação entre este e qualquer momento magnético resulta numa força na direção do campo cujo sentido e intensidade são determinados pelo gradiente do campo e pelo valor da projeção do momento magnético na direção do campo. O feixe atômico deveria por isso dividir-se em tantos feixes quantos os valores possíveis para esta componente do momento magnético.

Caso o momento magnético dos átomos não tivesse qualquer direção preferencial, o resultado seria apenas uma mancha na região central, indicativa de uma distribuição aleatória da componente do momento magnético na direção do campo. Ora, de acordo com a teoria de Bohr-Sommerfeld-Debye, o momento angular orbital,  $l$ , portanto, o momento magnético a ele associado, estaria quantizado, isto é,  $L = n \hbar$ , com  $n$  um número inteiro e  $\hbar$  a constante de Planck reduzida. Stern e Gerlach pensavam que um átomo de prata deveria estar num estado com  $n = 1$ . A hipótese de Bohr-Sommerfeld-Debye para a quantização do momento angular implicava que a componente do momento magnético na direção do campo apenas poderia ter um de dois<sup>3</sup> valores, gerando por isso duas manchas distintas na chapa fotográfica impressionada pelos feixes emergentes dos magnetes. Esta previsão era fortemente contestada por Stern (que tinha feito em tempos um voto, com Max von Laue, de abandonar a Física caso o modelo de Bohr estivesse correto), e a experiência que imaginou tinha como objetivo provar que Bohr estava errado e que não havia, por isso, quantização espacial ou direcional. Mas a experiência dava, aparentemente, razão a Bohr (Figura 2).

No entanto, os resultados da experiência foram mal interpretados por Stern e Gerlach, que não se aperceberam que tinham descoberto algo novo (o spin do elétron). Na realidade, os átomos de prata encontram-se num estado de momento angular orbital nulo, incompatível com o aparecimento das

<sup>1</sup> Stern, O. Ein Weg zur experimentellen Prüfung der Richtungsquantelung im Magnetfeld. *Z. Physik* 7, 249–253 (1921). <https://doi.org/10.1007/BF01332793>.

<sup>2</sup> Gerlach, W., Stern, O. Der experimentelle Nachweis des magnetischen Moments des Silberatoms. *Z. Physik* 8, 110–111 (1922). <https://doi.org/10.1007/BF01329580>;  
Gerlach, W., Stern, O. Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld. *Z. Physik* 9, 349–352 (1922). <https://doi.org/10.1007/BF01326983>;  
Gerlach, W., Stern, O. Das magnetische Moment des Silberatoms. *Z. Physik* 9, 353–355 (1922). <https://doi.org/10.1007/BF01326984>.



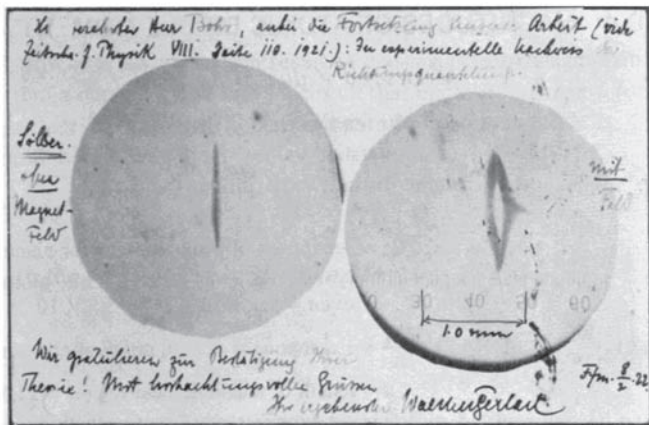


Figura 2 - Postal enviado por Walther Gerlach a Niels Bohr, comunicando o resultado da experiência e dando-lhe os parabéns por esta comprovar a sua teoria.

duas riscas sem a introdução do spin. Este facto só foi reconhecido a partir de meados dos anos de 1930<sup>4</sup>, mais de uma década depois da descoberta do spin por George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit em 1925. A associação do spin ao momento magnético dos átomos no estado  $^2S$ , como é o caso dos átomos de prata, já tinha sido feita em 1927 por Ronald Fraser, ao medir a forma do átomo de hidrogénio por dispersão, concluindo que este era esfericamente simétrico<sup>5</sup>, e tendo portanto momento angular orbital nulo. Paralelamente, Thomas Phipps e J. B. Taylor repetiram a experiência de Stern e Gerlach usando átomos de hidrogénio em vez de átomos de prata<sup>6</sup>, tendo obtido a mesma divisão do feixe original em duas componentes. Mas só em 1937 Fraser mencionou explicitamente o spin como sendo a origem dos resultados do artigo de 1922 de Stern e Gerlach.

Como foi então possível conciliar os resultados do modelo de Bohr com os resultados experimentais de Stern e Gerlach? Por uma feliz (ou infeliz?) coincidência de se terem cometido dois erros de sentido contrário: i) Stern e Gerlach supuseram que o momento angular dos átomos de prata tinha origem orbital e era igual a  $L = \hbar$ , quando, na realidade, o momento angular total dos átomos de prata se deve ao spin do eletrão de valência e é igual a  $J = \hbar/2$ ; ii) a razão giromagnética orbital (a razão entre o momento magnético e o momento angular orbitais) é o dobro da razão giromagnética associada ao spin. Este cancelamento de fatores de 2 levou a que o resultado da experiência concordasse com o previsto pelo modelo de Bohr quer no número de riscas visíveis (descontando o momento angular orbital  $m_L = 0$ ), quer no valor da separação entre elas. Mas impediu que Stern e Gerlach se apercebessem que tinham descoberto o spin.

Otto Stern, que se exilou nos Estados Unidos em 1933, viria a ganhar o prémio Nobel da Física em 1943 «pela sua contribuição para o desenvolvimento do método dos raios moleculares e a sua descoberta do momento magnético do próton», que está hoje na base dos exames de ressonância magnética. O seu trabalho com feixes moleculares não só foi crucial na conceção da experiência de Stern-Gerlach como lhe permitiu ser hoje considerado o pai da Física Atómica Experimental. Walther Gerlach teve um largo percurso na academia alemã, tendo mesmo dirigido a Sociedade Fraunhofer e a *Deutsche Forschungsgemeinschaft* (o equivalente alemão da Fundação

para a Ciência e a Tecnologia). O mais prestigiado prémio alemão de Física Experimental é a medalha Stern-Gerlach da Sociedade Alemã de Física.

Esta experiência, realizada há um século, é hoje considerada uma das experiências fundamentais da Mecânica Quântica, sendo ensinada e discutida em todos os cursos de Física. Os mistérios da medida em Mecânica Quântica ficam bem patentes quando se consideram experiências sucessivas de Stern-Gerlach sobre o mesmo feixe, com sucessivos campos magnéticos aplicados em direções distintas. Podem, por exemplo, ser usadas para mostrar a violação das desigualdades de Bell, que estão na base dos trabalhos de John F. Clauser, Alain Aspect e Anton Zeilinger premiados com o Prémio Nobel da Física de 2022.

<sup>3</sup> Seriam em princípio possíveis três orientações distintas para a componente do momento magnético na direção do campo externo: paralela, anti-paralela e perpendicular. Mas Niels Bohr tinha admitido que a orientação perpendicular não deveria aparecer, visto corresponder a uma situação dinamicamente instável.

<sup>4</sup> Fraser, Ronald G.J. *Molecular Beams*. Methuen, London, p. 33 (1937).

<sup>5</sup> Fraser, Ronald G. J. The effective cross section of the oriented hydrogen atom. *Proc. R. Soc. Lond. A* 114, 212-221 (1927). <http://doi.org/10.1098/rspa.1927.0036>.

<sup>6</sup> Phipps, T.E. and Taylor, J.B. The Magnetic Moment of the Hydrogen Atom. *Phys. Rev.* 29, 309 (1927). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.29.309>.



Fernando Nogueira, é professor Associado de Física da Universidade de Coimbra. É autor de cerca de 40 artigos científicos e editor de 3 volumes da coleção "Lecture Notes in Physics" da editora Springer. O seu trabalho de investigação atual, centra-se na descoberta de novos materiais por desenho inverso ab-initio ou recorrendo a ferramentas de cálculo de alto rendimento. Foi o responsável pelas Olimpíadas da Física entre 2007 e 2018, tendo acompanhado inúmeras equipas portuguesas às Olimpíadas Internacionais e Ibero-americanas de Física. É actualmente vice-presidente da Sociedade Portuguesa de Física.



Carlos Fiolhais, é Professor de Física aposentado da Universidade de Coimbra. É autor de 150 artigos científicos, um dos quais é o mais citado de sempre de autores em Portugal, e de inúmeros artigos pedagógicos e divulgação (muitos na "Gazeta de Física", que dirigiu). É autor ou editor de mais de 60 livros científicos, pedagógicos e de divulgação. Recebeu vários prémios e distinções, entre as quais, a Ordem do Infante D. Henrique em 2005, Ano Internacional da Física.

# Muografia e a sua primeira aplicação em Portugal, na Mina do Lousal

Pedro Teixeira<sup>1</sup>, Alberto Blanco<sup>2</sup>, Bento Caldeira<sup>1</sup>, Bernardo Tomé<sup>2</sup>, Isabel Alexandre<sup>3</sup>, João Matos<sup>4</sup>, Jorge Silva<sup>5</sup>, José Borges<sup>1</sup>, Lorenzo Cazon<sup>7</sup>, Luís Afonso<sup>2</sup>, Luís Lopes<sup>2</sup>, Magda Duarte<sup>7</sup>, Mário Pimenta<sup>2,3</sup>, Mourad Bezzeghoud<sup>1</sup>, Paolo Dobrilla<sup>2</sup>, Pedro Assis<sup>2,3</sup>, Raul Sarmiento<sup>2</sup>, Rui Oliveira<sup>1</sup>, Sofia Andringa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física (ECT), Instituto de Ciências da Terra (ICT/IFFA), Earth Remote Sensing Laboratory (EaRSLab), Universidade de Évora, Rua Romão Ramalho nº59 - 7000-671 Évora

<sup>2</sup> Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP), Av. Prof. Gama Pinto, 2 - 1649-003 Lisboa

<sup>3</sup> Instituto Superior Técnico (IST), Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa

<sup>4</sup> Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), Estrada da Portela, Bairro do Zambujal, Apartado 7586 - Alfragide, 2610-999 Amadora

<sup>5</sup> Departamento de Física (DF), Universidade de Coimbra, Rua Larga, 3004-516 Coimbra, Portugal

<sup>6</sup> Instituto Galego de Física de Altas Enerxías (IGFAE) - Universidade de Santiago de Compostela, Rúa de Xoaquín Díaz de Rábago, 15705 Santiago de Compostela, Espanha

<sup>7</sup> Universidade do Minho, Campus Gualtar, CP3, 3.02, 4710-057 Braga, Portugal

\* Autor correspondente: pmmt@uevora.pt

## Resumo

A muografia é uma técnica de sondagem não invasiva que usa muões, uma radiação natural de fundo com algum poder penetrante, para observar o interior das estruturas atravessadas. Com detetores adequados à observação da subsuperfície terrestre, é possível criar muografias, imagens com informação sobre a distribuição de densidades da região observada.

Internacionalmente, esta técnica já foi aplicada em várias áreas. Em Portugal, está a ser aplicada pela primeira vez na área da geofísica para fazer um reconhecimento geológico da Mina do Lousal.

## Palavras-Chave

Muografia, RPC, física de partículas, geofísica, mina do Lousal

## 1. Introdução

Os muões são partículas elementares produzidas por raios cósmicos em interações com a atmosfera. São partículas carregadas semelhantes aos eletrões, mas aproximadamente 200 vezes mais massivas que eles. Como têm uma interação com a matéria muito baixa e atravessam longas distâncias, são um bom meio para criar imagens do interior de grandes estruturas, usando detetores concebidos para medir o fluxo de muões e estimar a sua atenuação na matéria atravessada em comparação com o fluxo esperado. A esta técnica, relativamente recente, dá-se o nome de muografia. Quando da sua aplicação resulta a construção de modelos tridimensionais também é referida como tomografia muónica ou de muões. A densidade dos materiais é o parâmetro físico ao qual esta técnica de sondagem não-invasiva é sensível. Quanto mais longo é o caminho ou mais

densos são os materiais numa determinada direção, menos muões têm energia para o atravessar. Uma contagem de muões em todas as direções permite inferir esses contrastes. O instrumento usado na medição da atenuação do fluxo de muões designa-se por telescópio de muões e é equipado com detetores de partículas construídos para esse fim.

No final da década de 70, a muografia começou a ganhar forma e, passadas várias décadas, a evolução da tecnologia de detetores, *software* de simulação e do conhecimento científico sobre raios cósmicos e o fluxo de muões trouxeram-lhe um amplo crescimento a nível internacional. Atualmente, a muografia destaca-se em aplicações nas áreas de vulcanologia e geofísica, mas também tem aplicações em domínios como a arqueologia, engenharia civil, segurança e controlo nuclear.

A partir da colaboração entre o LIP, a UÉvora e o CCV do Lousal, e com suporte do LNEG, está a ser desenvolvido um projeto pioneiro que tenciona introduzir a muografia no panorama da geofísica em Portugal. A aplicação em curso centra-se na Mina do Lousal e consiste no reconhecimento da variabilidade geológica na estrutura compreendida entre a galeria e a superfície, a partir dos dados fornecidos por telescópios desenvolvidos pelo projeto LouMu.

## 2. Muões

Os muões são o tipo mais abundante de partículas criadas nos fenómenos atmosféricos designados por chuvaros de partículas. Estes ocorrem quando raios cósmicos, partículas muito energéticas vindas do espaço, colidem com as moléculas da atmosfera terrestre produzindo cascatas de

novas partículas. A maioria dos muões é criada a cerca de 15 km de altitude, após a entrada dos raios cósmicos na região mais densa da atmosfera. Por esse motivo, é também comum usar-se a designação de muões atmosféricos ou cósmicos, de acordo com a natureza da sua criação.

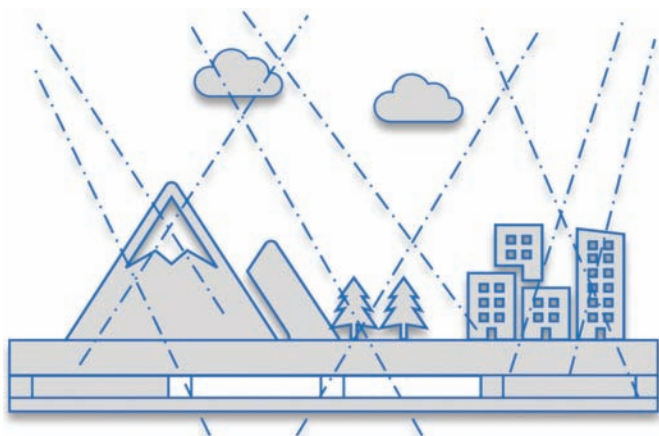


Figura 1 - Os muões atmosféricos são uma radiação natural e inofensiva criada na atmosfera, capaz de atravessar longas distâncias da superfície terrestre. Estão presentes em todo o globo com uma distribuição relativamente constante.

A descoberta desta partícula aconteceu em 1936 por Carl Anderson e Seth Neddermeyer [1]. Até ao momento, eram conhecidos o próton, o neutrão e o elétron e a sua observação abriu portas para a descoberta do vasto mundo das partículas subatômicas, impulsionando o aparecimento da primeira geração de aceleradores de partículas na década de 50.

São partículas elementares com carga, semelhantes aos elétrons, mas diferem na massa que é cerca de 200 vezes maior. Outra diferença é que os muões são partículas instáveis, com um tempo médio de vida de  $2,2 \mu\text{s}$  em repouso, mas dado que viajam a velocidades relativistas, a dilatação do tempo permite que percorram longas distâncias e que ainda penetrem na superfície da Terra antes de decaírem. O seu nível de interação com outras partículas é baixo e por serem mais pesados do que os elétrons, não são desacelerados tão facilmente na interação com os átomos que encontram pelo caminho. As trajetórias em que viajam são essencialmente retilíneas e, dependendo da energia com que foram criados, podem atravessar vários metros ou mesmo quilómetros da crosta terrestre antes que a sua energia se esgote. Nesse momento decaem num elétron ou positrão, dependendo da carga elétrica do muão que lhes deu origem, sendo rapidamente absorvidos pela matéria, e em dois neutrinos diferentes, que podem continuar a atravessar todo o planeta indiferentes a qualquer interação.

### 3. Muografia e Tomografia Muónica

A perda da energia dos muões ocorre principalmente por ionização e excitação atômica e pode ser determinada em função da densidade da materiais atravessados e distância neles percorrida. Isto dá-nos a energia mínima necessária para um muão atravessar uma determinada coluna de matéria, de uma determinada direção, até chegar ao ponto de deteção.

Os muões são também desviados da sua direção inicial, e ainda que o desvio seja mesmo muito pequeno, o efeito cresce significativamente com o número atômico dos elementos que atravessam. Dependendo da escala de observação e natureza dos alvos, a muografia pode ser feita apenas contando os muões que chegam numa dada direção, ou então medindo diretamente a deflexão das trajetórias.

O fluxo de muões que se espera detetar é a soma dos muões que incidem na direção desse ponto com energia superior à energia mínima. Assim, quanto mais denso for o material a atravessar, menor será o fluxo de muões observado nessa direção. Com a energia de 1 GeV, um muão tem a probabilidade de atravessar aproximadamente 2 m de um solo comum, considerando uma massa volúmica média de  $2,6 \text{ g/cm}^3$ . Acima desse valor de energia, o fluxo de muões ao nível do mar é pelo menos duas ordens de grandeza maior que a quantidade de outras partículas carregadas.

Sabendo as distâncias totais da matéria atravessada, a medição da atenuação do fluxo permite conhecer a distribuição das densidades médias, com base na razão entre o fluxo observado e o fluxo esperado. A intensidade do fluxo de muões decresce desde a direção vertical, torna-se quase nula perto da direção horizontal e tem uma distribuição de energia bem conhecida [2]. Em média, chegam à superfície cerca de 250 muões por metro quadrado e por segundo, vindos de todas as direções.

A deteção é feita por detetores de muões, montados em paralelo numa estrutura designada por telescópio de muões. A observação produz imagens como radiografias, mas que resultam da atenuação de muões, chamadas muografias. As muografias mostram a distribuição das densidades médias da região observada. Esta é a base da técnica de muografia, que usa esta radiação natural e detetores de muões para realizar observações não invasivas. Com a combinação de dados da observação de um alvo em diferentes ângulos ou usando mais do que um telescópio em simultâneo, pode-se obter o aspeto tomográfico desta técnica. É por isso que também se refere a ela usando o termo tomografia muónica ou tomografia de muões.

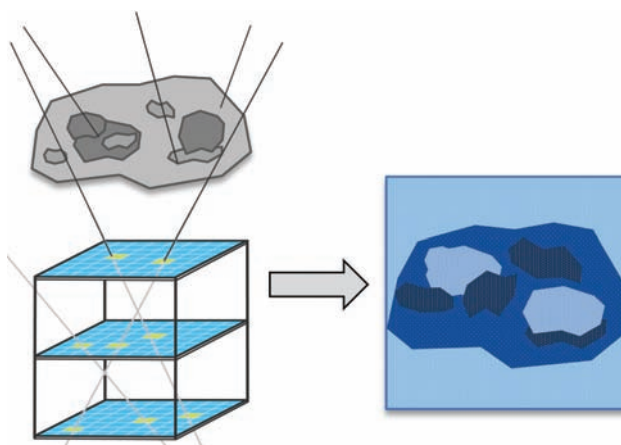


Figura 2 - Exemplificação da técnica de muografia: os muões atravessam o alvo de matéria e alguns chegam aos detetores do telescópio de muões (esquerda), produzindo sinais elétricos que permitem reconstruir a trajetória dos muões e criar muografias com a distribuição das densidades médias do alvo (direita).



Atualmente, a muografia é aplicada sob duas formas. A mais usual é a muografia de transmissão, por vezes também referida como de absorção, que utiliza um telescópio para registar a contagem dos muões transmitidos através da matéria, vindos da direção da observação, em trajetórias essencialmente retilíneas. Neste método, o fluxo de muões é medido dentro do intervalo angular de aceitação do telescópio e considera a probabilidade de uma determinada percentagem do fluxo ser transmitida através da coluna de matéria numa dada direção do alvo observado. Por outras palavras, o que é medido é a opacidade da matéria na linha de visão dos detetores, dependente da densidade média da coluna de matéria atravessada em cada direção. A segunda forma é a muografia de dispersão que faz uso de dois telescópios em paralelo, em lados opostos do alvo sob observação. Neste método, são registadas as trajetórias de entrada e de saída dos muões através do alvo em estudo, entre os dois telescópios. Nas sucessivas interações atómicas, os muões acumulam pequenas deflexões, efeito da dispersão múltipla de Coulomb. O objetivo desta forma de muografia é localizar elementos de grande número atómico no interior do alvo (p. ex. materiais radioativos), os quais provocam desvios significativos nas trajetórias dos muões. A reconstrução das trajetórias nesta forma revela uma tomografia muónica mais precisa, permitindo identificar com maior rapidez a presença de materiais muito densos no interior dos volumes analisados.

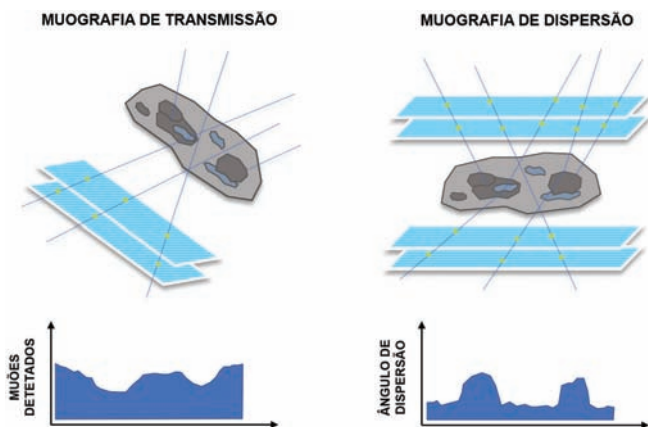


Figura 3 - Visualização esquemática da geometria de detecção (detetores e alvo rochoso) e da informação detetada na muografia de transmissão (menor número de deteções nas direções do alvo com densidade média maior) e de dispersão (maior ângulo de dispersão nas regiões com elementos de maior número atómico).

A concretização de ambas as formas de muografia estão dependentes da distribuição estatística de grandes amostras de contagens de muões, para que o contraste entre materiais de densidades diferentes se torne aparente. De um modo geral a muografia de transmissão é o método ideal para estruturas médias e de grandes dimensões, enquanto a muografia de dispersão é mais adequada para alvos pequenos ou médios, pois a reconstrução das trajetórias torna-se inexequível para alvos muito grandes, como vulcões [3].

#### 4. Áreas de aplicação

O conhecimento sobre partículas subatómicas, e em particular sobre os muões, conseguido inicialmente com a

primeira geração de aceleradores de partículas da década de 50, abriu portas para novas aplicações. A primeira dessas aplicações documentada, a fazer uso de muões, aconteceu em 1955. A partir das leituras do fluxo de muões medidas com um contador Geiger colocado num túnel na Austrália, Eric George conseguiu determinar a atenuação causada pela ionização dos muões e daí inferir a espessura de gelo acima do túnel [4]. Anos mais tarde, em 1969, Luis Alvarez lidera uma equipa de cientistas que emprega detetores de muões com características semelhantes às atuais, em arqueologia, para sondar o interior da Pirâmide de Quéfren, obtendo a primeira imagem de muografia, que não revelou nenhum espaço desconhecido no seu interior [5].

Com o avanço da tecnologia, os equipamentos de deteção tornaram-se mais compactos, robustos e precisos, permitindo alargar a sua aplicação a várias áreas. Aquela onde mais se tem usado e desenvolvido a muografia é a vulcanologia. Em 1995, a equipa de Nagamine (Japão), obteve imagens do Monte Tsukuba medindo a atenuação do fluxo de muões [6]. O resultado deste trabalho motivou futuras aplicações em vários vulcões no Japão, como Satsuma-Iwojima [7], Sakurajima [8] e talvez o exemplo mais importante foi a monitorização da erupção em tempo real do Monte Asama, em 2009 [9]. O Japão lidera em aplicações em vulcanologia, devido à sensibilidade do país nesta área, mas outros países seguiram os mesmos passos, como a Itália em aplicações no Vesúvio, Etna e Stromboli [10], ou a França em Puy de Dôme [11] e La Soufrière de Guadeloupe [12], entre outros. Ainda no campo da geofísica, têm sido feitos estudos sobre a utilização da muografia em exploração mineira, envolvendo a observação no interior de minas ou no interior de sondagens [13]. O projeto LouMu é também, dentro deste campo da ciência, uma aplicação em ambiente subterrâneo, dentro de uma mina [14]. Na área de engenharia civil também foram encontrados meios de monitorar a estabilidade de edifícios históricos, como no Palazzo della Loggia em Itália [15]. Outro grande projeto que usa muografia é o ScanPyramids que arrancou em 2015, novamente no Egito e aplicada à arqueologia, com o objetivo de fazer observações não invasivas às várias pirâmides do país. Em 2017, fizeram uma grande descoberta na Pirâmide de Quéfren, uma câmara de grandes dimensões, situada no seu interior e até então desconhecida [16]. Todas estas aplicações fizeram uso da muografia de transmissão, com medições da atenuação do fluxo de muões através dos alvos.

Os avanços que permitiram explorar aplicações com muografia de dispersão foram feitos pelo Laboratório Nacional de Los Alamos, México, em 2003 [17]. As áreas de controlo e segurança são as que mais podem tirar partido deste conhecimento. Para o controlo de carga de camiões, são exemplos o Portal Scanner nas Bahamas [18] e o Muon Portal Project desenvolvido em Itália [19]. Na segurança nuclear, a monitorização e caracterização de contentores de armazenamento de resíduos nucleares beneficia do uso da muografia de dispersão [20], servindo de exemplo a aplicação feita nos reatores de Fukushima Daiichi [21], após o acidente nuclear.

Uma última aplicação que vale a pena mencionar e que está em estudo para o futuro é equipar rovers enviados para Marte com detetores de muões, para analisarem o interior das várias estruturas geológicas que se encontram acima da superfície marciana [22].

A muografia é uma área em crescimento e sobre ela já foram escritas excelentes revisões da literatura como as de Chechia [23], Procurer [24], Kaiser [25] e Bonechi [26], que desenvolvem em muitos aspetos os assuntos abordados neste artigo, que tenciona divulgar em língua portuguesa a técnica de muografia.

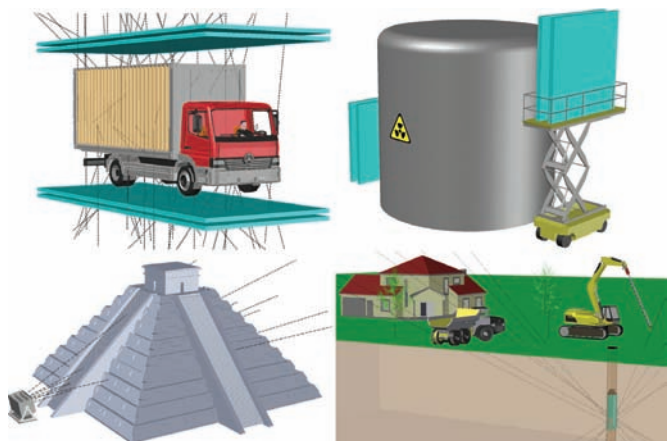


Figura 4 - Em cima, da esquerda para a direita, duas aplicações de muografia de dispersão: inspeção da carga de camiões e monitoração de contentores de armazenamento nuclear. Em baixo, da esquerda para a direita, duas aplicações de muografia de transmissão: observação do interior de grandes estruturas acima da superfície (p. ex. uma pirâmide) e observações subterrâneas dentro de sondagens (Bonechi et al. 2020).

## 5. Projeto LouMu

No panorama português, o projeto LouMu está a levar a cabo a primeira aplicação de muografia em Portugal, na forma de muografia de transmissão. É uma aplicação que está a ser desenvolvida através da colaboração entre o Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP), o Instituto de Ciências da Terra da Universidade de Évora e o Centro Ciência Viva do Lousal (CCV Lousal), contando também com o suporte do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). Os conhecimentos multidisciplinares dos membros da equipa são aplicados nas várias etapas do trabalho. A aplicação de muografia no Lousal envolve: a criação de simulações muográficas, para previsão e comparação; desenvolvimento de ferramentas de análise dos dados de muografia; trabalho geofísico para o estudo do terreno sobre a mina, resultando num modelo geológico de referência para a observação com a muografia; desenvolvimento e otimização dos telescópios de muões; instalação, observação, recolha e análise da informação muográfica obtida no local.

A Mina do Lousal é um exemplo de sucesso de requalificação de zonas mineiras abandonadas, funcionando atualmente como Mina da Ciência, dentro da rede de museus Ciência Viva, organizando visitas ao museu de ciência, museu mineiro e à mina [27].

A geologia da Mina do Lousal é conhecida e oferece as infraestruturas ideais para esta aplicação de muografia em ambiente subterrâneo, tendo sido por isso escolhida a galeria superior da mina (Galeria Waldemar) como o local da observação. O objetivo é fazer um levantamento geológico do terreno, entre o telescópio e a superfície, usando a Falha de Corona e os contrastes com as massas de sulfuretos como alvos da observação e aprimorar as informações existentes com novos dados, enquanto se avalia o desempenho do telescópio e das ferramentas de análise de muografia.

Um protótipo do telescópio de muões, o MiniMu (Fig. 5, esquerda), foi colocado no início de 2019 na galeria para divulgação e teste do equipamento eletrónico às condições da mina. Atualmente é parte integrante das visitas realizadas pelo Centro Ciência Viva do Lousal à mina.

Todos os equipamentos de deteção são construídos no laboratório de instrumentação do LIP em Coimbra. Os detetores utilizados são do tipo *Resistive Plate Chamber* (RPC) que usam um gás no seu interior que é ionizado na passagem dos muões. O sinal elétrico produzido em simultâneo em diferentes RPC, colocados em paralelo, determinam a direção da trajetória de cada muão, resultando nas muografias.

Um telescópio maior, nomeado CorePix (Fig. 5, direita), com 4 planos RPC quadrados de dimensão 1 m x 1 m, foi instalado no paiol 4 da galeria, no segundo trimestre de 2021, onde se encontra a operar. A recolha dos dados de muografia, decorrentes da observação, são analisados à distância em tempo real e o processo continuará, durante o tempo necessário, para fazer o reconhecimento da geologia do terreno em estudo.

Após esta aplicação teste no Lousal, o objetivo do Projeto LouMu é desenvolver e disponibilizar a técnica de muografia em Portugal para outras aplicações em geofísica, como mapeamento geológico e prospeção geofísica.

Uma página na *internet* contendo informações sobre o projeto e os diferentes aspetos do trabalho foi criada e está disponível publicamente [28].



Figura 5 - À esquerda, MiniMu, protótipo usado para testar o equipamento nas condições da mina e para divulgação do projeto nas visitas ao Lousal; à direita, CorePix, telescópio de muões com quatro RPCs, a operar no interior do paiol 4 da Galeria Waldemar.

## 6. Agradecimentos

Este projeto de I&D é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, referência EXPL/FIS-OUT/1185/2021. A FCT financia também a bolsa de doutoramento do autor correspondente, integrada no LouMu, referência PD/BD/150490/2019 e no âmbito do ICT o projeto com referência UIDB/04683/2020.

O projeto é desenvolvido no âmbito de atividades desenvolvidas pelos polos de Lisboa, Coimbra e Minho do LIP, do Grupo de Investigação de Dinâmica da Litosfera do ICT – UÉvora e pelo Centro Ciência Viva do Lousal.

Um agradecimento especial à equipa do Centro Ciência Viva do Lousal pelo apoio ao projeto, em particular a Vanessa Pais e João Costa, que organizam as atividades de divulgação no museu e ajudam na manutenção dos telescópios na mina.

### Referências

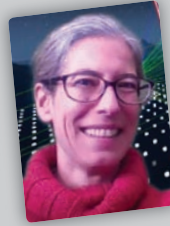
- [1] C. Anderson, & S. H. Neddermeyer, “Cloud chamber observations of cosmic rays at 4300 meters elevation and near sea-level”, *Physical Review*, 50, 263-271, (1936)
- [2] M. Tanabashi et al., « Review of particle physics », *Phys. Rev. D* 98 030001, (2018)
- [3] C. Rhodes, “Muon Tomography: Looking inside Dangerous Places”, *Science Progress*, 98(3), 291-299, (2015)
- [4] E. George, “Cosmic rays measure overburden of tunnel”, *Commonwealth Eng.* July 1, 455, (1955)
- [5] L.W. Alvarez, et al., “Search for hidden chambers in the pyramids”, *Science* 167, 832, (1970).
- [6] K. Nagamine et al., “Method of probing inner-structure of geophysical substance with the horizontal cosmic-ray muons and possible application to volcanic eruption prediction” *Nucl. Inst. Methods A* 356, 585, (1995)
- [7] H. Tanaka et al., “Cosmic-Ray Muon Imaging of Magma in a Conduit: Degassing Process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan”, *Geophysical Research Letters* 36(1):1-5, (2009).
- [8] L. Oláh et al., “High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors”, *Sci Rep* 8, 3207, (2018).
- [9] H. Tanaka et al., “Detecting a mass change inside a volcano by cosmic-ray muon radiography (muography): first results from measurements at Asama volcano, Japan”, *Geophys. Res.Lett.* 36, 1944, (2009).
- [10] R. D’Alessandro et al., “Volcanoes in Italy and the role of muon radiography”, *Phil. Trans. R. Soc. A.3772018005020180050*, (2019).
- [11] C. Cârloganu et al., “Towards a Muon Radiography of the Puy de Dôme” *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 2(1):55-60, (2013).
- [12] J. Marteau et al., “DIAPHANE: Muon tomography applied to volcanoes, civil engineering, archaeology”, *Journal of Instrumentation*. 12, (2016) .
- [13] A. Bonneville et al., “A novel muon detector for borehole density tomography”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A* 851, 108-117, (2017)
- [14] P. Teixeira et al., “Muography for Underground Geological Surveys: ongoing application at the Lousal Mine (Iberian Pyrite Belt, Portugal)”, *J AIS*, vol. 2022, Apr. (2022)
- [15] A. Zenoni et al., “Historical building stability monitoring by means of a cosmic ray tracking system”, *arXiv:1403.1709*, (2014).
- [16] K. Morishima et al., “Discovery of a big void in Khufu’s Pyramid by observation of cosmic-ray muons”, *Nature* 552, 386-390, (2017).
- [17] K. Borozdin et al., “Radiographic imaging with cosmic-ray muons”, *Nature* 422, 277, (2003)
- [18] R. Patnaik et al., “Image based object identification in muon tomography”, 2014 *IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, pp. 1-9, (2014).
- [19] F. Riggi et al., “The Muon Portal Project: Commissioning of the full detector and first results”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A*, Volume 912, Pages 16-19, ISSN 0168-9002, (2018).
- [20] D. Mahon et al., “First-of-a-kind muography for nuclear waste characterization”, *Phil. Trans. R. Soc. A.3772018004820180048*, (2019).
- [21] H. Miyadera et al., “Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons”, *AIP Advances*. 3, (2013).
- [22] S. Kedar et al., “Muon radiography for exploration of Mars geology”, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 2, 157-164, (2013).
- [23] P. Checchia, “Review of possible applications of cosmic muon tomography”, *JINST* 11 (12), C12072, (2016).
- [24] S. Procureur, “Muon imaging: principles, technologies and applications”, *Nucl. Inst. Methods A* 878, 169, (2018).
- [25] R. Kaiser, “Muography: overview and future directions”, *Philos. Trans. R. Soc. A* 377, 0049, (2018).
- [26] L. Bonechi et al., “Atmospheric muons as an imaging tool. *Reviews in Physics*, Volume 5, 100038, ISSN 2405-4283, (2020).
- [27] J. Relvas et al., “Lousal, Portugal: a successful example of rehabilitation of a closed mine in the Iberian Pyrite Belt”, *Society for Geology Applied to Mineral Deposits SGA News*, Nº 31, June 2, 1-16, (2012).
- [28] Página LouMu: <https://pages.lip.pt/loumu/en/loumu/>





Pedro Teixeira, licenciou-se em Astronomia com menor em Geologia na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (2015). Completou o Mestrado em Geologia (2017), na mesma universidade, com uma tese na área da Geofísica. Atualmente, frequenta o Doutoramento

em Ciências da Terra e do Espaço, especialidade em Geofísica, na Escola de Ciências e Tecnologias da Universidade de Évora. A sua investigação, inserida no projeto LouMu, está a contribuir para o desenvolvimento da técnica de muografia em Portugal. Aliando técnicas geofísicas à observação dos muões no estudo do terreno e examinando a sua complementaridade, levando à disponibilidade da muografia para mais aplicações na área da geofísica.



Sofia Andringa, é licenciada e mestre em Física pela FCUL e doutorou-se no Instituto Superior Técnico, em 2003, com uma tese em Física de Partículas, explorando dados do acelerador LEP no CERN. É investigadora no LIP onde integra desde 2007 vários projetos na área da

física de neutrinos e de raios cósmicos. Entre outros, participa no Observatório de Neutrinos de Sudbury no Canadá e no Observatório Pierre Auger na Argentina. Tem-se interessado também pelas aplicações da física de partículas às Ciências da Terra, através do estudo dos geoneutrinos e da utilização de muões para prospeção geofísica, coordenando o Projeto LouMu.



Mourad Bezzeghoud, é professor catedrático no Departamento de Física da Universidade de Évora. Licenciou-se em Eng. Geofísica no Inst. Nat. des Hydrocarbures et de la Chimie (Argélia, 1981), possui um mestrado (DEA) em Geofísica interna e Geoquímica e um doutoramento na área da Sismologia (U. Denis Diderot, Paris, 1987). Realizou a agregação em Ciências da Terra e do Espaço (2011) na U. de Évora. Foi docente na U. Pierre et Marie Curie (Paris, 1986-88), investigador e Diretor de Depto. no Centre en Astronomie, Astrophysique et Géophysique de Argel (1988-94) onde fundou o Depto. de Sismologia e liderou a instalação das primeiras redes sísmica telemétrica e geodésica em Argélia. Foi professor/investigador convidado na “École National des Mines de Paris” (1985), na U. Complutense de Madrid (1996 e 2010) e na “École Normal Supérieure de Paris” (2011). Entre 2013 e 2020, foi Diretor da Escola de Ciências e Tecnologia da U. Évora. Atualmente, é investigador e coordenador do Instituto de Ciências da Terra (Polo de Évora), Presidente do Conselho Científico da Escola de Ciências e Tecnologia da U. Évora. É coordenador do projeto LouMu e dedica a sua investigação à Geofísica/Sismologia, nomeadamente ao estudo do fenómeno sísmico e ao risco a ele associado.

# Nanopartículas no diagnóstico e tratamento do cancro - oportunidades e desafios

Sara Freitas<sup>1</sup>, Sofia Caspani<sup>1</sup>, Ricardo Magalhães<sup>1</sup>, Célia Sousa<sup>1</sup>, João H. Belo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IFIMUP, Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal

celiasousa@fc.up.pt e jbelo@fc.up.pt

## 1. Introdução

O envelhecimento e o crescimento da população têm levado a um aumento da incidência de cancro e mortalidade em todo o mundo. Apenas no ano de 2018, a Organização Mundial da Saúde (OMS) contabilizou cerca de 18,1 milhões de novos casos e 9,6 milhões de mortes [1]. Apesar de ser uma das principais causas de morte, as opções de tratamento em alguns tipos de cancro ainda são limitadas, sendo a radioterapia, quimioterapia e cirurgia as principais estratégias terapêuticas. A eficácia destes tratamentos está comprovada, no entanto em alguns tipos de cancro a quimioterapia está limitada por uma falta de seletividade às neoplasias e com uma bioacessibilidade limitada dos medicamentos ao tumor [2]. No caso da radioterapia, esta está limitada pelos tecidos saudáveis circundantes cuja exposição à radiação ionizante deve ser evitada de modo a proporcionar aos pacientes uma melhor qualidade de vida no futuro a médio e longo prazo, bem como a radio-resistência apresentada por algumas neoplasias [3]. Consequentemente, tem crescido o interesse pelo desenvolvimento de novas terapias oncológicas que possuam menos efeitos adversos e que se limitem a matar células tumorais de forma eficiente, poupando as células dos tecidos saudáveis circundantes [4]. Esta estratégia pode passar pelo recurso à nanotecnologia, cujo aparecimento revolucionou os procedimentos de deteção e tratamento do cancro. Esta não só permitiu aumentar a eficácia das terapias existentes através de uma maior capacidade de direcionamento e eficácia localizada do medicamento (limitando a sua toxicidade) como também aprimorou a sensibilidade das técnicas de diagnóstico possibilitando melhores perspetivas para o paciente [5]. Nanotubos de carbono, quantum dots, nanopartículas superparamagnéticas, nanofios, lipossomas, entre outros, são alguns dos materiais utilizados para deteção e/ou tratamento do cancro, alguns já utilizados na prática clínica, outros em ensaios clínicos e muitos na fase de investigação [5].

## 2. Nanopartículas em medicina

Nanoestruturas são partículas que possuem pelo menos uma dimensão na faixa de tamanhos nanométricos, tipicamente até ~ 100 nm. Indetetáveis pelo olho humano, as nanoestruturas podem exibir propriedades físicas e químicas significativamente diferentes quando comparadas com materiais de maiores volumes ou dimensões. A sua elevada razão entre área de superfície e volume permite que elas interajam, que absorvam radiação específica ou transportem pequenas biomoléculas como ADN, ANR, fármacos, proteínas, entre outras, para o local alvo e, assim, aumentar a eficácia dos agentes terapêuticos [6]. Por outras palavras, o desenvolvimento da nanomedicina permitiu a síntese de nanoestruturas com morfologia precisa e com a possibilidade de modificar a sua superfície de modo a manipular as suas características para aplicações específicas através da sua funcionalização com diferentes tipos de moléculas.

Entre as nanopartículas de primeira geração, surgiu o DOXIL® (cloridrato de doxorubicina, Janssen) que foi o primeiro medicamento nanoformulado a obter aprovação da *Food and Drug Administration* (FDA), em 1995, para aplicação clínica em doentes com Sarcoma de Kaposi associado ao HIV [6]. Recentemente, estas nanopartículas têm sido usadas também no tratamento do cancro da mama, dos ovários e outros tumores sólidos. Ainda na categoria da nanomedicina aplicada a tratamentos oncológicos, existe o ThermoDox® (Celsion) que foi aprovado pela FDA em 2016 como um agente termo-dependente que liberta localmente o fármaco encapsulado (a doxorubicina) quando aquecido a 40 °C e 45 °C. A temperatura cria aberturas no lipossoma que, por sua vez, libertam a doxorubicina diretamente no tumor alvo e ao redor dele. A eficácia deste agente foi verificada em ensaios clínicos em combinação com hipertermia (aumento de calor induzido por fontes externas), onde se verificou que a concentração intratumoral de fármaco aumenta 3,7 vezes quando comparada com o ThermoDox® sem indução de hipertermia [7].

Este é o primeiro de artigo de uma série de artigos para a Gazeta da Física promovida pelo Núcleo Português de Magnetismo (NPM: <https://fisica-materia-condensada.spf.pt/npm>).

Num contexto mais atual, não se pode deixar de referir o uso das nanopartículas nas vacinas que surgiram para combater o COVID-19. Aqui, mais uma vez, as nanopartículas lipídicas são o veículo de transporte e entrega usado nas vacinas da Moderna e Pfizer-BioNTech COVID-19 [8].

Para além das aplicações das nanopartículas no transporte e encapsulamento/libertação de fármacos, estas podem ainda ser desenvolvidas como agentes mediadores de terapias como a hipertermia magnética ou fototerapia. Estas terapias dependentes de nanopartículas, especialmente quando aplicadas concomitantemente com quimioterapia e radioterapia, são abordagens promissoras com enorme potencial para melhorar a eficiência das modalidades de tratamento atuais. Nesta categoria, destacam-se as nanopartículas magnéticas e plasmónicas que podem ser ativadas por estímulos externos tal como radiação eletromagnética ou campos magnéticos. Além disso, estas nanopartículas também podem ser usadas como agentes de contraste em imagem por raios-X ou em ressonância magnética nuclear (RMN).

### 3. Hipertermia magnética e morte celular por movimento mecânico induzido por campo magnético: oportunidades para as nanopartículas magnéticas

Tal como mencionado anteriormente, existe um interesse crescente em novas modalidades de tratamento oncológico que sejam capazes de controlar os tumores a nível celular e que permitam um tratamento mais localizado com redução dos efeitos secundários induzidos em tecidos saudáveis. Neste contexto, uma abordagem particularmente interessante consiste em destruir células cancerígenas através do uso de nanomagnetes (nanopartículas magnéticas) controlados por campos magnéticos externos. A maioria dos estudos experimentais neste tópico aborda o uso de nanopartículas magnéticas para produzir um aquecimento local no interior do corpo, através da aplicação de um campo

magnético alternado (AC ou AMF em inglês como ilustrado na figura 1) [9].

Esta técnica é conhecida como hipertermia magnética, figura 1(a), sendo as nanopartículas superparamagnéticas de óxido de ferro, especialmente de magnetite ou maghemite, as mais frequentemente usadas para este fim [9].

Uma outra estratégia para a destruição de células cancerígenas usando nanomateriais é conhecida como morte celular por movimento mecânico induzido por campo magnético, figura 1(b). Esta técnica consiste em induzir a morte celular programada pela aplicação de forças nas células, recorrendo ao uso de nanomagnetes controlados por campos magnéticos AC. Ao contrário da hipertermia magnética, esta abordagem não se baseia num aquecimento local, mas sim em forças que o nanomagnete exerce sob a célula causando dano na sua membrana ou organelo celular que leva à apoptose da célula, necessitando de campos magnéticos com requisitos menos exigentes (nomeadamente menor frequência e amplitude) [11]. Para além de nanopartículas magnéticas, outros tipos de nanomateriais, conhecidos como nanoestruturas de alta razão de forma, tais como, por exemplo, nanodiscos, nanofios ou nanotubos, podem ser usados nesta técnica. Adicionalmente, é possível funcionalizar os nanomateriais usados nestas duas abordagens, de modo a torná-los específicos para um determinado tipo de cancro [12].

Em termos de ensaios clínicos, a hipertermia magnética tem sido transferida do laboratório para a prática clínica, nomeadamente para o tratamento do glioblastoma e do cancro da próstata. Por exemplo, a MagForce (Berlín, Alemanha) já realizou vários ensaios clínicos para investigar esta abordagem na terapia do cancro do pâncreas [13]. Contudo, apesar das vantagens promissoras destas duas abordagens para o tratamento do cancro, é necessário mais trabalho de investigação e de investigação translacional para conseguirmos perceber o potencial completo destas estratégias no tratamento do cancro.

### 4. Fototermia usando nanopartículas plasmónicas

A terapia fototérmica é uma abordagem de tratamento oncológico minimamente invasiva e altamente localizada. Tal como o nome indica, esta baseia-se na conversão de radiação eletromagnética em calor através da estimulação de agentes foto-absorventes, que são administrados no corpo por via intravenosa ou intratumoral. Assim que os agentes se encontrem concentrados dentro do tumor, podem absorver a energia proveniente de uma fonte externa potencializando localmente os efeitos da hipertermia (Figura 2) [14,15]. Nesta técnica, podem ser usados feixes de luz laser com diferentes comprimentos de onda, no entanto a do infravermelho próximo (entre 700 nm e 1100 nm) é tipicamente a fonte de energia mais utilizada nesta técnica. A capacidade de penetração da radiação aliada à transparência parcial dos tecidos biológicos nesta faixa espectral torna-se vantajosa, limitando o aquecimento dos tecidos circundantes saudáveis enquanto os tecidos tumorais são aquecidos e erradicados com grande precisão [14].

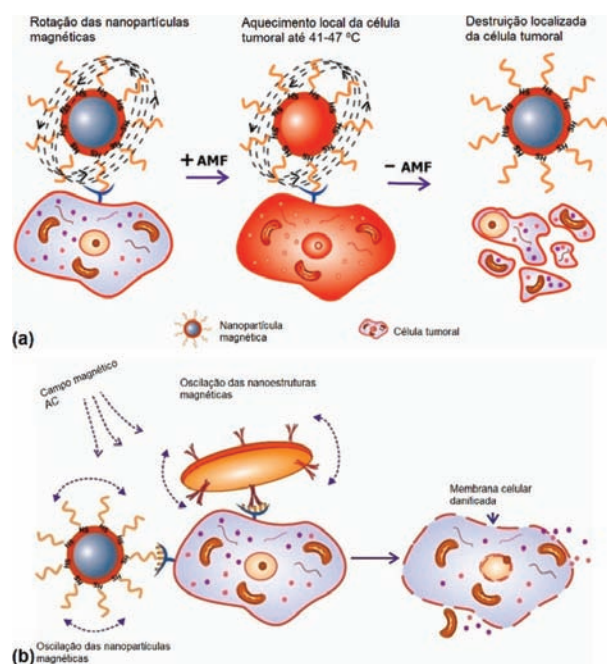


Figura 1 - Conceitos de (a) hipertermia magnética e (b) morte celular por movimento mecânico induzido por campo magnético. Adaptado de [10].



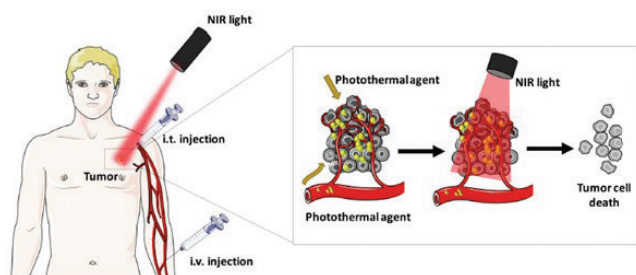


Figura 2 - Esquema ilustrativo da terapia fototérmica [14].

Para serem considerados ideais, os agentes de terapia fototérmica devem reunir certas características tais como biocompatibilidade, tamanho adequado para se acumularem no tumor, capacidade para serem eliminados através de vias metabólicas e excelente eficiência de conversão de luz em calor. Na classe dos nanomateriais, as nanoestruturas de ouro têm sido particularmente exploradas como agentes fototérmicos uma vez que para além de serem versáteis e biocompatíveis, é possível controlar e relacionar as suas propriedades físico-químicas com o seu tamanho e morfologia. Por outras palavras, a estrutura das nanopartículas de ouro pode ser desenhada especificamente para garantir que elas apresentem um máximo de absorção da radiação eletromagnética na região espectral desejada, ou seja, com elevada absorção na região do infra-vermelho próximo [15]. Para além disto, o ouro ainda é considerado uma plataforma de fácil funcionalização, permitindo que a superfície destas nanoestruturas seja conjugada com moléculas com a capacidade de prolongar o tempo de circulação e/ou aumentar a penetração tumoral [14]. Embora a fototerapia mediada por nanopartículas de ouro já tenha demonstrado resultados promissores in vivo (com alguns modelos animais) para diferentes tipos de cancro, na prática clínica ainda há desafios que têm de ser ultrapassados. A capacidade finita de penetração da radiação em profundidade, por exemplo, pode afetar a eficácia do tratamento e limitar esta técnica a tumores mais superficiais, como o caso do cancro da mama ou o cancro colorrectal [14,15]. Este último ponto pode ser contornado recorrendo a fibras ópticas direcionadas para os tumores mais profundos [14].

Atualmente, terapias baseadas em hipertermia não são aplicadas individualmente em prática clínica, mas sim como uma modalidade terapêutica adjuvante que aumenta a eficácia dos tratamentos convencionais. A combinação das diferentes modalidades pode resultar num efeito sinérgico que deixa os tumores mais suscetíveis, aumentando as chances de erradicação completa do tumor com uma redução da dosagem de drogas, nanopartículas e radiação [14,16].

### 5. Nanopartículas em imagem médica

A deteção precoce e o diagnóstico de doenças são uma parte crucial na prática clínica, especialmente em doenças oncológicas. A tecnologia de imagiologia médica desempenha um papel fundamental na deteção precoce e na avaliação da evolução da resposta terapêutica num vasto conjunto de doenças. As tipologias de imagiologia

usadas atualmente incluem: radiografia por raios-X, tomografia computadorizada, ressonância magnética (IMR), ultrassons, tomografia de positrões, tomografia computadorizada de emissão de fóton único e fluorescência. De modo a obter informação anatómica e funcional mais precisa, são tipicamente necessários agentes de contraste que permitem amplificar o contraste entre tecidos normais e lesões. Os agentes de contraste usados normalmente são pequenas moléculas com metabolismo rápido que têm uma distribuição não-específica e por vezes apresentam uma potencial toxicidade indesejada [17]. Recentemente, alguns nanomateriais têm revelado um grande potencial no aperfeiçoamento das técnicas de deteção e imagiologia médica. Em particular, já foi demonstrado que: i) nanopartículas (super)paramagnéticas conseguem amplificar mudanças de sinal em ressonância magnética; ii) nanopartículas de ouro ou nanopartículas "quantum dots" tornam-se visíveis em microscopia eletrónica e em fluorescência, respetivamente [18]. Assim, diferentes partículas estão a ser desenvolvidas para maximizar várias funcionalidades, tais como o aumento de sensibilidade e/ou absorção e a modulação de energia [19].

O objetivo desta secção é fundamentalmente ilustrar alguns dos exemplos paradigmáticos do uso de nanopartículas em ressonância magnética. A imagiologia por ressonância magnética é uma técnica não-invasiva muito poderosa, que permite a visualização tridimensional de tecidos orgânicos. Na imagiologia por ressonância magnética, o uso de agentes de contraste permite aumentar a sensibilidade e a especificidade da técnica, como é claramente demonstrado na Figura 3. Os agentes de

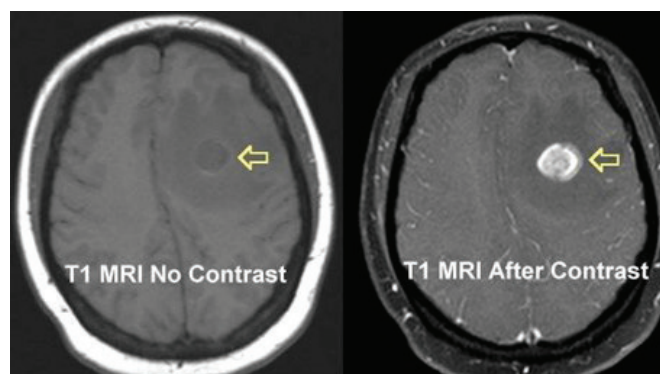


Figura 3 - Efeito da aplicação do contraste em imagens de ressonância magnética.

contraste mais utilizados na prática clínica são complexos de Gadolínio paramagnéticos. No entanto, estes complexos moleculares apresentam várias desvantagens como por exemplo o seu curto tempo de circulação e a sua relativa toxicidade, que podem causar vários efeitos secundários tais como a fibrose sistémica nefrogénica [20]. Estas dificuldades podem ser ultrapassadas com o uso de nanopartículas de óxidos de ferro – que têm sido amplamente investigadas como agentes de contraste seguros. Estas nanopartículas apresentam baixa toxicidade, são biodegradáveis, quimicamente estáveis e apresentam uma suscetibilidade magnética elevada mesmo a reduzidos campos magnéticos. Em particular, as nanopartí-

culas superparamagnéticas de óxidos de ferro (SPION), que são formadas por pequenos (< 50 nm) cristais de óxidos de ferro, já demonstraram melhorias significativas no contraste obtido em imagens de ressonância magnética. De um modo geral, todas as nanoestruturas podem ser revestidas ou conjugadas com diferentes moléculas para promover a sua especificidade e funcionalização. Neste contexto, a ligação de SPION com “pegylated dendrons” hidrofílicos permite reprodutibilidade e multifuncionalização, enquanto que a ligação com “lactoferrin” resulta num aperfeiçoamento da visualização de gliomas cerebrais.

De modo a aumentar a sua biocompatibilidade, a solubilidade na água e o tempo de circulação na corrente sanguínea, os SPION podem ser funcionalizados com diferentes entidades tais como moléculas “peptide amphiphile”, polietileno e polietileno glicol. Por sua vez, para aumentar a sua seletividade para com células cancerígenas específicas, os SPION podem ser conjugados com anticorpos específicos. Para além dos óxidos de ferro, a investigação científica tem-se dedicado ao estudo de nanoestruturas com outras composições químicas tendo em vista a melhoria de contraste em imagiologia [21]. Por exemplo, as nanopartículas dopadas com lantanídeos, são fortes candidatas a agentes de contraste. Paralelamente, nanopartículas de  $\text{NaGdF}_4$  têm sido desenvolvidas como agentes de contraste multimodais e em *upconversion imaging*. Por seu lado, iões de  $\text{Dy}^{3+}$  e  $\text{Ho}^{3+}$  exibem características magnéticas muito úteis para ressonância magnética de campos elevados, dados os seus curtos tempos de relaxação e o seu momento magnético elevado. Outras partículas de elevado interesse são os nanocompósitos à base de manganês (óxidos de manganês e ferrites de manganês) que têm demonstrado elevado potencial de contraste positivo em IMR.

Mais recentemente, o uso de nanoestruturas antiferromagnéticas (fase magnética com spins orientados antiparalelamente) tem sido estudado devido ao seu duplo contraste positivo e negativo – dadas as suas propriedades magnéticas únicas, tais como a elevada magnetização de saturação a baixo campo. Em particular, o uso de nanofios magnéticos tem sido muito explorado para esta aplicação. Neste contexto, nanofios de Fe, Ni e segmentados de Fe/Au, Fe/Pt e Fe/Ni, com diferentes revestimentos, têm demonstrado um elevado potencial como agentes de contraste [19]. Para além de ressonância magnética, as nanopartículas também têm sido exploradas para outras técnicas de imagiologia. Por exemplo, nanopartículas de ouro são tipicamente usadas em tomografia computadorizada, em conjunto com iodo e bismuto em PET, em SPECT e em imagiologia ótica e fotoacústica. Para além das nanopartículas de ouro, outras nanoestruturas têm sido desenvolvidas tais como o tecnécio em SPECT e os *quantum dots* em imagiologia óptica [17].

## 6. Teranóstico: vantagens de poder ter imagem e tratamento em simultâneo

O termo “teranóstico” resulta da combinação de dois conceitos já abordados nas secções anteriores – terapia e diagnóstico [14,22]. Consiste, portanto, numa estra-

tégia inovadora cujo objetivo é reunir no mesmo nanomaterial as duas modalidades (terapia e imagem). Desta forma, os nanomateriais são em geral sistemas multifuncionais e biocompatíveis que permitem simultaneamente diagnosticar, administrar terapia e monitorizar a resposta à mesma. Nanopartículas de ouro são um bom exemplo porque para além de serem agentes de imagem eficazes com um elevado potencial de contraste (secção 5) também podem ser utilizados em técnicas terapêuticas como a fototerapia (secção 3). Esta abordagem apresenta diversas vantagens tais como: i) um diagnóstico aprimorado, ii) efeitos colaterais reduzidos para tecidos normais, iii) eliminação de procedimentos de várias etapas que, por sua vez, se traduzem numa redução dos atrasos no tratamento e atendimento do paciente. Tudo isto em paralelo com a possibilidade de localização do tumor e monitorização em tempo real da temperatura local, superando uma das principais desvantagens dos atuais métodos de hipertermia a nível clínico [14,22].

## 7. Conclusão

A nanomedicina aliada à exploração das propriedades únicas das nanopartículas tem vindo a melhorar a capacidade de deteção e diagnóstico do cancro e aumentar a especificidade dos tratamentos de células cancerígenas. Para além do DOXIL®, nanopartícula de primeira geração com aplicações no tratamento do cancro da mama, dos ovários e outros tumores sólidos, já outros tratamentos têm sido desenvolvidos. Nestes, as nanopartículas atuam como agentes mediadores de terapias e são ativadas por estímulos externos como campos magnéticos ou radiação eletromagnética. Nesta categoria destacam-se a hipertermia magnética e a fototerapia. A hipertermia magnética consiste em destruir células cancerígenas através do uso de nanomagnetes (nanopartículas magnéticas) que são controladas por campos magnéticos externos alternados. Estes campos produzem um aquecimento local no interior do corpo que induz a apoptose, ou morte celular programada. Nanopartículas superparamagnéticas de óxido de ferro, especialmente de magnetite ou maghemite são as mais usadas nesta técnica. Por outro lado, a terapia fototérmica, outra abordagem de tratamento oncológico minimamente invasiva e altamente localizada, baseia-se na conversão de radiação eletromagnética em calor através da estimulação de agentes foto-absorventes que são administrados no corpo por via intravenosa ou intratumoral. Assim que os agentes se encontram concentrados dentro do tumor, podem absorver a energia proveniente de uma fonte externa potencializando localmente os efeitos da hipertermia. Nanoestruturas de ouro têm sido particularmente exploradas como agentes fototérmicos uma vez que para além de fornecerem uma plataforma de fácil funcionalização e serem biocompatíveis, têm uma elevada absorção na região do infra-vermelho próximo. A nível da deteção de cancro, alguns nanomateriais como nanopartículas (super)paramagnéticas, nanopartículas de ouro ou nanopartículas “*quantum dots*” têm revelado um grande potencial no aperfeiçoamento das técnicas convencionais de imagiologia médica. Neste campo, diferentes partículas estão a ser desenvolvidas para maximizar várias fun-

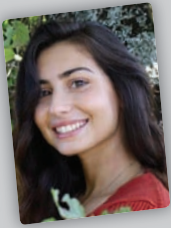
cionalidades, tais como o aumento de sensibilidade e/ou absorção e a modulação de energia.

As recentes descobertas e o elevado ritmo e esforço colocado neste tópico de investigação leva a crer que, num futuro mai próximo do que o esperado, vejamos a nanomedicina “entrar” no dia-a-dia dos protocolos de diagnóstico e terapêutica dos centros oncológicos.

#### Referências

- [1] International Agency for Research on Cancer, “Latest global cancer data: Cancer burden rises to 18.1 million new cases and 9.6 million cancer deaths in 2018” [Online, available on: <https://www.iarc.who.int/featured-news/latest-global-cancer-data-cancer-burden-rises-to-18-1-million-new-cases-and-9-6-million-cancer-deaths-in-2018/>].
- [2] A. Shapira et al. “Nanomedicine for targeted cancer therapy: Towards the overcoming of drug resistance,” *Drug Resistance Updates*, 14, 3, p. 150-163 (2011).
- [3] M. Bañobre-Lopez et al. “Magnetic nanoparticle-based hyperthermia for cancer treatment,” *Reports of Practical Oncology Radiotherapy*, 18, 6, p. 397-400 (2013).
- [4] Pucci, C. et al. “Innovative approaches for cancer treatment: current perspectives and new challenges” *Ecancermedalscience*, 13, 961 (2019).
- [5] Kemp, J.A et al. “Cancer nanotechnology: Current status and perspectives” *Nano Convergence* 8, 34 (2021).
- [6] Raj, S. et al. “Specific targeting cancer cells with nanoparticles and drug delivery in cancer therapy” *Seminars in cancer biology*, 69, 166-177 (2021).
- [7] Anselmo, A. C. et al. “Nanoparticles in the clinic: An update. *Bioengineering & translational medicine*”, 4, 3 (2019).
- [8] Anselmo, A. C et al. “Nanoparticles in the clinic: An update post COVID-19 vaccines. *Bioengineering & translational medicine*”, Advance online publication, 6, 3 (2021).
- [9] Chang, David, et al. “Biologically targeted magnetic hyperthermia: Potential and limitations.” *Frontiers in pharmacology* 9, 831 (2018).
- [10] Belyanina, Irina, et al. “Targeted magnetic nanotheranostics of cancer.” *Molecules* 22.6, 975 (2017).
- [11] Wong, De Wei, et al. “Magneto-actuated cell apoptosis by biaxial pulsed magnetic field.” *Scientific Reports* 7.1, 1-8 (2017).
- [12] Peixoto, L., et al. “Magnetic nanostructures for emerging biomedical applications.” *Applied Physics Reviews* 7.1, 011310 (2020).
- [13] Liu, Xiaoli, et al. “Comprehensive understanding of magnetic hyperthermia for improving antitumor therapeutic efficacy.” *Theranostics* 10.8, 3793 (2020).
- [14] Granja, A. et al. “Gold nanostructures as mediators of hyperthermia therapies in breast cancer”. *Biochem Pharmacol.* 190:114639 (2021).
- [15] Liang Cheng et al. “Functional Nanomaterials for Phototherapies of Cancer” *Chem. Rev.* 114, 21, 10869-10939 (2014).
- [16] Keywan Mortezaee, et al. “Synergic effects of nanoparticles-mediated hyperthermia in radiotherapy/chemotherapy of cancer” *Life Sciences*, 269, 119020 (2021).
- [17] S. Sim, et al. “Nanotechnology and its use in imaging and drug delivery (Review),” *Biomedical Reports*, 14, 42 (2021).
- [18] S. Siddique et al. “Application of Nanomaterials in Biomedical Imaging and Cancer Therapy,” *Nanomaterials*, 10, 1700, (2020).
- [19] X. Han et al. “Applications of Nanoparticles in biomedical imaging,” *Nanoscale*, 11, 799-819 (2019).
- [20] S. Caspani et al. “Magnetic Nanomaterials as Contrast Agents for MRI,” *Materials*, 13, 11, p. 2586 (2020).
- [21] A. Singh et al. “Nano-particle Sensor for Biomedical Applications: Bioimaging,” *AIP Conference Proceedings*, 2220, 1, p. 020186 (2020).
- [22] Palekar-Shanbhag, et al. “Theranostics for cancer therapy. *Current drug delivery*”, 10, 3, 357-362 (2013).





Sara Freitas, é licenciada em Física pela Universidade do Minho e mestre em Física Médica pela FCUP (Faculdade de Ciências da Universidade do Porto). Atualmente a Sara trabalha como investigadora, dando continuidade ao trabalho iniciado durante a sua tese de mestrado

na área da nanotecnologia. O seu trabalho envolve a síntese e caracterização de nanoestruturas magnéticas (ferro) e plasmónicas (ouro) por Ablação a Laser em Líquidos. Em paralelo, o seu trabalho também envolve uma avaliação da eficiência de aquecimento de *nanorods* de ouro quando estimulados com um laser contínuo, que opera na faixa do infravermelho próximo.



Célia Tavares de Sousa, é doutorada em Física, atualmente Investigadora Auxiliar no IFIMUP, uma unidade de investigação da FCUP. A Célia também é membro da direção da delegação norte da SPF e da direção do Núcleo Português de Magnetismo ([https://fisica-materia-](https://fisica-materia-condensada.spf.pt/npm)

[condensada.spf.pt/npm](https://fisica-materia-condensada.spf.pt/npm)). O seu trabalho atual está focado no desenvolvimento de nanomateriais para aplicações biomédicas. Tem vários trabalhos publicados na síntese e caracterização de nanoestruturas magnéticas para o diagnóstico e tratamento do cancro, bem como nanopartículas plasmónicas para a terapia fototérmica. Recentemente estabeleceu colaborações com vários hospitais (Fundação Champalimaud, Lisboa, e Hospital Gregório Maranhão, Madrid) para promover a investigação transacional.



Sofia Caspani, é licenciada em Engenharia Física pelo Politecnico di Milano (Itália) e mestre em Física Médica pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (2019). Durante a sua tese de mestrado, a Sofia desenvolveu nanomateriais magnéticos com aplicações bio-

médicas no IFIMUP e participou em diversos projectos científicos. Desde 2021, é aluna de doutoramento do programa doutoral MAP-Fis nos tópicos de Física Médica, Engenharia e Nanomateriais.



João H. Belo, é um físico dedicado ao estudo de materiais magnéticos e às suas transições de fase – particularmente motivado pelas questões científicas e oportunidades tecnológicas que emergem com o confinamento espacial. O João concluiu o seu doutoramento em Física

pela Universidade do Porto em 2017 e é actualmente Investigador Júnior no IFIMUP-Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Conta com 35 artigos científicos, 2 capítulos de livros, 1 patente submetida e com experiência como PI de projectos internacionais, como Professor Universitário, como orientador de vários alunos de mestrado/doutoramento e é membro da direção do Núcleo Português de Magnetismo (<https://fisica-materia-condensada.spf.pt/npm>).



Ricardo Magalhães, completou o seu mestrado em Física Médica em 2018 pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, depois de se ter licenciado em Genética e Biotecnologia na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. O seu trabalho como investigador co-

meçou com uma bolsa de Investigação Marie Curie na Universidade do País Basco e mais tarde como bolseiro do projecto GreenNanoSensing. Actualmente é aluno de doutoramento com uma bolsa de doutoramento FCT (referência SFRH/BD/148563/2019) a trabalhar no IFIMUP-FCUP. O seu trabalho foca-se nos tópicos de Física, Engenharia de Materiais e Nanomateriais.

# Lev Landau “A ousadia é a coisa mais importante da vida”

Rui Borges<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal

## Resumo

Em 2022, passam 60 anos sobre a atribuição do Prémio Nobel da Física a Lev Landau, um dos mais profícuos e brilhantes cientistas do século XX. Neste artigo, exploramos uma faceta menos conhecida da vida de Landau: o seu envolvimento político e as suas peripécias com o aparelho repressivo de Estaline.

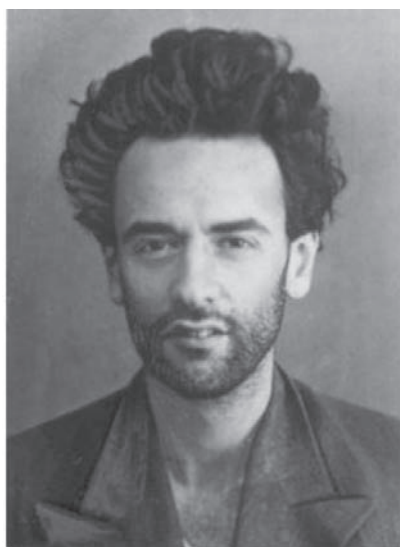


Figura 1 - Foto de Landau na prisão em 1938 [5]

## Introdução

Lev Davidovitch Landau recebeu o prémio Nobel da Física de 1962 pelas suas “teorias pioneiras da matéria condensada, em especial do hélio líquido”. Era o reconhecimento formal de uma vida científica recheada de sucessos e contributos significativos para a compreensão do mundo físico. Lev Landau tinha demonstrado precocemente ser dono de um intelecto brilhante e de uma intuição física extraordinária. Nascido em Baku, no Azerbaijão, desde cedo aprendeu matemática com o seu pai, que trabalhava como engenheiro na indústria petrolífera. Em 1922, matriculou-se na Universidade estatal de Baku (com catorze anos!) e, dois anos depois, mudou-se para a Universidade de Leninegrado, tendo terminado a licenciatura em física em 1927 com apenas 19 anos de idade. Nesse mesmo ano, publica na

revista *Zeitschrift für Physik* o artigo sobre “O problema do amortecimento na mecânica ondulatória” em que desenvolve o método da matriz densidade, de forma independente e simultânea com o trabalho de John von Neumann.

Ainda em 1927, inicia os seus estudos de pós-graduação no então Instituto Físico-Técnico de Leninegrado, a grande escola de física da União Soviética. No Instituto Físico-Técnico, Landau conviveu com Gueorgui Gamov (que adoptou o conhecido nome de George Gamow quando se radicou nos Estados Unidos), Nikolay Semyonov, Matvei Bronshtein ou Yakov Frenkel. O início dos seus estudos de pós-graduação deu-se numa época de grande desenvolvimento da ciência soviética, da qual Landau colheu grandes benefícios e para a qual contribuiu de forma prolífica.

Já com algumas publicações relevantes, Landau foi um dos participantes no VI Congresso da Associação de Físicos Russos que decorreu no verão de 1928. O Congresso reuniu durante quatro dias em Moscovo, após o que os participantes embarcaram no vapor Aleksei Rykov rumo a Estalinegrado, com paragens em várias cidades ao longo do rio Volga para fazer palestras e discussões públicas sobre física. Entre os vários participantes estrangeiros contavam-se Max Born, Peter Debye, Paul Dirac, Leon Brillouin ou Gilbert Lewis [1].

Em 1929, Landau partiu numa viagem científica pela Europa que ao longo de um ano e meio o levou à Dinamarca, onde trabalhou cerca de um ano com Niels Bohr, físico que passou a considerar o seu mentor científico, a Inglaterra, onde conheceu o seu compatriota Piotr Kapitsa, à Alemanha e à Suíça. Landau era um orgulhoso cidadão soviético e fazia gala de o mostrar por onde quer que passasse. É assim que o descreve George Gamow na sua autobiografia:

“[Landau] era um marxista fervoroso, mas de linha trotskista. Quando eu estava em Copenhaga ou Cambridge e ele estava de visita, usava sempre um blazer vermelho como símbolo das suas ideias marxistas, o que o fazia parecer, respectivamente, um carteiro dinamarquês ou uma caixa de correio britânica.” [2]

Landau não era membro do Partido Comunista, mas este tipo de posição política era já bastante problemático. Es-

Estaline tinha expulsado Trotsky da União Soviética em 1929 e embora a tolerância face a posições críticas dentro do Partido Comunista e na sociedade soviética em geral fosse cada vez mais diminuta, eram ainda anos de alguma indefinição. Tanto assim era que, pouco depois do seu regresso à União Soviética, foi convidado a dirigir o grupo de física teórica do Instituto Físico-Técnico da Ucrânia [3], um instituto recém-criado num esforço de descentralização da actividade científica para fora de Moscovo e Leninegrado. É em Kharkov (a actual Kharkiv, à época a capital da Ucrânia) que Landau começa a construir a sua escola de física e onde institui o famoso “mínimo teórico” que era exigido aos estudantes para serem aceites nos cursos de pós-graduação. Uma vez que não conseguia escrever uma tese de doutoramento (a sua aversão à escrita era já conhecida na época), a Comissão Superior de Certificação, concedeu-lhe o grau de Doutor em Ciências Físico-Matemáticas em 1934 sem necessidade de defender uma dissertação [4].

Com a inauguração do primeiro plano quinquenal em 1928, Estaline começara gradualmente uma campanha de promoção da autarcia soviética em todos os campos de actividade. O governo exercia uma pressão crescente sobre os físicos (e os cientistas em geral) para que se dedicassem ao estudo de problemas de ciência aplicada que contribuíssem para o desenvolvimento económico do país, e aqueles que persistissem na via da ciência fundamental eram frequentemente acusados de seguidismo face à “ciência burguesa” do ocidente. Os físicos viram a sua autonomia científica limitada com a dissolução da Associação de Físicos Russos e a sua substituição pela Associação de Física, constituída como um departamento do Commissariado do Povo para a Indústria Pesada.

Aos poucos as viagens de cientistas ao estrangeiro vão sendo suprimidas. George Gamow, que citámos atrás, consegue ainda, em 1933, autorização para ir a uma conferência Solvay, que servirá de ponto de partida para o seu exílio nos Estados Unidos da América. Piotr Kapitsa, que tinha estabelecido em Cambridge, um laboratório de renome mundial dedicado à física das baixas temperaturas, é impedido de deixar a União Soviética após as suas férias de verão em 1934. Landau, segundo relata Gamow no seu livro, nunca se mostrou interessado em sair da União Soviética.

O ano de 1934 marca também uma profunda agudização da luta política na União Soviética. A 1 de dezembro, Serguei Kirov é assassinado em Leninegrado, acontecimento que serve de pretexto para Estaline lançar uma campanha de terror que é fundamental para a consolidação do seu poder. Esta campanha culmina com os célebres Processos de Moscovo, em que alguns dos mais destacados dirigentes do Partido Comunista são (falsamente) acusados de colaboracionismo com a Alemanha nazi para derrubar o poder soviético e condenados à morte. Os três julgamentos decorrem em agosto de 1936, janeiro de 1937 e março de 1938.

A vaga de repressão varreu todos os sectores da sociedade e os cientistas não foram excepção, com prisões, mortes ou exílios forçados. No IFTU, onde Landau tra-

balhava, abriu-se uma discussão sobre o futuro do instituto, uma vez que a nova direcção pretendia que os trabalhos se concentrassem em aplicações para o desenvolvimento económico e militar, ao passo que Landau defendia que se devia manter a investigação em física fundamental, nem que para isso tivesse de se dividir o IFTU. Landau foi denunciado como membro de uma conspiração anti-soviética e procurou refúgio junto de Kapitsa, que o acolheu no seu Instituto de Problemas Físicos em Moscovo, em fevereiro de 1937 [6] [7]. Para Moscovo, já tinham seguido Yuri Rummer e Moisey Korets, dois colegas de Kharkov, também eles alvos da atenção do NKVD. Mas para um espírito iconoclasta como o de Landau, a ida para Moscovo não foi uma garantia de segurança. Em 28 de abril de 1938, Landau, Korets e Rummer são presos pelo NKVD, acusados de participar numa conspiração anti-soviética, tendo sido encontrado um panfleto que pretendiam distribuir ao público durante as celebrações do 1.º de Maio desse ano. Apresentamos aqui a tradução completa desse panfleto por ser de evidente interesse [8].

A ousadia do panfleto é surpreendente, tendo em conta a campanha de terror (“O país foi inundado por torrentes de sangue e imundice” é uma descrição bastante apropriada) que tinha culminado apenas dois meses antes no terceiro processo de Moscovo, em que Nikolai Bukharine, que Lenine considerara o “filho dileto do Partido”, foi condenado à morte. Tendo em conta as inúmeras execuções com base em acusações sem provas, não deixa de ser espantoso que Landau, que de facto tentou lançar um movimento contra Estaline, tenha conseguido escapar com vida (embora as tentativas de Landau e Korets nunca tenham ido além da redacção do panfleto que, de resto, nunca chegou a ser distribuído. E o Partido Operário Antifascista nunca existiu!). Porém, os implicados não tiveram todos a mesma sorte: Mosey Korets passou 20 anos no gulag ao passo que Yuri Rummer, que Landau e Korets inocentaram de qualquer participação na redacção do panfleto, foi condenado a 10 anos de trabalho numa colónia penal de investigação científica.

No próprio dia em que Landau foi preso, Kapitsa escreveu a Estaline, explicando que o desaparecimento do cientista seria “profundamente sentido no Instituto, na União Soviética e por todo o mundo”. Tentou também que Estaline tivesse em conta algumas atenuantes:

“...para apresentar a questão de forma crua, [Landau] é uma pessoa horrível. É um desordeiro que gosta de procurar os pontos fracos dos outros e que quando os encontra, especialmente entre as figuras mais proeminentes, como os Académicos, faz pouco deles da forma extremamente desrespeitosa. Esta atitude tem-lhe granjeado muitos inimigos” [9].

Provavelmente, Kapitsa não sabia ainda as verdadeiras razões da prisão e assumia, como era comum durante o período do terror, que Landau teria sido alvo de uma denúncia. Kapitsa, um homem de origem aristocrática e que não era membro do Partido Comunista, gozava de um enorme prestígio junto de Estaline, o que talvez tenha contribuído para que o caso não tenha sido resolvido com um julgamento rápido seguido de execução.



O panfleto de Korets e Landau

Trabalhadores de todos os países, uni-vos!  
Camaradas!

A grande causa da revolução de Outubro foi vilmente traída. O país foi inundado por torrentes de sangue e imundice. Milhões de inocentes foram atirados para a prisão e ninguém sabe quando chegará a sua vez. A economia está em colapso. A fome é iminente.

Vede camaradas, que a clique estalinista levou a cabo um golpe fascista. O socialismo existe apenas nas páginas de jornais mentirosos. No seu ódio furioso ao verdadeiro socialismo Estaline é igual a Hitler ou Mussolini. Destruído o socialismo em nome da preservação do seu domínio do país, Estaline transforma-o em presa fácil do brutal fascismo alemão. A única solução para a classe operária e para todos os trabalhadores do nosso país é a luta firme contra o fascismo de Estaline e de Hitler, a luta pelo socialismo.

Camaradas, organizai-vos! Não temais os verdugos do NKVD! Eles só conseguem torturar prisioneiros indefesos, prender pessoas insuspeitas e inocentes, pilhar os bens do povo e fabricar processos judiciais absurdos sobre conspirações inexistentes.

Camaradas, aderi ao Partido Operário Antifascista. Fazei a ligação com o seu Comité de Moscovo. Organizai grupos do POA nas empresas. Adoptai técnicas clandestinas. Pela agitação e propaganda, preparai um movimento de massas pelo socialismo.

O fascismo de Estaline só se mantém graças à nossa desorganização.

O proletariado do nosso país já derrubou o poder dos czares e dos capitalistas, será capaz de derrubar o ditador fascista e a sua clique.

Viva o Primeiro de Maio, dia de luta pelo socialismo!

Comité de Moscovo do Partido Operário Antifascista

O próprio Bohr, com quem Landau mantinha uma correspondência regular (e que tratava sempre respeitosamente por Sr. Bohr), terá escrito também a Estaline apelando à clemência do Secretário-Geral [10]. Kapitsa continuou a escrever a Estaline, a Béria e a Molotov para que a vida de Landau fosse poupada e a sua mente pudesse continuar ao serviço da física soviética [11]. Numa dessas cartas, explica a Molotov que tinha feito uma descoberta intrigante, a superfluidez do hélio, a que só um físico teórico do calibre de Landau poderia dar uma explicação. Passados poucos dias, em 28 de abril de 1939, exatamente um ano após a sua prisão Landau é libertado, tendo Kapitsa assumido perante as autoridades a responsabilidade pelo comportamento futuro do réu, comprometendo-se a reportar ao NKVD qualquer afirmação feita por Landau em detrimento do Governo Soviético [12].

Durante o encarceramento, Landau sofreu com os interrogatórios do NKVD e as condições gerais da prisão. Quando foi libertado estava tão magro e fraco que não conseguia andar, mas a sua sanidade mental manteve-se intacta porque se conseguia abstrair do ambiente terrível da prisão pensando em problemas de física. Ao regressar ao trabalho trazia quatro artigos prontos na sua cabeça! [13]. A confiança de Kapitsa não seria defraudada pois em poucos meses Landau apresentar-lhe-ia uma teoria fenomenológica que explica a superfluidez do hélio com base em fonões. Este trabalho conjunto valeria a Landau o Prémio Nobel da Física de 1962 e a Kapitsa o de 1978.

Para Gorelik, que descobriu e publicou o processo de Landau, o panfleto e a sua mensagem pró-socialista e anti-Estaline eram prova do apego de Landau ao espírito revolucionário de 1917 [5]. Mas o ano que passou na prisão marcou o início de um processo de rejeição total do regime soviético, que se somava ao seu já conhecido desprezo por Estaline. Era prática na vida quotidiana desses anos nunca mencionar o nome daqueles que estavam na prisão (os “inimigos do povo”). No entanto Landau fazia questão de todos os meses, sem qualquer dissimulação, enviar um vale postal a Korets [14] que, como vimos, passou vinte anos na prisão. Integrado relutantemente no programa nuclear soviético, abandonaria o trabalho em 1953 logo após a morte de Estaline: “Basta, já não tenho medo dele [de Estaline] e não trabalho mais neste projecto” [15]. Em 1957, o KGB registava que Landau teria dito, acerca da revolução na Hungria em 1956 e a posterior ocupação soviética, que os húngaros “são os verdadeiros descendentes dos grandes revolucionários de todos os tempos”. No mesmo relatório, Landau é citado sobre a sua visão da ciência:

“Sou um internacionalista, mas chamam-me cosmopolita. Não distingo entre ciência soviética e ciência estrangeira. É-me completamente indiferente quem fez esta ou aquela descoberta. Por isso, não posso alinhar nestes exageros acerca da supremacia da ciência soviética e russa.” [16]

Landau era já demasiado importante, e o regime já não estaria tão preocupado com a sua capacidade de organizar uma oposição, para que houvesse represálias por tais ousadias. Ainda assim, o medo da repressão rondava

sempre, como se o espectro do seu criador se recusasse a dar descanso às vítimas. Landau viveu o resto da sua vida em liberdade condicional, e o caso judicial só foi oficialmente encerrado em 1990, 22 anos após a sua morte e um ano depois do desaparecimento da própria União Soviética [17].

### Agradecimentos

Agradeço a Sílvia Franklim pelos comentários, sugestões e algumas das referências bibliográficas.



Rui Borges, é licenciado em Física pela Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e doutorado pelo Trinity College Dublin. É autor dos livros “Boris Hessen, o cientista subversivo” (Ela por Ela, 2015) e “Einstein e Lenine em Moscovo – polémicas filosóficas da ciência Soviética” (Parsifal, 2021). É professor adjunto convidado na Escola Superior de Tecnologia do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal.

### Referências

- [1] Paul R. Josephson, “Physics and Politics in Revolutionary Russia”, University of California Press, Berkeley e Los Angeles (1991), p.133-138.
- [2] George Gamow, “My World Line”, Viking Press, Nova Iorque (1970), p.119.
- [3] Josephson, op. cit., p. 224.
- [4] O facto é referido em “Páginas da Vida de Landau”, livro publicado em 1971 (tanto quanto sabemos, existe apenas a versão em russo) por Maya Bessarab, sobrinha da mulher de Landau. O título deste artigo é uma frase de Landau e título do segundo capítulo do livro. A versão online encontra-se em <http://www.ega-math.narod.ru/Landau/Dau1971.htm>.
- [5] Gennady Gorelik, “Lev Landau, Prosocialist Prisoner of the Soviet State”, Physics Today 48, p. 11 (1995); doi: 10.1063/1.2808009.
- [6] Istvan Hargittai, “Buried Glory – Portraits of Soviet Scientists”, Oxford University Press, Oxford (2013), p. 124 e seguintes.
- [7] Gennady Gorelik, “The Top-Secret Life of Lev Landau”, Scientific American 277, p. 72 (1997).
- [8] O documento original pode ser visto aqui: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/ru/1/1b/Listovka.jpg>
- [9] M. I. Khalatnikov (ed), “Landau: the physicist and the man, recollections of L. D. Landau”, Pergamon Press, Oxford (1989), p. 316.
- [10] Lee G. Pondrom, “The Soviet Atomic Project – How the Soviet Union Obtained the Atomic Bomb”, World Scientific, Singapura (2018), p. 103.
- [11] Hargittai, op. cit., p. 109 e seguintes.
- [12] Khalatnikov, op. cit., p. 318.
- [13] Hargittai, op. cit., p. 128.
- [14] Ella Ryndina e Arthur Gill, “Family Lines Sketched in the Portrait of Lev Landau”, Physics Today 57, p. 53 (2004); doi: 10.1063/1.1688070.
- [15] Hargittai, op. cit., p. 130.
- [16] O relatório completo do KGB sobre Landau pode ser lido (fotocópia do original e tradução para o inglês \ em <https://bukovsky-archive.com/1937-1969/1953-1965/>. A acusação de cosmopolitismo era, e é ainda hoje, um insulto antissemita, uma prática que Estaline recuperou uma vez que muitos dos seus adversários no Partido Comunista eram de origem judaica.
- [17] Hargittai, op. cit., p. 128.

# A experiência de Stern-Gerlach: peripécias, mérito e acaso

Carlos Herdeiro

Departamento de Matemática, Universidade de Aveiro

A experiência desenvolvida pelos físicos alemães Otto Stern (1888-1969, naturalizado norte-americano) e Walther Gerlach (1889-1979) é uma referência no desenvolvimento da Mecânica Quântica e da Física do Sec. XX. É tão importante para introduzir as ideias (e a necessidade) da Mecânica Quântica, que alguns livros de referência (ex. “Modern Quantum Mechanics”, do J. J. Sakurai ou “Quantum Mechanics” do Julian Schwinger) começam o livro com a discussão desta experiência. Muitos livros académicos descrevem a experiência como comprovando o spin do eletrão, o que é legítimo, mas apenas em retrospectiva. Stern e Gerlach não sabiam que tinham comprovado o spin, numa ilustração das peripécias, mérito e acaso que rodeiam um grande desenvolvimento científico.

Stern obteve o seu doutoramento na U. de Breslávia (na altura parte da Alemanha, atualmente na Polónia) em 1912, em Química-Física. Motivado “por um espírito de aventura” Stern foi seguidamente trabalhar com Albert Einstein, que nessa altura se encontrava em Praga, seguindo-o posteriormente para Zurique, ainda nesse ano. Einstein incutiu em Stern um interesse pela quantização da luz e a natureza dos átomos. Mas quando o modelo atómico de Bohr surgiu, em 1913, com a sua hipótese de quantização do momento angular, conduzindo à quantização das energias (e raios) das órbitas possíveis, Stern ficou “chocado” e terá feito uma promessa, juntamente com o seu colega Max von Laue, que “caso este disparate de Bohr fosse comprovado correto, desistiriam da física!” [F. Hund, *Geschichte der Quantentheorie*, 1975].

Depois da primeira guerra mundial, Stern trabalhou como assistente de Max Born em Frankfurt, focando-se em feixes moleculares. Foi neste tópico que se cruzou com Walther Gerlach. Doutorada pela Universidade de Tubingen, em 1912, Gerlach foi trabalhar para Frankfurt no Outono de 1920, num instituto adjacente ao de Born, desenvolvendo experiências com feixes moleculares a passar por campos magnéticos não uniformes. O seu objetivo era defletir um feixe de bismuto para estudar o seu diamagnetismo. Para isso,

experimentou diferentes geometrias do campo de modo a obter os maiores gradientes possíveis. Ao saber deste experiência Born terá demonstrado ceticismo relativamente ao seu sucesso, ao que Gerlach terá respondido “Nenhuma experiência é tão estúpida que não deva ser tentada” [I. Estermann, *Am. J. Phys.* 43 (1975) 661].

Nesta época, Stern convenceu-se que uma experiência com feixes moleculares poderia iluminar um importante debate científico da época. Um átomo colocado num campo magnético desdobrava as suas linhas espectrais e portanto níveis de energia - efeito Zeeman. Mas para átomos com número atómico ímpar (como o hidrogénio) surge um número par de níveis, designado por efeito Zeeman anómalo. Este resultado era desafiante para o modelo atómico quasi-planetário de Bohr (generalizado por Arnold Sommerfeld em 1916), mas poderia ser explicado assumindo que as órbitas eletrónicas tomam apenas certas (discretas) orientações espaciais relativamente ao campo magnético externo. Esta hipótese, introduzida por Peter Debye, foi designada por quantização espacial. Stern, cético relativamente ao modelo de Bohr e à quantização espacial, concluiu que, a ser verdade, deveria haver uma “birrefringencia magnética” de um feixe de átomos hidrogenóides - ou seja, os átomos seriam defletidos em duas direções diferentes num campo magnético não uniforme. Nas palavras de Stern: “A questão de saber se um gás pode ser magneticamente birrefringente (nas palavras que usávamos naqueles dias) foi colocada num seminário. Na manhã seguinte acordei cedo, demasiado cedo para ir ao laboratório. Como estava muito frio para sair da cama, fiquei ali a pensar na pergunta do seminário e tive a ideia da experiência. Quando cheguei ao laboratório, recrutei Gerlach como colaborador. Ele era um experimentalista hábil, ao contrário de mim. Na verdade, cada parte do aparato que construí teve que ser refeita por Gerlach” [D.



Herschbach, *Angew. Chemie Int. Ed. Engl.* 26 (1987) 1225].

A decisão de avançar com a experiência foi tomada numa reunião entre Stern, Gerlach e Born num café local. Um dos desafios, contudo, era o financiamento. A Alemanha pós-guerra estava numa crise financeira com uma inflação galopante. Born angariou dinheiro dando cursos sobre Relatividade e cobrando bilhete. Mas não chegava. Um amigo a quem relatou as dificuldades sugeriu que escrevesse a Henry Goldman (filho do fundador da Goldman-Sachs, banco de investimento tornado célebre pelo seu papel na crise financeira de 2008). Apesar de cético, Born tentou e recebeu uma carta “charmosa e uma cheque de algumas centenas de dolares”. O cheque salvou a experiência [M. Born, *My Life: Recollections of a Nobel Laureate*, Scribner, New York, 1978, p. 78].

Mas faltava garantir que a experiência separaria claramente os dois feixes. Como Stern tinha entretanto assumido uma posição na U. de Rostock, encontrou-se com Gerlach em Göttingen, no início de 1922, para discutir os detalhes. O desafio técnico pareceu inultrapassável pelo que decidiram desistir. Mas uma greve de comboios adiou a partida de Gerlach para Frankfurt, dando-lhes um dia extra para rever a situação, acabando por reverter a decisão! Gerlach executou então (sozinho) a experiência bem sucedida em fevereiro de 1922. Enviou de seguida uma mensagem a Stern: “Afinal, Bohr tem razão”. Em simultâneo, Gerlach enviou um postal a Bohr com uma fotografia mostrando a clara separação dos feixes, e congratulando-o [Figura ao lado].

O desenvolvimento da Mecânica Quântica tornaria o modelo de Bohr ultrapassado, mas, de certa forma, confirmaria a ideia de quantização espacial. O acordo da experiência de Stern-Gerlach com o modelo de Bohr (mais quantização espacial), contudo, foi uma afortunada coincidência. O spin eletrónico seria apenas postulado em 1925 por George Uhlenbeck e Samuel Goudsmit e uma reinterpretação do resultado da experiência de Stern-Gerlach, como devido ao spin foi apenas feita em 1927 por Ronald Fraser [R. G. J. Fraser, *Proc. R. Soc. A* 114 (1927) 212].

Não poderia terminar esta breve retrospectiva sem a peripécia do charuto, que terá decorrido nas experiências preparatórias antes do sucesso de fevereiro de 1922. Nas palavras de Stern: “Nunca conseguimos fazer o aparelho funcionar antes da meia-noite. Quando finalmente tudo parecia funcionar corretamente, tivemos uma experiência estranha. Após a ventilação para libertar o vácuo, Gerlach removeu o rebordo do detector. Mas ele não conseguia ver qualquer sinal do feixe de átomos de prata e entregou-me o rebordo. Com Gerlach olhando por cima do meu ombro enquanto eu olhava atentamente para o placa, ficamos surpresos ao ver surgir gradualmente dois traços distintos do feixe. Várias vezes repetimos a experiência com o mesmo resultado misterioso. Finalmente per-

cebemos o que era. Eu era então o equivalente a um professor auxiliar. O meu salário era muito baixo para comprar bons charutos, pelo que fumava charutos baratos. Estes tinham muito enxofre, pelo que o meu hálito no prato transformou a prata em sulfeto de prata, que é preto azeviche, facilmente visível. Foi como desenvolver uma chapa fotográfica.” [D. Herschbach, *ibidem*].

Fieis ao lema da Royal Society “Nullius in verba”, B. Friedrich and D. Herschbach, verificaram a verosimilidade do episódio do charuto no seu excelente artigo “Stern and Gerlach: How a bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics” [*Physics Today*, December 2003, p. 53-59].

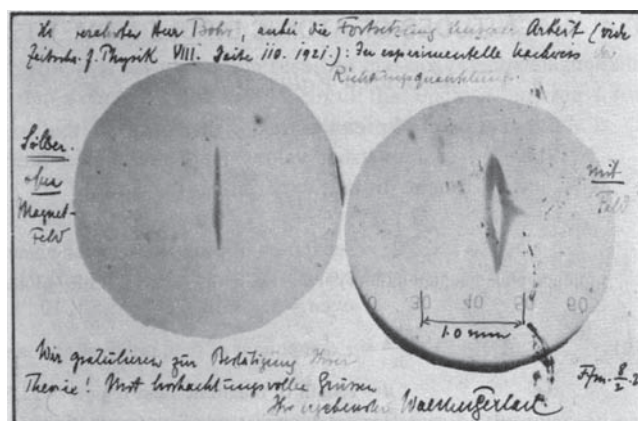
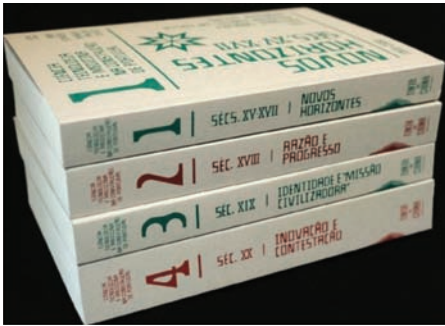


Figura 1 - Postal de Gerlach a Bohr, depois da experiência bem sucedida em Fev. 1922.

## Livros



José Braga

«Ciência, Tecnologia e Medicina na Construção de Portugal»,

Tinta da China, 2021, 4 volumes, coordenação geral de Ana Simões e Maria Paula Diogo.

ISBN 978-989-671-596-0

A obra «Ciência, Tecnologia e Medicina na Construção de Portugal» abarca quatro volumes, tendo sido abordados os dois primeiros no artigo anterior. «Identidade e Missão Civilizadora» é o tema do volume 3. Abarca temas pertinentes para a compreensão da construção do Portugal Liberal, as contribuições da Ciência, tecnologia e Medicina nas conceções políticas, económicas e sociais deste período tão estudado.

As elites liberais tiveram o desejo de modernizar o país através da reorganização do Estado e da sociedade. O fontismo foi importante na administração do programa de apropriação do território, através de levantamentos cartográficos e construção de infraestruturas. Ocorreu igualmente uma regeneração do corpo e mente dos portugueses, sendo a formação da população decisiva tal como a adoção de novas ideias. Nesse processo foram fundamentais a criação de escolas superiores no Porto e Lisboa, transformando-se esta gradualmente em capital intelectual e científica. Este volume destaca a formação dos engenheiros, o papel dos médicos, o surgimento de periódicos especializados e das associações profissionais. A Ciência contribuiu para novos caminhos na diplomacia e representação do país no exterior (participação em congressos internacionais) e a construção de vias de comunicação contribuíram para abertura da nação e circulação interna.

Teresa Salomé Mota, Vanda Leitão e Ana Carneiro são autoras do capítulo «Os Serviços Geológicos e a administração do território», onde estas premissas são aplicadas. Os serviços geológicos são uma expressão do imperativo territorial que permitiu ao

Estados-nação modernizar a administração pela incorporação de conhecimentos e práticas tecnocientíficas. A produção de cartografia é um instrumento e símbolo do controlo do território. Os serviços geológicos são criados como Comissão Geológica em 1857 no âmbito do Ministério das Obras Públicas, Comércio e Indústria num contexto de tentativa de aproveitamento dos recursos naturais e construção de infraestruturas. São responsáveis pela institucionalização da geologia e a sua emergência enquanto disciplina científica. Neste âmbito são fundamentais os engenheiros militares, habituados ao trabalho de campo e com prática de realização de cartografia. A sua prática é a seguida pela comunidade geológica internacional.

O último volume, «Inovação e contestação», abarca o período de tempo desde finais do século XIX até inícios do XXI, os vários papéis da Ciência assumidos entre o fim da monarquia e o século XXI.

Aborda a dinâmica que conduziu à implantação da República e da ideia de «Homem novo» (cidadão participativo inserido no espírito positivista e racionalista). É neste contexto que surgem as novas universidades do Porto e Lisboa, promovendo a investigação e não a mera transmissão de conhecimento. A popularização da Ciência é um dos esteios deste cidadão republicano. O lugar das poses coloniais e a necessidade de promover a presença nas colónias africanas tal como a medicina e controlo de doenças tropicais foram importantes para a apropriação e gestão dos recursos do território.

No Estado Novo a Ciência foi também mobilizada debatendo-se a relação complexa entre Universidade e autoritarismo, que apostou especialmente em áreas com aplicação prática imediata, teve um lugar especial para os engenheiros, cujos conhecimentos puderam ser internacionalizados através da participação do Plano Marshall em Portugal.

A última fase da Ditadura, na década de 1970, correspondeu a um programa de reformas do sistema de ensino superior e de investigação. Este sistema democratiza-se com a integração de Portugal na Comunidade Europeia, integrando a classe profissional dos investigadores nas redes internacionais, força motriz da modernização do país, tal como definido na política científica.

Augusto Fitas e Maria de Fátima Nunes estudam esta ideia em «Da Junta de Educação Nacional (JEN) ao IAC e à JNICT: Organização da Ciência e Política Científica». A reforma republicana do ensino superior introduziu nos objetivos da universidade o proceder à descoberta científica e promover o estudo dos problemas nacionais, o que valeu de pouco dado o carácter conservador do meio. Seguindo o exemplo espanhol, depois da I Grande Guerra procurou-se criar uma instituição que promovesse a renovação do ensino superior. Coube aos médicos um papel importante na fundação de tal instituição. A JEN assentava em três características, o financiamento público, a matriz republicana e a liberdade de ação.

Esta instituição optou por concentrar os seus esforços na atualização científica no estrangeiro. Medicina, humanidades e ciências foram as áreas mais apoiadas, permitindo ao investigador a profissionalização. A JEN também apoiou centros de estudo dedicados à investigação, incentivando o professor em tempo integral e dedicação exclusiva.

As renovações de bolsas assentavam na avaliação da produção científica e na prioridade aos bolseiros regressados do exterior que pretendiam continuar a investigar. Com a sua reestruturação, o Instituto para a Alta Cultura (IAC) surge com menos autonomia que a JEN.

O seu principal desiderato era criar novos centros de investigação dando oportunidades no país a investigadores formados no estrangeiro e fundação de revistas científicas internacionais, no período da II Grande Guerra. No pós-Guerra, as bolsas correspondiam mais a missões de estudo do que a estágios. Mais de metade do orçamento era gasto em estudos ligados à energia nuclear. Em 1967 foi criada a Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica, visando a introdução de mecanismos de inovação sob efeito da internacionalização científica.

Circulação, apropriação e inovação são os conceitos que enformam esta obra que apresenta uma visão poliédrica, assente na colaboração de especialistas com experiências e idades diferentes. Sintetiza o pa-

pel da Ciência nos desígnios do Estado português desde o século XV, colocando-a no contexto social, económico e político e dialogando com a História de Portugal.

Destinado a um público que se interessa pela Ciência e não apenas a historiadores (os capítulos são em média de 20 páginas, fáceis de ler e com amplo apoio de iconografia), num esforço de divulgação, estes quatro volumes suprem uma lacuna historiográfica, afirmando a maturidade da História das Ciências em Portugal. Irão tornar-se uma obra de referência.



# O que é o vento?

Helena Arede<sup>1</sup>, Marta Henriques<sup>1,2</sup>, Joana Pancas<sup>1</sup>, Constança Providência<sup>2</sup>, Rita Wolters<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Rómulo - CCVUC, Universidade de Coimbra

<sup>2</sup> CFisUC, Departamento de Física, Universidade de Coimbra

<sup>3</sup> Ilustradora

## Material

- Balão
- Seringa grande
- Tesoura
- Vela

Estamos no outono, uma estação geralmente identificada com chuva e vento. Já pensaste o que é o vento que por vezes quase te impede de andar? É também o vento que define o tempo, trazendo ou afastando as nuvens, trazendo ou afastando a chuva. O vento não é mais do que ar em movimento e são muitas as causas que provocam o seu movimento. Uma das principais causas são as mudanças de temperatura. Um dos gases que constituem o ar é o oxigénio e a vida no planeta Terra não existiria sem este gás. É a força da gravidade que “segura” o ar acima da superfície da Terra, constituindo o que conhecemos por atmosfera. Outros gases presentes no ar são o azoto, o dióxido de carbono e o vapor de água. Os gases são formados por partículas muito pequenas a que chamamos átomos ou moléculas (conjuntos de átomos). Gases diferentes são formados por partículas diferentes. Na figura 1 vêes uma representação das partículas que constituem o oxigénio, azoto, vapor de água e dióxido de carbono. Desafio-te a fazeres modelos destas partículas com plasticina.

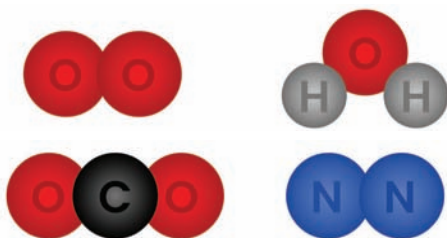


Figura 1 - Representação de algumas moléculas que formam o ar (da esquerda para a direita): oxigénio, água, dióxido de carbono e azoto.

## O ar em ação

Não conseguimos ver o ar mas podemos facilmente confirmar a sua presença principalmente quando se move, tal como no caso do vento. Propomos-te algumas experiên-



cias muito simples que te vão mostrar como a presença do ar pode ser confirmada.

Sabemos que o ar pode arrancar árvores como no caso dos furacões. Mas porque se move? Pega numa seringa de plástico, puxa o êmbolo para fora. Coloca o dedo em frente do buraco da seringa enquanto empurras o êmbolo. O que sentes? Se quiseres faz o mesmo virando o buraco da seringa para a chama de uma vela. O que acontece?

Ao empurrares o êmbolo fazes força sobre o ar que está dentro da seringa, este move-se para fora e perturba a chama da vela. Se tapares o buraco da seringa enquanto empurras o êmbolo podes sentir a força que o ar exerce sobre o teu dedo. Podemos dizer que o ar se move ou exerce uma força sobre um objeto se alguma força atuar sobre ele. No caso da seringa, és tu quando empurras o êmbolo.

O ar tem propriedades muito interessantes que foram estudadas por inúmeros cientistas ao longo do tempo. Vamos descobrir algumas destas propriedades.



Será que consegues encher um balão sem lhe juntar ar ou esvaziar o balão sem lhe tirar ar?

Precisas de um pequeno balão e uma seringa.

Estica bem o balão para ser mais fácil deformá-lo. Dá um nó na ponta do balão e introduz-lo dentro da seringa como mostra a figura 2b. Encaixa o êmbolo e empurra-o de modo que o balão fique completamente esborrachado no interior da seringa (fig. 2c). Não tapes o buraco da seringa durante todo este processo. Agora tapa o buraco da seringa de modo a não deixares entrar nenhum ar de fora e puxa com força o êmbolo para fora com a outra mão. Se tiveres dificuldade, pede ajuda a um colega. O que observas?

Sim, o pequeno balão encheu-se um pouco apesar de ter um nó! E se destapares o buraco da seringa o que acontece? O balão voltou ao estado inicial parecendo completamente vazio.

O que aconteceu? Na verdade o balão não estava completamente vazio. Quando puxaste o êmbolo sem deixar entrar ar na seringa, o ar que estava dentro do balão conseguiu empurrar a borracha do balão porque dentro da seringa não havia ar para empurrar o balão. Logo que deixaste entrar o ar tirando o dedo, o ar da seringa venceu o pouco ar que está dentro do balão e este voltou à sua forma inicial.

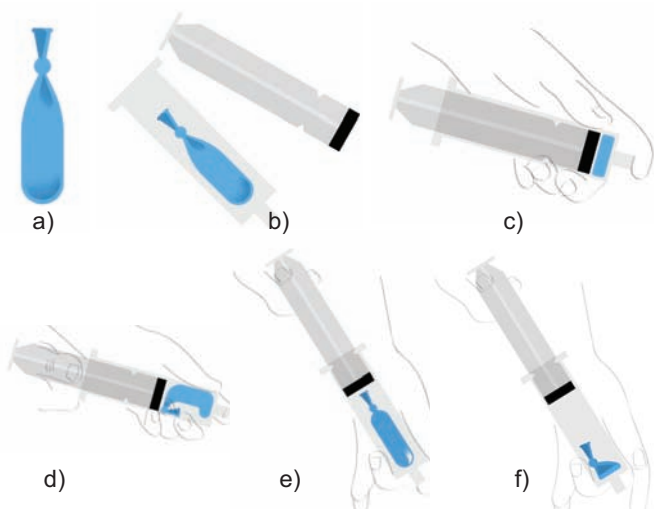


Figura 2 - a) balão vazio com nó, b) balão vazio dentro da seringa; c) comprimir balão com o êmbolo e tapar o buraco com o dedo; d) e e) a puxar o êmbolo com o buraco tapado o balão enche; f) buraco da seringa destapado.

### Podes ainda fazer outra experiência.

Desfaz o nó do balão, enche-o um pouco, empurra o ar para a ponta do balão e dá novamente um nó, de modo a ficares com um balãozinho (fig. 3a) que caiba dentro da seringa. Corta o excesso de borracha (fig. 3b). Coloca o balão dentro da seringa e puxa o êmbolo para trás mantendo o buraco da seringa aberto. Puxa bem o êmbolo para ficar uma boa parte da seringa sem estar ocupada com o balão (fig. 3c). Tapa agora a ponta da seringa com o dedo e empurra o êmbolo. É fácil? Se não conseguires pede ajuda. O que aconteceu ao balão? Agora larga o êmbolo e observa. O que acontece?

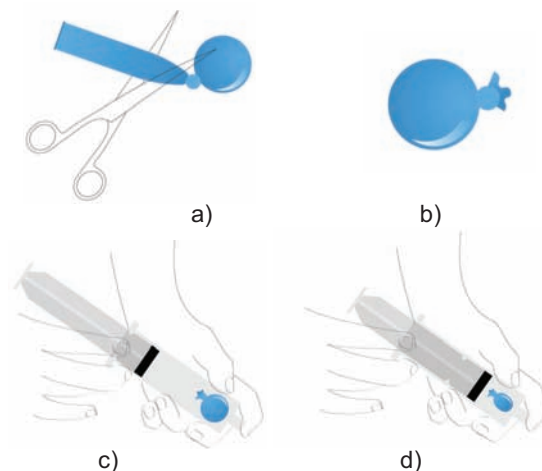
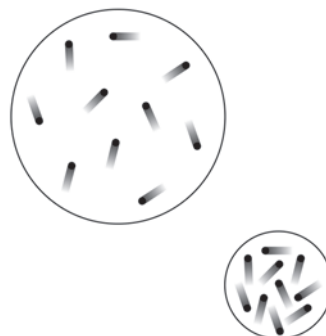


Figura 3 - a) balão com um pouco de ar; b) balão com pescoço cortado; c) balão dentro da seringa com êmbolo puxado para fora e buraco tapado; d) êmbolo comprimido sempre com o buraco tapado.

Quando empurras o êmbolo, estás a empurrar o ar, obrigando-o a ocupar menos espaço. As partículas que o formam têm de ficar mais juntinhas, e por isso também chocam mais vezes entre elas e com a parede da seringa e com a borracha do balão. Dizemos que o ar da seringa foi comprimido. Nestas condições, o ar contido na seringa exerce uma força maior sobre o balão, empurra a borracha do balão e obriga o ar que está dentro do balão a ocupar menos espaço: o tamanho do balão diminuiu. Para perceberes o que se passa desenha dois círculos um com raio de 4 cm e outro com raio de 2 cm. Em cada um desenha 10 partículas distribuídas ao acaso. Se todas estas partículas estiverem em movimento, e forem igualmente rápidas, em qual dos casos as partículas chocam mais vezes entre elas e com a periferia dos círculos? Dizemos que exercem uma pressão maior.



É isso, é no círculo menor. Quanto menor o espaço que são obrigadas a ocupar maior a força que fazem.

Foi o que aconteceu quando colocaste o pequeno balão cheio dentro da seringa e empurraste o êmbolo: o balão ficou mais pequeno porque as partículas que estavam dentro do êmbolo ficaram com menos espaço para se moverem, passaram a bater mais vezes no balão e, por isso, a exercer uma força maior.

Pelo contrário, quando largas o êmbolo, a força exercida pelo ar contido dentro do balão tem um efeito mais forte do que o das partículas de ar no exterior, porque estas ficam livres para se moverem numa região muito maior. Passam a exercer uma força menor sobre as paredes do balão e permitem-lhe voltar ao seu tamanho inicial.

Concluimos que as variações de pressão são alguns dos fatores que influenciam os ventos: estes sopram das regiões onde o ar exerce maior força, mais alta pressão, para as zonas onde o ar exerce menor força, mais baixa pressão.

**Agradecimentos:**

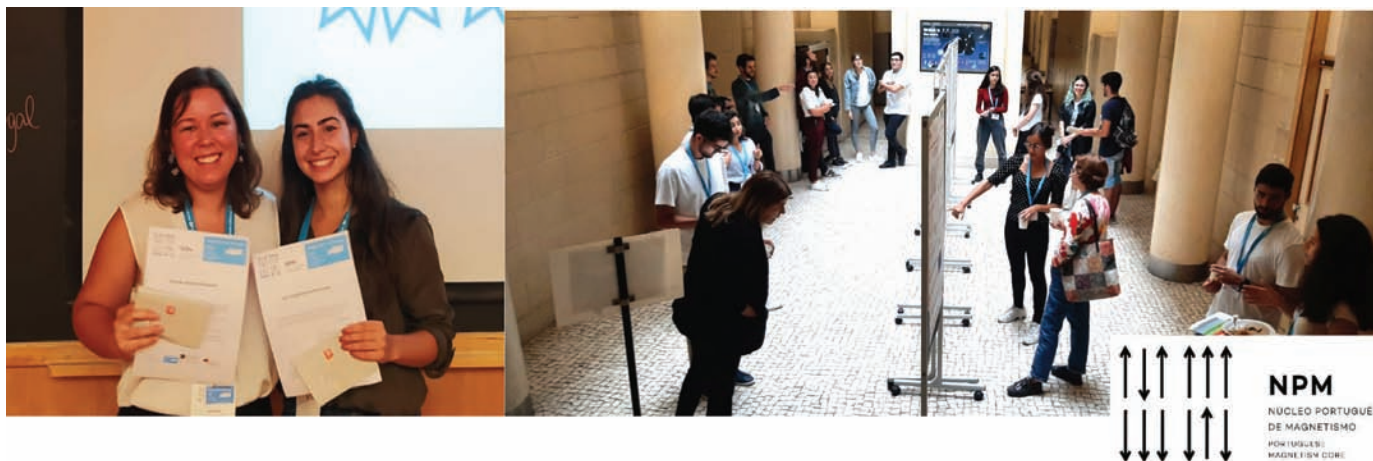
Agradecemos à Lucília Brito a leitura crítica desta proposta e todas as sugestões.



# notícias

Decorreu na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (FCUP) nos dias 12 e 13 de setembro de 2022 o terceiro evento organizado pelo Núcleo Português de Magnetismo. A Conferência Magnetism in Portugal 2022 foi, desta vez, dedicada a jovens investigadores da área do magnetismo e teve o apoio da Sociedade Portuguesa de Física.

oral com “Geomagnetically Induced Currents in Portugal Mainland”; Sara Freitas da Universidade do Porto recebeu o prémio de melhor apresentação em painel com “Magnetoplasmonic nanostructures produced by Laser Ablation in Liquids”; e a equipa NaN- $\mu$ Plastics™ foi distinguida no projecto colaborativo. Parabéns a todos!



O encontro reuniu estudantes de licenciatura, mestrado, doutoramento e jovens investigadores em pós-doutoramento de diferentes temas do Magnetismo. Os mais de cinquenta participantes tiveram oportunidade de discutir os seus trabalhos em apresentações orais e posters, cobrindo áreas como: Geomagnetismo, Energia, Materiais Multifuncionais, Magnetismo Molecular, Bio-Magnetismo, Novos Materiais 2D e Dispositivos.

A organização apostou num formato diferente para fomentar a interação entre os participantes. Formando equipas multidisciplinares, com membros de várias instituições nacionais, ficou claramente demonstrado o potencial da futura geração de investigadores em magnetismo para encontrar soluções inovadoras para grandes desafios atuais. Esta iniciativa visou proporcionar oportunidades de estabelecer ou alargar redes de contactos e fomentar futuras colaborações científicas.

Os prémios da Sociedade Portuguesa de Física para as melhores apresentações foram atribuídos durante a sessão de encerramento. Rute Santos da Universidade de Coimbra recebeu o prémio de melhor apresentação

Já a pensar no próximo evento NPM para o ano, sugestões e ideias são muito bem vindas! Quer ter um papel mais ativo no NPM? Contacte-nos: [npm@spf.pt](mailto:npm@spf.pt)  
Juntos vamos mais longe!

# Prémios de Incentivo da Excelência no Ensino da Física no 3º ciclo e Ensino Secundário

Com o apoio da Fundação “la Caixa” e do Banco BPI (BPI)

No passado dia 10 de setembro, na sessão de encerramento da 23.ª Conferência Nacional de Física/32.º Encontro Ibérico para o Ensino da Física, foram entregues os Prémios SPF/BPI de Incentivo da Excelência no Ensino da Física no 3.º ciclo e secundário, patrocinados pelo BPI/Fundação la Caixa.

Os premiados foram os seguintes:

## Prémio André Freitas

Atribuído ex-aequo a **Albino Rafael Mesquita Pinto** (Agrupamento de Escolas da Lixa, Felgueiras) e **Álvaro Folhas** (Agrupamento de Escolas de Águeda Sul), a título de boas práticas pedagógicas.



Figura 1 - Albino Rafael Mesquita Pinto e Álvaro Folhas (ao centro) na companhia de José António Paixão (direita), Presidente da SPF e André Pereira, Charmain da FISICA 2022 (esquerda).

## Prémio Rómulo de Carvalho

Atribuído a **José Jorge da Silva Teixeira** (Agrupamento de Escolas Dr. Júlio Martins, Chaves), a título de prémio de carreira.



Figura 2 - José Jorge da Silva Teixeira (ao centro), na companhia de José António Paixão (direita), Presidente da SPF e André Pereira, Charmain da FISICA 2022 (esquerda).

## Prémio Lúcia Salgueiro

Atribuído a Attila Gören (Agrupamento de Escolas de Real, Braga) e Ana Cristina Silva (Agrupamento de Escolas de Real, Braga), prémio pelo melhor artigo publicado na Gazeta de Física (Aprender + FQ (Físico-Química) com motivação – Quizzes I Um estudo com alunos do 9.º ano, Gazeta de Física, Vol. 44 (4), 2021, pf 8), no biénio 2020-2021.



Figura 3 - Attila Gören (centro) e Ana Cristina Silva (direita) na companhia de Bernardo Almeida (esquerda), diretor da revista Gazeta de Física.

Aos premiados a SPF endereça as felicitações e agradece as valiosas contribuições para a melhoria do ensino da Física.

A 2ª edição dos Prémios de Incentivo à Excelência na formação em Física no 3º ciclo e Ensino Secundário, com o apoio do BPI e da Fundação “la Caixa”, terá início já em janeiro de 2023. A atribuição dos prémios da 2ª edição será em 2024 e coincidirá com os 50 anos da SPF, estando prevista uma celebração a nível nacional deste evento.





A 4.ª Conferência de Física dos Países de Língua Portuguesa (4 CF-PLP) decorreu de 14 a 16 de setembro na Universidade de Cabo Verde, Cidade da Praia em regime híbrido, e está incluída nos eventos do International Year of the Basic Sciences for Sustainable Development promovido pela UNESCO para o ano 2022/23. Informações sobre a sua organização, apoios institucionais e programa podem ser consultados na página [4cfplp.sci-meet.net](http://4cfplp.sci-meet.net), criada para este evento.

A 4.ª CF-PLP, que teve como lema “A Física para um Desenvolvimento Sustentável”, foi precedida pelas conferências de Maputo (2010), Rio de Janeiro (2012) e São Tomé (2019).

Na Sessão de Abertura, presidida pela Prof<sup>ª</sup>. Sónia Semedo em nome da Comissão Organizadora, tomaram a palavra o representante da IUPAP, Prof. Horácio Fernandes, a representante da EPS, Prof<sup>ª</sup>. Teresa Peña e a Pró-Reitora da Universidade de Cabo Verde, Prof<sup>ª</sup>. Dominika Swolkien, e em nome do presidente da Comissão Científica Prof. Ricardo Galvão, o Prof. Marcos Pimenta.

A conferência teve nove palestras convidadas sobre: Divulgação e Ensino da Física, Fontes de Energia Sustentáveis, Ambiente e Alterações Climáticas, Poluição Oceânica e Prevenção de Desastres, Contribuições da Física para a Engenharia, Tecnologia Espacial – nanosatélites, Nanotecnologias, Sistemas Complexos, Inteligência Artificial. As sessões paralelas foram focadas na Física dos Materiais, Geofísica, Física Aplicada ao meio ambiente, Física Aplicada, Astrofísica e Divulgação e ensino da física. Temas inclusivos às atividades de física desenvolvidas nos países participantes da CPLP.



Figura 1 - Foto de grupo após a Sessão de Boas Vindas

Na 1ª fila da esquerda para a direita: Eduardo Alves (PT), Silvestre Baptista (CV), Arlindo Veiga (CV), Nilson Garcia (BR), Jéssica Fernandes (CV), Graça Silveira (PT), Sónia Semedo (CV), Dominika Swolkien (CV), Conceição Abreu (PT), Graça Breganha (AN), Rogério Rosenfeld (BR), Felicidade Pemba (AN), Miguel Lopes (CV), Sónia Silva (CV), José Luis Alexandre (AN), Armindo Mussungu (AN), na 2ª fila: Bruno Semedo (CV), Jorge Correia (CV), Sekazi Mtwinga (USA), Adelino Handa (AN), Helberto Moreno (CV), Rui Muchaibande (MZ), Felisberto Furtado (CV), José Paixão (PT), Maria Aznar (CV), Pedro Abreu (PT), Jorge Mayer (N), Vinogradov Anatoly (AN), Marcos Pimenta (BR), Luís Afonso (PT), Ângela Silva (CV), Paulo Mourão (PT), Osório Cavacundo (AN), Mariana Faria (CV), Neila da Fonseca (CV), Adyler Frota (STP), 3ª fila: Manuel Fiolhais (PT), Carlos Cruz (PT), Mário Moreira (PT), Anatoly (filho) (AN), Horácio Fernandes (PT), Arlindo Barros (CV), José Carlos Moniz (CV), José Carlos Veiga (PT), Phinifolo Cambalane (MZ).



Esta edição da conferência contou com cerca de 80 inscritos, dos quais 23 estudantes de pós-graduação e 25 professores do ensino médio com uma participação de cerca de 30 % de mulheres. Os dias 12 e 13 de setembro foram dedicados aos professores do ensino médio.

A conferência teve como Promotores a Universidade de Cabo Verde e a União dos Físicos dos Países de Língua Portuguesa, o Apoio Institucional da CPLP e patrocínios da FCT, SPF, SBF; EPS, IUPAP, REN, Banco InterAtlântico, ISEL, UAveiro e Instituto do Património Cultural.



contactarem com novas tecnologias de transmissão de conhecimento.

Na tarde do último dia da Conferência teve lugar uma Assembleia Geral da UFPLP para apresentação e votação do Regulamento Eleitoral e apresentação da única candidatura submetida pela Sociedade Portuguesa de Física (SPF) para a organização da 5.<sup>a</sup> CF-PLP, na Universidade de Coimbra, Portugal. A candidatura foi apresentada pelo presidente da SPF, Prof. José Paixão, tendo sido proposta para data contígua, mas anterior à



Figura 2 -Participação de professores dos Ensinos Básico e Secundário uma Sessão de Formação

Os apoios financeiros reverteram quase integralmente para apoiar a participação presencial de estudantes de pós-graduação dos PALOP e garantir a participação dos professores do ensino básico e secundário das escolas de Santiago, Cabo Verde. Aquando da decisão da realização desta edição da conferência em Cabo Verde existiam ligações aérea Luanda - São Tomé - Praia e Brasil - Cabo Verde, canceladas no início da pandemia da COVID-19 e ainda não retomadas. Esta facto obrigou a que todos os participantes tivessem de viajar através de Lisboa, limitando drasticamente a participação dos colegas moçambicanos, angolanos, são tomenses e brasileiros, devido ao preço exorbitante das viagens.

O projeto MEDEA13 da SPF, financiado pela REN permitiu a participação na conferência de um professor em mobilidade na Sociedade e apoio extra da REN a participação de dois premiados do Ciencia LP de 2021.

Nos dois dias que antecederam a conferência foram realizadas 4 Ações de Formação contemplando 25 professores do ensino secundário: “Show da Física/Óptica” coordenado pelo Prof. Pedro Pombo diretor da Fábrica Ciência Viva; “Introdução ao Python com aplicações da Física e Elab - laboratórios remotos de Física” organizada pelo Prof. Horácio Fernandes do Instituto Superior Técnico; “Aplicações da energia nuclear na saúde, indústria, meio ambiente, agricultura, bens culturais”, pela Prof. Regina Pinto de Carvalho da Universidade Federal de Minas Gerais ; e “Masterclasses em Física de Partículas” pelo Prof. Pedro Abreu do IPPOG-CERN. As Ações de Formação, propostas pela Universidade de Cabo Verde, permitiram a realização de dois dias trabalho intenso de atualização dos conhecimentos dos professores participantes, que tiveram a oportunidade de abordarem diversos domínios da física contemporânea e

realização da FISICA2024, provavelmente na 2.<sup>a</sup> semana de setembro de 2024. Deste modo, este evento associa-se às celebrações do 50.<sup>o</sup> aniversário da fundação da SPF. A candidatura foi aceite com muita satisfação.

Pel' Organização

Sónia Semedo, vice-presidente da UFPLP

Graça Silveira, tesoureira da UFPLP

## Young Minds' Movie Night

Na passada noite de 8 de outubro de 2022, teve lugar mais uma edição da *Young Minds' Movie Night*, no claustro do Museu de História Natural e da Ciência de Lisboa (MUHNAC). É a terceira vez que os Young Minds Lisbon organizam esta atividade e, após exibições bem sucedidas do filme *Retorno ao Futuro* e do documentário *The Pleasure of Finding Things Out*, desta vez os Young Minds escolheram o filme *Radioactive*, uma obra que retrata a vida pessoal e profissional de Marie Curie, vencedora de dois prémios Nobel. A motivação para a escolha deste filme em específico centrou-se na nossa vontade de enaltecer uma das investigadoras mais influentes do século XX. Marie, apesar de viver numa época em que não era comum nem aceite por toda a comunidade as mulheres terem um papel de destaque e autoridade, nunca se desviou dos seus objetivos e das suas crenças. Acreditamos que a história dela ainda pode servir atualmente como uma grande fonte de inspiração para as futuras gerações de investigadoras. Para além disto, a radioatividade e as aplicações nucleares continuam a ser tópicos controversos, tanto na ciência como na sociedade, no que toca aos riscos e aos benefícios que possuem. Assim, um dos nossos objetivos foi tentar trazer este debate ao claustro do MUHNAC, através de uma breve palestra, após a exibição do filme, dada pela nossa convidada, a Dra. Ana Rita Melo, doutorada em história das ciências e educação científica pela Universidade de Coimbra. No final, houve tempo para o público interagir com a oradora através de comentários e/ou questões.



Com pipocas e chá quente oferecido pelos Young Minds, a exibição do filme arrancou pelas 20h30 e captou a atenção do público constituído por quase 80 pessoas, com representação em todas as faixas etárias. A seguir ao filme, a palavra passou para a Dra. Ana Rita Melo, que com a sua palestra conseguiu igualmente cativar o público. Focou-se principalmente na perceção do risco, e definiu, de uma forma educativa, diversos conceitos relacionados com a radioatividade. O debate que se seguiu teve diversas intervenções do público e o tema foi explorado a partir de diferentes perspetivas.

Assim, sob o pretexto da exibição do filme, e tirando partido do ambiente familiar e descontraído que se fez sentir durante toda a noite, foi possível levar, de forma divertida, a Física à população em geral. Tratou-se, sem dúvida, de um evento muito agradável e certamente a repetir num futuro próximo! Por fim, resta-nos um grande agradecimento à Sociedade Portuguesa da Física e à Sociedade Europeia da Física por tornarem este evento possível, assim como ao Museu de História Natural e da Ciência de Lisboa pelo fornecimento do espaço.



## 23.º Conferência Nacional de Física e o 32.º Encontro Ibérico para o Ensino da Física

A 23.º Conferência Nacional de Física e o 32.º Encontro Ibérico para o Ensino da Física ocorreu nos passados dias 7 a 10 de setembro de 2022 na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Esta conferência bienal, organizada pela Sociedade Portuguesa de Física reuniu uma grande comunidade nacional de físicos, tendo participado mais de 200 participantes de todas as regiões de Portugal abrangendo docentes do Ensino Básico (21 %), Investigadores e Professores Universitários (37 %), alunos de doutoramento (19%) e alunos de mestrado (23 %).

O evento iniciou-se na tarde de 7 de setembro com um conjunto de 10 oficinas (opcionais) abordando os mais variados assuntos relevantes para o ensino da Física, como por exemplo a programação/utilização de Arduínos, Raspbery PI, uso de softwares de vídeo, novas metodologias de ensino ou introdução a áreas emergentes como por exemplo nanomateriais/nanotecnologias ou eletrónica plástica imprimível.

No segundo dia iniciou-se o ciclo de palestras onde durante 3 dias seguintes ocorreram 11 apresentações plenárias que abordaram tópicos modernos de Física, nomeadamente os ângulos Mágicos do Carbono, Eletrónica Plástica, Redes Complexas, Alterações Climáticas, Física Médica terminando no sábado com uma sessão focada no Ensino, com apresentação de um vídeo do Prémio Nobel (Dr. Carl Wieman) terminando com a plenária do Prof. Nuno Crato (ex-ministro da Educação) sobre a sua visão do Ensino em Portugal.

Realça-se a sessão Medea que abordou os tópicos relacionados com os prémios nobel da Física atribuídos em 2020 e 2021 onde foram também entregues os prémios Medea aos alunos da Escola Secundária Dr. João de Araújo Correia de Peso da Régua e uma menção honrosa aos alunos da Escola Secundária de Paços de Ferreira.

Nos dias 8 e 9 de setembro da parte da tarde, ocorreram simultaneamente 3 sessões paralelas, onde investigadores e professores tiveram a oportunidade de mostrar o seu trabalho científico/educacional, nas diferentes áreas de investigação que Física (Física da Matéria Condensada, Ensino da Física, Física Atómica e Nuclear, Física Médica, Ótica, Energia e Engenharia Física). No total foram apresentadas 87 comunicações orais.

Durante o período de descanso para café, foram ainda apresentados 50 comunicações em formato poster nas diferentes áreas acima referidas.

Na sessão de Encerramento foram entregues pela primeira vez os Prémios SPF/BPI de Incentivo da Excelência no Ensino da Física no 3º ciclo e secundário, patrocinados pelo BPI/ Fundação la Caixa. Nomeadamente foi entregue o prémio André Freitas aos professores Albino

Rafael Mesquita Pinto e Álvaro Folhas pelas boas práticas pedagógicas.

O prémio Lúcia Salgueiro foi para a Ana Cristina Silva e Attila Goren que é atribuído ao melhor artigo publicado pela Gazeta de Física no biénio que antecede à conferência nacional de Física.

Finalmente o prémio carreira, Prémio Rómulo de Carvalho, foi entregue ao professor José Jorge da Silva Teixeira.

Foi um encontro onde durante 4 dias apresentou-se/debateu-se diversificados tópicos da Física desta forma permitindo identificar o estado da Física atual no nosso país assim como a nível ibérico na área do Ensino da Física. Para além da componente científica foi um encontro onde existiu diversos momentos sociais e de convívio entre os intervenientes da Física2022 promovendo troca de visões e conhecimentos.

Um agradecimento especial a todos os participantes, respeitantes comissões Científicas, patrocinios e a todos os intervenientes, em nome da comissão organizadora do Física2022.



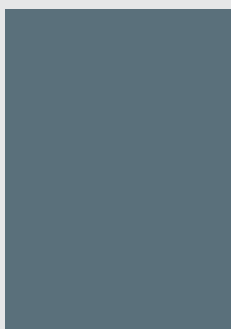
# TABELA PUBLICIDADE GAZETA DE FÍSICA



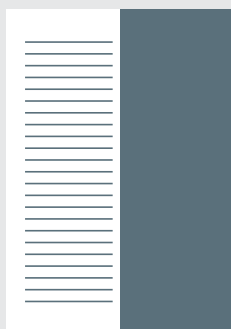
1 - Verso Capa



2 - Contracapa



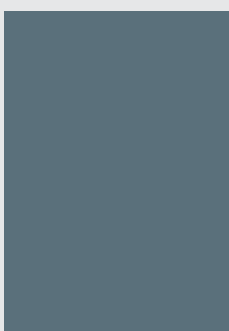
3 - Página



4 - 1/2 Página



5 - 1/4 Página



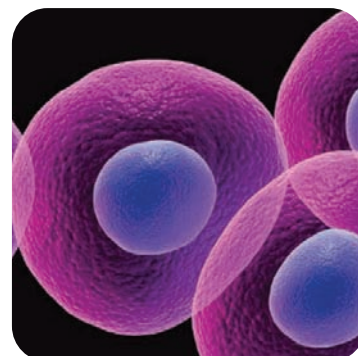
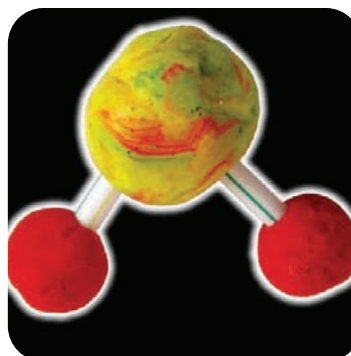
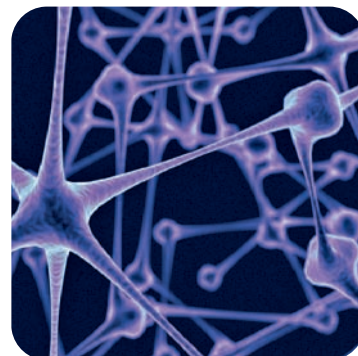
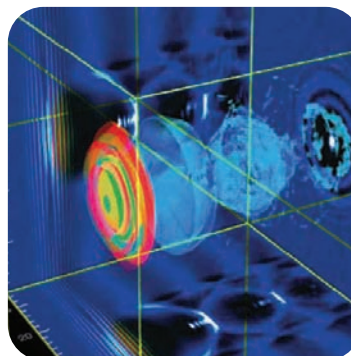
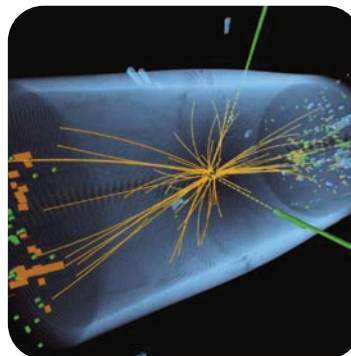
6 - Destacável/folha



7 - Rodapé



Para os físicos e amigos da física.  
WWW.GAZETADEFISICA.SPF.PT



## Tabela (acresce IVA)

- 1 - 1.500,00 €
- 2 - 2.000,00 €
- 3 - 800,00 €
- 4 - 600,00 €
- 5 - 400,00 €
- 6 - 1.500,00 €
- 7 - 100,00 €

Descontos  
Sócios coletivos - 20%  
Quantidade  
2 x 20% | 3 x 30% | 4 x 40%  
Tiragem: 3000 exemplares  
Consulta online 15000 (C/CPLP)  
Facebook ~40000 (C/CPLP)

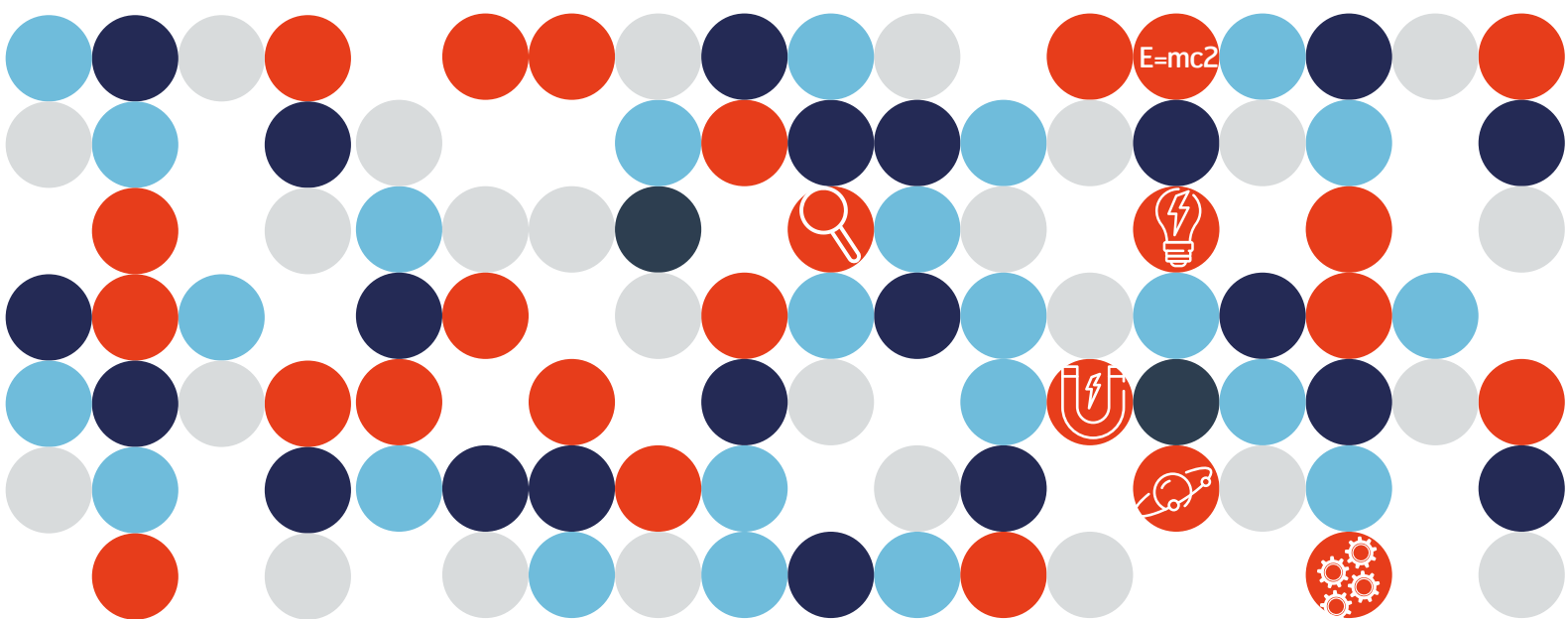
## CONTACTOS:

Sociedade Portuguesa de Física  
Av. da República, 45 - 3º Esq. | 1050-187 Lisboa  
Telef.: 217 993 665 | spf@spf.pt

# PRÉMIOS DE INCENTIVO DA EXCELÊNCIA

no ensino da física no 3.º ciclo  
e secundário

- PRÉMIO RÓMULO DE CARVALHO
- PRÉMIO ANDRÉ FREITAS
- PRÉMIO LÍDIA SALGUEIRO



[www.spf.pt/premios](http://www.spf.pt/premios)

com o apoio:

