

**Cem anos de gravitação**  
**Os enigmas da expansão do Universo**  
**Física do filme *Interstellar***

# Índice

artigo geral

- 2 **Os enigmas da expansão do Universo:** discussão e análise dos conceitos e preconceitos de uma grande descoberta

Paulo Aguiar e Paulo Crawford

artigo geral

- 11 **Cem anos** de Gravitação

Richard Brito, Vitor Cardoso e Paolo Pani

física e sociedade

- 18 **Física** do filme *Interstellar*

Pedro V. P. da Cunha

crónicas

- 22 **José Mariano Gago**, físico que serviu o país

Carlos Fiolhais

vamos experimentar

- 23 **Porque é que** o quadrado vermelho desaparece?

Constança Providência e Pedro Providência

livros e multimédia

- 25 **Uma Introdução** à Mecânica

Carlos Fiolhais

sala de professores

- 27 **Portal da Sabedoria:** uma mudança no paradigma da educação

Diogo Bragança

sala de professores

- 29 **Scientix:** a comunidade *online* para a educação em ciência na Europa

Carlos Cunha

- 30 **Notícias**

## CRÉDITOS

**Capa:** Artist's impression of a supermassive black hole at the centre of a galaxy (ESO/L. Calçada)

**Contracapa:** Wei Li, National Eye Institute, National Institutes of Health; Phil Hart; Optoelectronics Research Centre, Southampton, UK; Greg Kuebler, JILA, courtesy: National Science Foundation

**Pág. 17:** Paramount Pictures e Warner Bros

Publicação Trimestral Subsidiada

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

## O festival da luz

Todos os anos, no final do Outono, os céus da Tailândia enfeitam-se de milhares de lanternas flutuantes, que iluminam a noite num espectáculo deslumbrante. É uma das manifestações do *festival das luzes*, uma celebração comum a muitas culturas humanas, do Ocidente ao Oriente. Neles, festeja-se o triunfo da luz sobre a escuridão, os ciclos solares, ou simplesmente o prazer de estar vivo. Ao eleger 2015 como Ano Internacional da Luz, a Assembleia Geral das Nações Unidas propõe a todo o mundo que se una num festival das luzes global, celebrando a essência da luz e das suas espantosas aplicações na vida moderna, ao mesmo tempo que comemora várias efemérides históricas.

Desde o início deste ano, e um pouco por todo o mundo, desenvolvem-se actividades de promoção da luz, desde conferências a concursos, exposições, palestras, demonstrações, formações, festas, e muitas outras iniciativas destinadas a promover este Ano Internacional e a levar a cabo os seus objectivos: criar nos cidadãos a consciência de que a luz e as tecnologias ópticas são parte integrante e essencial da sociedade contemporânea, simultaneamente educando, inspirando e divertindo.

A nível nacional já estão a decorrer múltiplas actividades de norte a sul. A página web nacional ([www.aill2015.org](http://www.aill2015.org)), entre outras funcionalidades, inclui um calendário e uma lista dos eventos associados ao AIL2015. Os dados sobre os eventos são inseridos pelos organizadores, que optimizam desse modo a disseminação da informação. Se ainda não conhece, ou se está a desenvolver iniciativas no âmbito do AIL2015, dê uma espreitadela na página e garanta que o seu evento fica registado e anunciado.

A coordenação das actividades em Portugal está a cargo de uma comissão nacional coordenada pelo Prof. Carlos Fiolhais, e que envolve representantes

de diversas sociedades e outras entidades. Entre as várias actividades que são dinamizadas directamente pela Sociedade Portuguesa de Física gostaria de destacar três:

**O programa “Haja Luz nas Escolas”** – lançado no passado dia 16 de Março na Escola Passos Manuel, em Lisboa, este programa inclui um pacote de iniciativas vocacionadas para as escolas, onde se incluem exposições, palestras e *workshops*, oficinas laboratoriais, formação de professores, um *kit* educacional sobre óptica, e uma exposição itinerante de hologramas. As escolas podem inscrever-se naquelas que considerarem mais apropriadas, sem terem que dispender qualquer importância.

**A edição especial da Gazeta de Física** dedicada ao AIL2015 – agendada para o final do ano, esta edição será dedicada a celebrar as diversas facetas da luz nas ciências, em particular na física e nas suas ligações com as outras áreas do conhecimento: química, medicina, materiais, biologia, mas também arquitectura, iluminação, artes e cultura, para dar ilustrar apenas algumas possibilidades. Fica desde já o convite a todos aqueles que utilizam a luz como ferramenta de trabalho e de descoberta para que nos submetam os seus artigos, ilustrando como a luz possibilita avanços científicos e tecnológicos.

**A conferência de encerramento**, a ter lugar em Dezembro na Fundação Calouste Gulbenkian, em Lisboa. O objectivo é efectuar um levantamento de aplicações actuais da luz e de problemas em aberto. Os oradores serão cientistas, engenheiros, artistas e arquitectos. Pretende-se um diálogo multidisciplinar, inspirador, no ambiente pouco usual que mistura artistas e cientistas, olhares e pensamentos cruzados sobre desenvolvimento e inovação, sustentabilidade, arte, história e educação.

Estes são apenas três exemplos de como o AIL2015 está a ser vivido em Portugal. Na página web encontrará muitos mais – quem sabe, poderá mesmo ter uma ideia brilhante para uma nova actividade que permita levar a luz a mais gente.

Faço votos para que este ano possa realmente iluminar, criando inspiração e fascínio pelas ilimitadas aplicações da luz.

Gonçalo Figueira

*Por decisão pessoal, o autor do texto não escreve segundo o novo Acordo Ortográfico.*

### Ficha Técnica

#### Propriedade

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

#### Equipa

Gonçalo Figueira (Director Editorial)  
Filipe Moura (Editor)  
Olivier Pellegrino (Editor)

#### Secretariado

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

#### Colunistas e Colaboradores regulares

Ana Simões, Carlos Fiolhais,  
Constança Providência

#### Colaboraram também neste número

Carlos Cunha, Diogo Bragança, Paolo Pani, Paulo Aguiar,  
Paulo Crawford, Pedro Providência, Pedro V. P. da Cunha,  
Richard Brito, Rui Travasso, Vítor Cardoso

#### Comissão editorial

Teresa Peña - Presidente da SPF e anterior director editorial  
Carlos Fiolhais - Anterior director editorial  
Ana Rita Figueira - Física Médica  
Carlos Portela - Educação  
Constança Providência e Costa - Física Nuclear  
Horácio Fernandes - Física dos Plasmas  
Joaquim Norberto Pires - Física Aplicada e Engª Física  
João Carvalho - Física das Partículas  
João Veloso - Física Atómica e Molecular  
José Luís Martins - Física da Matéria Condensada  
Luís Matias - Meteorologia, Geofísica e Ambiente  
Manuel Marques - Óptica  
Rui Agostinho - Astronomia e Astrofísica

#### Correspondentes

Joaquim Moreira - Delegação Norte  
Rui Travasso - Delegação Centro  
Pedro Abreu - Delegação Sul e Ilhas

#### Design / Produção Gráfica

Fid'algo - [printgraphicdesign](http://printgraphicdesign)  
NIPC 501094628

Registo ICS 110856

ISSN 0396-3561

Depósito Legal 51419/91

Tiragem 1.800 Ex.

Publicação Trimestral Subsidiada

As opiniões dos autores não representam necessariamente posições da SPF.

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

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

Assinaturas Grátis aos Sócios da SPF.

# Os enigmas da expansão do Universo: discussão e análise dos conceitos e preconceitos de uma grande descoberta

Paulo Aguiar<sup>1, 2</sup> e Paulo Crawford<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Lusada do Porto, Rua Dr. Lopo de Carvalho, 4369-006 Porto

<sup>2</sup> Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Ed. C8; 1749-016 Lisboa

## Resumo

A expansão do Universo é uma das maiores descobertas do século XX. É talvez o facto mais relevante descoberto pelo homem acerca das suas origens. Por outro lado, até à identificação da radiação cósmica de fundo no domínio das micro-ondas, por Arnie Penzias e Robert Wilson em 1965, o reconhecimento de que a recessão das galáxias distantes aumenta com a distância foi a observação astronómica que mais estimulou o nascimento da cosmologia moderna. Este resultado observacional está sobretudo associado ao astrónomo americano Edwin Hubble (1889-1953), que por essa razão é frequentemente identificado como o astrónomo que descobriu a expansão do Universo, na medida em que a descoberta da recessão das galáxias distantes foi entendida como uma prova da expansão do Universo. Neste contexto, é o seu artigo de 1929 que é habitualmente citado sempre que a expansão do Universo é atribuída a Hubble. Contudo, em nenhuma dessas páginas Hubble alguma vez se refere à expansão do Universo. Veremos, aliás, que o processo que conduz a este resultado é um caminho longo e complexo, no qual intervieram vários astrónomos e físicos teóricos, e cuja interpretação é ainda hoje alvo de debates acalorados. Vamos aqui recordar alguns dos autores e respectivos trabalhos que mais contribuíram para a ideia da expansão do Universo, bem como analisar alguns dos seus pressupostos. Discutiremos depois a possibilidade de existirem variantes do modelo padrão compatíveis com as observações actuais, tendo em conta a existência provável de heterogeneidades na distribuição da matéria numa época muito primitiva da História do Universo.

## 1. Introdução

O americano Edwin Hubble (1889-1953) é frequentemente identificado como o astrónomo que descobriu a expansão do Universo. Foi ele que liderou a equipa que observou o deslocamento para o vermelho das riscas de absorção dos espectros das galáxias distantes, tendo verificado que esse afastamento é tanto maior quanto maior for a distância às galáxias. Esta observação foi mais tarde interpretada como uma prova da descoberta da recessão das galáxias distantes, ou seja, como uma verificação da expansão do Universo. Ora, sempre que a expansão do universo é atribuída a Hubble, é o seu artigo de 1929 que é habitualmente citado [1]. Contudo, em nenhuma parte dessa publicação a expansão do Universo é referida.

Kragh & Smith (2003) analisaram historicamente o tema da descoberta da expansão e concluíram que só nos anos 50's do século XX o conceito de 'Lei de Hubble' e a referência a 'Hubble como o astrónomo que descobriu a expansão do Universo' se tornou habitual na literatura científica [2]. A preocupação destes historiadores da ciência "não é desacreditar Hubble ou discutir prioridades, mas sobretudo discutir o próprio processo da descoberta da universo em expansão". Porém, de uma forma muito clara, acrescentam que Hubble não pode ser creditado com o único a contribuir para essa descoberta. Citando Stephen Brush [3], que os autores assumem ter produzido uma afirmação muito mais sensata sobre este tema do que é habitual na literatura científica: "Podemos dizer que Hubble 'descobriu o universo em expansão' no mesmo sentido em que Max Planck 'descobriu os quanta': pois estabeleceu uma fórmula empírica que parecia implicar e

na verdade levou outros a adoptá-la (e mais tarde a assumir que ele próprio deve tê-la adoptado) – e no entanto ele recuou na sua adopção explícita como uma afirmação verdadeira acerca do mundo, e em algumas situações chegou mesmo a sugerir que se tratava de uma afirmação falsa. "Será este um comportamento típico dos cientistas que participaram em descobertas que levaram algum tempo a serem assimiladas? Realmente o caso de Max Planck, referido por Brush, é exemplar.

Quando um cientista propõe empiricamente uma fórmula, que é entretanto adoptada pela comunidade, sem que tenha havido uma clara construção teórica baseada nos princípios e teorias adoptados até então, ficando a faltar uma explicação fundamentada, coloca-se imediatamente a questão da interpretação dessa fórmula, o que poderá dar lugar a uma longa discussão até que a fórmula seja realmente entendida; só então o novo conceito é realmente incorporado e devidamente assimilado. Isto é particularmente relevante quando há uma mudança de paradigma, que acarreta por via de regra um debate prolongado no seio da comunidade científica. Mas em geral, o que caracteriza uma boa teoria científica é que ela revela e explica aspectos desconhecidos da realidade, como é o caso da teoria da relatividade geral que recorre ao conceito de curvatura do espaço-tempo para explicar o avanço do periélio de Mercúrio. Não admira, portanto, que a história de uma descoberta seja muitas vezes um processo longo, com avanços e recuos, e com muitas contribuições, mesmo naqueles casos em que é possível atribuir uma data e um criador, como foi o caso da descoberta em 1905 da teoria da relatividade restrita por Albert Einstein. Em que medida as contribuições de H. A. Lorentz e de H. Poincaré não foram determinantes na construção de A. Einstein? Mas não vamos aqui discutir estas questões que nos afastariam dos nossos objectivos neste artigo. Recentemente, com a publicação de dois livros sobre a questão da descoberta da expansão do universo [4, 5], por H. Nussbaumer e L. Bieri (2009), e M. Bartusiak (2010), respectivamente, foram levantadas dúvidas fundamentadas acerca da prioridade de Hubble como autor dessa descoberta, e simultaneamente feita alguma clarificação no próprio processo de descoberta. Tendo por base algumas das fontes primárias mais relevantes e estas outras fontes secundárias, iremos visitar brevemente o percurso seguido por alguns dos autores determinantes no processo que conduziu à descoberta desta concepção tão basililar para a compreensão da cosmologia moderna.

Neste trabalho mostramos também como as heterogeneidades na distribuição da matéria, produzidas até à época da última superfície de *scattering* (dispersão), quando o Universo tinha apenas algumas centenas de milhares de anos após o *Big*

*Bang*, produziram anisotropias que, em grandes escalas angulares (para ângulos  $\theta \gtrsim 2^\circ$ )<sup>1</sup>, poderiam ser enquadradas no contexto de alguns modelos espacialmente homogêneos mas anisotrópicos, que não diferem significativamente das consideradas no âmbito de geometrias especialmente homogêneas e isotrópicas, conhecidas por soluções ou modelos de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW). Para os modelos anisotrópicos que vamos considerar, a marca deixada na radiação cósmica de fundo pelas flutuações na densidade primordial, sob a forma de uma variação fraccional da temperatura desta radiação, é regida pela mesma expressão que é usada para os modelos FLRW. Mais precisamente, sob condições iniciais adiabáticas, o chamado efeito de Sachs-Wolfe clássico, que explicaremos mais adiante, é recuperado, desde que a anisotropia da expansão global seja pequena na época da última superfície de dispersão. Esta conclusão está de acordo com trabalhos anteriores sobre os mesmos modelos anisotrópicos onde estes passam por um processo de 'isotropização' até ao ponto em que as observações são incapazes de distingui-los dos modelos FLRW, se os dois parâmetros de Hubble ao longo das direcções ortogonais forem assumidos como aproximadamente iguais na época actual. Consideraríamos limites superiores para os valores actuais dos parâmetros anisotrópicos impostos pelas observações realizados no âmbito do satélite COBE.

## 2. Friedmann e Lemaître

Alexander Friedmann (1922) foi o primeiro a publicar [6] soluções cosmológicas não estáticas das equações da relatividade geral, a teoria de Einstein da gravitação. Contudo, não relacionou estes resultados teóricos com observações astronómicas. Cinco anos depois, um trabalho fundamental de Georges Lemaître (1927) é publicado num jornal local belga, mas permaneceu desconhecido do público científico em geral. Mais tarde, Sir Arthur S. Eddington, antigo supervisor de Lemaître, ao comentar com este as dificuldades que estava a encontrar na análise da instabilidade do modelo estático de Einstein, toma finalmente conhecimento do artigo de Lemaître [7], e nele encontra a solução para o seu próprio problema. Procurando reabilitar-se aos olhos de Lemaître por não ter dado atenção ao artigo em devido tempo, Eddington diligencia para que o trabalho do seu antigo aluno tenha a difusão que merece, e consegue que um resumo desse trabalho seja publicado em inglês na prestigiada revista *Monthly Notices of Royal Society* (1931). Lemaître [8], nessa publicação, deu a conhecer a sua solução dinâmica das equações de Einstein com aplicação ao Universo, e extrai também uma relação linear entre as velocidades de recessão das galáxias e as respectivas distâncias:  $v = H_0 d$ , onde a constante de proporcionalidade,  $H_0$ , é a conhecida constante de Hubble' medida no instante actual. Combinando as velocidades radiais de 42 nebulosas extragalácticas [9] publicadas por Strömberg (1925) – que as obteve na sua maioria das observações dos deslocamentos para o vermelho (*redshifts*) de Vesto Slipher (1917) [10] – e as distâncias obtidas por Hubble (1926), Lemaître calculou a taxa

<sup>1</sup> O ângulo  $\theta$  representa a separação angular entre dois pontos no céu.

de expansão do Universo (constante de Hubble) e obteve (625 km/s)/Mpc ou (575 km/s)/Mpc, dependendo da forma como agrupava os dados; vale a pena comparar estes valores com o valor favorito obtido por Hubble em 1929: (500 km/s)/Mpc. Em resumo, contrariamente ao que fizeram Friedmann em 1922 ou Hubble em 1929, Lemaître em 1927 relaciona a sua solução dinâmica das equações de Einstein, com as observações astronómicas conhecidas na altura, sendo assim o primeiro a sugerir, sem qualquer equívoco, um universo em expansão.

Num artigo publicado na revista *Nature* em 1931, Lemaître [11] substitui a singularidade do instante  $t = 0$  por um único átomo contendo toda a matéria e energia. Nesse artigo, Lemaître via a evolução cósmica, depois do decaimento do átomo primordial, como o resultado do desequilíbrio entre duas forças cósmicas opostas: a gravitação e a energia escura (para usar uma denominação moderna), que estava materializada na constante cosmológica  $\Lambda$ , e que Lemaître associava com a energia do vácuo. Note-se que, mesmo depois de Einstein ter abandonado a constante cosmológica em 1931, Eddington e Lemaître continuaram a acreditar na sua importância. Durante uma conferência da União Astronómica Internacional em Cambridge (Massachusetts), em 1932, Eddington deu uma lição sobre “O Universo em expansão”, que daria origem a um livro com o mesmo nome [12], publicado em 1933, em cujo prefácio Eddington chama a  $\Lambda$  a “mão escondida” na história da expansão. Mas Eddington e Lemaître tinham diferentes pontos de vista em relação ao início do Universo: Eddington e seus colaboradores insistiam numa expansão a partir de um estado estático instável, enquanto Lemaître favorecia um início explosivo.

### 3. Os Primeiros Modelos Cosmológicos

Antes dos trabalhos fundamentais de Friedmann e Lemaître, eram conhecidos dois modelos cosmológicos: o modelo espacialmente esférico de Einstein [13], publicado em 1917, contendo matéria distribuída homogeneamente tipo-poeira, isto é, caracterizada por uma densidade da matéria só dependente do tempo,  $\rho(t)$ , e uma pressão nula, em equilíbrio com um termo cosmológico, representado por  $\Lambda$ , que desempenha o papel uma força anti-gravítica, isto é, uma força de repulsão em vez de ser de atração, capaz por isso de anular a atracção gravítica da matéria; e o modelo de De Sitter [14], publicado no mesmo ano, que não continha matéria mas simplesmente um termo cosmológico. Nesse tempo, ambos os modelos eram considerados estáticos. E foram então estes dois modelos as grandes referências até ao final dos anos 1920's.

Apesar dos modelos de Friedmann e de Lemaître terem sido publicados nessa década, eram porém desconhecidos. Assim, as primeiras tentativas de descrever o universo e interpretar as observações astronómicas dos *redshifts* das nebulosas extragalácticas serão feitas em função destes modelos, sendo o universo de De Sitter o que despertou maior interesse entre os astrónomos, mas também provocou um maior debate sobre a sua interpretação. Vários foram os físicos teóricos ou matemáticos que se manifestaram nesse debate sobre o modelo de De Sitter, a começar

pelo próprio Einstein, logo seguido por Hermann Weyl e Kornel Lanczos, e mais tarde por Eddington e Howard P. Robertson.

Qualquer destas soluções das equações de Einstein, incluindo os modelos de Friedmann e Lemaître, conhecidos mais tarde, pertencem a uma família de soluções, actualmente conhecidas por métricas de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW). No caso geral as soluções das equações de Einstein não têm que possuir simetrias especiais. Porém, para descrever o universo a grande escala consideramos soluções especialmente homogéneas e isotrópicas, sendo neste caso usual separar o espaço-tempo quadri-dimensional num volume tridimensional e uma direção temporal. Além disso, admitimos o princípio de Copérnico, que se traduz em supôr que “nossa posição no Universo não é especial” e, por conseguinte devemos generalizar as observações de modo a satisfazer homogeneidade espacial e isotropia.

Robertson foi o primeiro a reconhecer que estas condições implicam simetrias nas soluções das equações de Einstein aplicadas ao Universo, e como tal foi o primeiro a olhar explicitamente para as soluções das equações de Einstein que satisfizessem estes requerimentos físicos.

Para estas soluções as equações tomam a forma seguinte:

$$2R\ddot{R} + \dot{R}^2 + kc^2 - c^2\Lambda R^2 = -\frac{8\pi G}{c^2}pR^2 \quad (1)$$

$$3\left(\dot{R}^2 + kc^2\right) - c^2\Lambda R^2 = 8\pi\rho R^2, \quad (2)$$

onde  $R(t)$  é o ‘factor de escala’, que representa o raio de curvatura do espaço tri-dimensional,  $\rho(t)$  e  $p(t)$  representam a densidade de massa-energia e a pressão do fluido cósmico, respectivamente, e  $\Lambda$  a misteriosa constante cosmológica, responsável por uma força repulsiva capaz de se opor à atracção gravítica, introduzida por Einstein para garantir um modelo estático. No modelo de Einstein,  $R = R_E$ , representa o raio do Universo, é uma constante e  $p = 0$ , visto que se supõe haver uma distribuição espacialmente homogénea de matéria e admite-se que as partículas da matéria não interatuam entre si. Nestas condições, as equações anteriores permitem concluir que

$$4\pi G\rho = \Lambda c^2 = \frac{c^2 k}{R_E^2},$$

e como  $\Lambda > 0$ , vem  $k = 1$ , pelo que o universo tem curvatura espacial positiva.

Pode-se perguntar, até que ponto seria este modelo do universo visto como compatível com os dados astronómicos da época? Em 1926, Hubble empregou a equação anterior para calcular, a partir da sua

determinação da densidade média  $\rho = 1,5 \times 10^{-31}$  g/cm<sup>3</sup>, o raio do Universo, tendo obtido

$$R = \frac{c}{\sqrt{4\pi G\rho}} = 2,7 \times 10^{10} \text{ parsec.}$$

Ora, mesmo as mais recentes observações cosmológicas, que sugerem uma densidade média atual da matéria,  $\rho_{m,0}$  (incluindo matéria bariónica e matéria escura) como sendo aproximadamente  $\rho_{m,0} \approx 3 \times 10^{-27}$  kg m<sup>-3</sup>, apontam para um factor de escala  $R_0 \approx 2 \times 10^{26}$  m  $\approx 6 \times 10^9$  parsec, valor mais do que suficiente para que uma geometria espacial contenha todo o universo observável. Por maioria de razão, o valor de  $R$  obtido por Hubble era perfeitamente compatível com as observações da época. E por outro lado,  $\Lambda = 1/R_0^2 = 2,5 \times 10^{-53}$  m<sup>-2</sup>, é suficientemente pequeno para não produzir qualquer perturbação no cálculo das observações experimentais ao nível do Sistema Solar.

Na descrição de um modelo cosmológico é importante elucidar (ver [15], por exemplo) que este só é particularizado depois de especificado o 4-vector velocidade dos observadores fundamentais (que estão a descrever o Universo) ou as correspondentes linhas do universo associadas, bem como a métrica  $g_{ab}$ , que caracteriza a geometria do espaço-tempo. Os deslocamentos para o vermelho (*redshifts*) medidos por estes observadores são determinados por

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \left( \dot{u}_a e^a + \frac{\dot{R}}{R} \right) d\ell \quad (3)$$

onde  $\delta\lambda$  é a variação do comprimento de onda da radiação emitida com o comprimento de onda  $\lambda$ , medido pelos observadores fundamentais a uma distância  $d\ell$  ao longo do caminho de um raio luminoso,  $\dot{u}_a$  é a aceleração dos observadores fundamentais,  $\dot{R}(t)$  é a taxa de variação no tempo do factor de escala  $R(t)$ , e  $e^a$  a direcção de observação<sup>2</sup>. Como o universo de De Sitter é um espaço-tempo de curvatura constante, não existe uma escolha única para as linhas do universo fundamentais; como tal, este universo pode ser escrito de muitas formas como modelo cosmológico; ou seja, há várias formas de folhear o espaço-tempo, com  $M = S \times R$ , sendo a variedade 3-dimensional  $S$  aqui um espaço de curvatura constante. Note-se que o universo de De Sitter também pode ser folheado por hipersuperfícies espaciais anisotrópicas, como no caso do modelo de Bianchi III, como se mostra em [16]. Na verdade, a solução de De Sitter pode ser escrita como um modelo estático – a forma inicialmente obtida por De Sitter – ou como qualquer dos universos

em evolução de Robertson-Walker com  $k = 0, +1$ , ou  $-1$ , bem como soluções de espaço-tempo folheadas por superfícies 3-dimensionais anisotrópicas. No modelo estático, as linhas do universo fundamentais são não-geodésicas,  $\dot{u}_a \neq 0$ , e por isso são observados *redshifts* (de acordo com a fórmula (3)). A existência desta aceleração, resultante da presença da constante cosmológica  $\Lambda$ , era referida na altura como o “efeito de De Sitter”. Embora na formulação original, o modelo tenha sido considerado estático, uma vez colocadas duas partículas (ou dois observadores) neste universo a uma certa distância, de modo a descreverem as linhas do universo fundamentais, verificar-se-ia um afastamento acelerado, que se traduziria na observação de um *redshift*.

Foi Lemaître (1925) que primeiro descobriu a natureza estacionária (e não estática) da solução inicial de De Sitter, por intermédio de uma escolha adequada de coordenadas [17]. Na sequência do trabalho que lhe permitiu obter as novas coordenadas, Lemaître percebeu que o modelo que procurava não podia ser estacionário, e deveria ter um raio crescente. O seu objectivo era obter algo que se situava entre os modelos de Einstein e De Sitter; para isso Lemaître ajustou as constantes de integração aos seus valores na solução estática de Einstein, e obteve uma solução, mais tarde conhecida por modelo do universo de Eddington-Lemaître, o qual descreve um universo em expansão com uma densidade de matéria não nula, que se aproxima assintoticamente do universo estático de Einstein, à medida que o tempo vai para menos infinito.

Numa publicação muito recente de J. P. Luminet (2011) encontramos uma afirmação muito clara acerca da prioridade da descoberta da expansão do universo a propósito do artigo de Lemaître de 1927, “*Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques*”, o que não é habitual na literatura científica. Nesse artigo [18] Luminet afirma que a expansão é interpretada por Lemaître como uma consequência da recessão das galáxias: Segundo Luminet, “a grande novidade era que Lemaître fornecia a primeira interpretação dos *redshifts* cosmológicos em termos da expansão do próprio espaço, em vez de ser um movimento real das galáxias: o espaço estava constantemente a expandir-se e por conseguinte as separações aparentes entre galáxias cresciam”. Nele, Lemaître calculava as soluções exatas das equações de Einstein assumindo um espaço com curvatura positiva (e topologia elíptica), densidade de matéria e pressão variáveis no tempo, e uma constante cosmológica não nula. Isto levou-o a obter um modelo com uma expansão continuamente acelerada, no qual ajustou o valor da constante cosmológica de modo que o raio  $R(t)$  do espaço, uma hiper-esfera  $S^3$ , cresce constantemente a partir do valor do raio da hiper-esfera estática de Einstein,  $R_E$ , para  $t = -\infty$ . Desta forma eliminava a singularidade no passado e resolvia o problema da idade do Universo.

<sup>2</sup> Na Eq. (3) estamos a usar  $c = 1$  e, como é habitual no cálculo tensorial, a *convenção de soma* de Einstein segundo a qual um índice covariante e outro contravariante repetidos indicam uma soma em toda a gama de variação dos respectivos índices; assim, no caso do espaço-tempo, temos  $\dot{u}_a e^a = \dot{u}_0 e^0 + \dot{u}_1 e^1 + \dot{u}_2 e^2 + \dot{u}_3 e^3$ .

## 4. Modelos anisotrópicos compatíveis com as observações mais recentes

### 4.1 Introdução

A tarefa de provar a homogeneidade e isotropia do Universo em grandes escalas não é simples. É consensualmente aceite que o Universo é espacialmente homogêneo como consequência de uma hipótese de simetria a que chamamos princípio de Copérnico, ou princípio cosmológico, isto é, a suposição de que vivemos num lugar típico do cosmos. Como consequência desta hipótese, as soluções cosmológicas que descrevem bem o Universo real devem ter o mesmo aspecto em todos os pontos do espaço, em cada instante, e em todas as direcções. Por outras palavras, as soluções cosmológicas aceitáveis devem ser espacialmente homogêneas e isotrópicas. Todos os modelos referidos anteriormente assumem estas hipóteses de simetria. Porém, no que se segue vamos deixar cair a isotropia espacial exacta e vamos admitir modelos com ligeira anisotropia compatível com as observações, quando consideramos o Universo a grande escala, como explicaremos adiante.

Ora, atendendo à homogeneidade espacial, que vamos continuar a assumir, devemos ter em conta um resultado fundamental que decorre do princípio de que se a temperatura da Radiação Cósmica de Fundo (RCF) fosse exactamente isotrópica em relação a qualquer ponto no espaço-tempo, o Universo deveria seguir exactamente um modelo de FLRW. Isto foi provado por Ehlers, Geren e Sachs [19] e é conhecido como o teorema EGS. As observações indicam que a temperatura da RCF é isotrópica a um nível considerável. Estas observações, em conjunto com o princípio de Copérnico, levam ao consenso generalizado de que o Universo pode ser descrito com precisão por um modelo espacialmente homogêneo e isotrópico em escalas suficientemente grandes, reduzindo assim drasticamente o espaço de soluções das equações de Einstein e do número de modelos cosmológicos possíveis.

No entanto, o teorema EGS não é directamente aplicável ao Universo real porque a temperatura da RCF não é exactamente isotrópica. Este facto pode explicar porque é que, apesar do elevado nível de isotropia da temperatura da RCF, alguns autores têm trabalhado em modelos espacialmente homogêneos, mas anisotrópicos para avaliar se eles podem ser compatíveis com as observações actuais, em particular com aqueles modelos que podem ser considerados como ‘próximos’ de FLRW. Vale a pena recordar que Stoeger, Martens, & Ellis (1995) fizeram o que se pode considerar uma hipótese razoável ao estender os resultados de Ehlers *et al.* substituindo o “exactamente” por “quase”, e obtendo assim o que se considera um teorema “quase” EGS. Concretamente, mostraram que se a temperatura da RCF é medida como sendo quase isotrópica numa região do espaço-tempo de um universo em expansão, então é possível descrever o universo *nessa região* por um modelo próximo de FLRW.

Para dar um significado preciso do que se entende por um “modelo próximo de FLRW” seguimos a abordagem de Wainwright & Ellis (1997, § 2.4) [21], mas tendo como foco a questão da anisotropia. Para isso, quantificamos o desvio

do universo em relação a um modelo isotópico FLRW recorrendo ao tensor de cisalhamento ou *shear*,  $\sigma_{ab}$ , do fluido cósmico e ao tensor de curvatura de Weyl,  $C_{abcd}$ , que é aquela parte do tensor de curvatura,  $R_{abcd}$ , que não depende das distribuições de matéria ou energia, os quais se anulam nos modelos FLRW. O *shear* descreve a anisotropia da expansão global do universo e o tensor de curvatura de Weyl, que representa o campo gravitacional puro independente das fontes, descreve, por exemplo, as forças de maré. Mas não basta exigir que estas quantidades sejam pequenas numa cosmologia anisotrópica em expansão, uma vez que estas quantidades têm dimensões físicas não nulas. Além disso o *shear*, por exemplo, tendo para zero com o tempo independentemente do modelo isotropizar ou não. As quantidades apropriadas sem dimensões físicas podem obter-se dividindo por potências apropriadas da constante de Hubble  $H$  média<sup>3</sup>. É assim habitual definir-se uma métrica como ‘próxima’ de um modelo FLRW quando ambos os parâmetros

$$\Sigma^2 = \frac{\sigma_{ab}\sigma^{ab}}{6H^2}, \quad \mathcal{W}^2 = \frac{E_{ab}E^{ab} + H_{ab}H^{ab}}{6H^4}, \quad (4)$$

são quase nulos, embora geralmente o primeiro escalar receba mais atenção que o segundo na literatura. Aqui,  $\sigma_{ab}$  representa o tensor de cisalhamento ou *shear*, que mede o grau de anisotropia da expansão,  $H$  é a constante de Hubble média (estamos a admitir que a taxa de expansão do espaço não é a mesma em todas as direcções), e os tensores  $E_{ab}$  e  $H_{ab}$  são a parte eléctrica e magnética do tensor de Weyl<sup>4</sup>, o qual representa a parte intrínseca da curvatura do espaço-tempo que não depende directamente das fontes (energia e campos), são definidos pelas relações

$$E_{ab} = C_{abcd}u^b u^d, \quad H_{ac} = \frac{1}{2}\epsilon^{ef} C_{efcd}u^b u^d, \quad (5)$$

onde  $u^a$  representa a 4-velocidade do fluido cósmico. A literatura refere-se a  $\Sigma$  como o parâmetro de cisalhamento e  $\mathcal{W}$  como o parâmetro de Weyl.

Note-se que, para modelos de fluidos perfeitos espacialmente homogêneos não-enviesados, isto é, em que as linhas do Universo das partículas do fluido cósmico fluem ortogonalmente às superfícies  $t = const.$ , um valor nulo para o tensor de cisalhamento implica que a curvatura do tensor de Weyl também é nula e estes factos caracterizam os mo-

<sup>3</sup> Note-se que num modelo anisotrópico, em geral, podem existir três constantes de Hubble distintas, segundo cada uma das direcções espaciais.

<sup>4</sup> O tensor de Weyl é um tensor de quarta ordem que pode ser decomposto em dois tensores de segunda ordem, de modo semelhante ao que acontece com o tensor electromagnético  $F_{ab}$  que contém dois campos vectoriais: o campo eléctrico  $E$  e o campo magnético  $B$ .

delos de FLRW, ou seja,  $\Sigma = 0 \Rightarrow W = 0$ . No entanto, restringindo  $\Sigma$  a um valor baixo, não garante que  $W$  seja pequeno, pois o tensor de curvatura Weyl está relacionado com derivadas em ordem ao tempo do tensor de cisalhamento e estas não necessitam de ser pequenas em comparação com  $H^2$ . É, assim, muito importante notar que o teorema EGS pode ser estendido, como foi mostrado em Stoeger et al (1995), feitas algumas suposições razoáveis, substituindo a palavra 'exactamente' por 'quase', resultando a obtenção de um 'quase' teorema EGS [20].

Por outras palavras, os autores mostraram, dadas certas suposições, que se a temperatura da RCF for medida como sendo quase isotrópica numa região do espaço-tempo de um universo em expansão, então esse universo está perto de um modelo FLRW nessa região. Em termos dos parâmetros da anisotropia atrás introduzidos, a condição para o universo estar perto de um modelo de FLRW pode ser traduzida pelas desigualdades

$$\Sigma \ll 1, \quad W \ll 1. \quad (6)$$

Deve salientar-se, entretanto, que W. C. Lim (2001) mostra [22] que existem modelos cosmológicos espacialmente homogêneos tais que a temperatura da RCF é medida como sendo isotrópica em determinado momento  $t_0$  por todos os observadores fundamentais, apesar da expansão total do universo ser altamente anisotrópica em  $t_0$ , onde  $t_0$  representa o tempo actual.

Por outro lado, se os testes clássicos de cosmologia forem aplicados ao modelo de Kantowski-Sachs e os resultados comparados com os que são obtidos para o modelo padrão, tal como mostrou A. Henriques (1996), as observações não são capazes de distinguir este modelo dos de FLRW, se os parâmetros de Hubble ao longo das direcções ortogonais forem assumidos como aproximadamente iguais [23] em  $t_0$ , isto é, se  $\Sigma \approx 0$ . Seguindo o mesmo raciocínio, fizemos um estudo qualitativo [24] de três soluções axialmente simétricas, conhecidas por métricas de Kantowski-Sachs, Bianchi I e Bianchi III, com constante cosmológica e poeira, para analisar quais os modelos que eram fisicamente permitidos, se considerarmos um elevado grau de isotropia, do ponto de vista da expansão total. Mais especificamente, apesar das geometrias destes modelos descreverem campos cosmológicos anisotrópicos, poderiam ser considerados como 'quase' de FLRW do ponto de vista da sua expansão global, uma vez que o tensor de cisalhamento (*shear*) era quase nulo, pelo menos desde o tempo da última superfície de dispersão, quando o Universo tinha apenas uma centena de milhares de anos após o *Big Bang*. Descobrimos que estes modelos sofrem uma 'isotropização' até ao ponto em que as observações

já não são capazes de distinguir estes modelos do modelo padrão, com excepção do modelo de Kantowski-Sachs ( $\Omega_{k0} < 0$ ) e do modelo de Bianchi III ( $\Omega_{k0} > 0$ ) com  $\Omega_{\Lambda 0}$  menor do que um certo valor crítico  $\Omega_{AM}$  [24]. A partir desta análise, concluímos que estes modelos são bons candidatos para a descrição do Universo observado, desde que os parâmetros de Hubble sejam aproximadamente iguais a partir da época da última dispersão.

Por outras palavras, valores baixos do primeiro parâmetro,  $\Sigma$ , são suficientes para assegurar um comportamento semelhante a FLRW e a afirmação de que a expansão altamente isotrópica significa que  $\Sigma \ll 1$ .

Historicamente, a detecção da RCF tem levado à imposição de restrições em modelos teóricos no campo da cosmologia, favorecendo soluções do Big Bang. Com efeito, foi observado o nível de isotropia da temperatura da RCF, detectada inicialmente por Penzias & Wilson (1965), que tem sido considerada como oferecendo a melhor evidência para a isotropia do Universo em larga escala e ainda é o argumento mais forte em favor de uma expansão isotrópica do Universo [25]. Posteriormente as experiências mais precisas provaram que esta radiação tem flutuações de temperatura, ou anisotropias. Pensa-se que estas pequenas anisotropias estão na origem das estruturas do Universo em larga escala, como galáxias, enxames de galáxias, etc. que hoje observamos.

Em 1992, o satélite COBE (Cosmic Background Explorer) [26, 27] observou a RCF com uma precisão sem precedentes, revelado pela primeira vez que o nível das flutuações de temperatura da RCF em grandes escalas é da ordem  $\frac{\Delta T}{T} \simeq 10^{-5}$  [28, 29]. Após o COBE foram efectuadas muitas outras experiências em terra e de balão [30], com maior resolução angular, que confirmaram este resultado e que permitiu investigar o nível das anisotropias numa grande variedade de escalas angulares.

Em grandes escalas angulares, as anisotropias da RCF ( $\frac{\Delta T}{T}$ ), são dominados pelo chamado efeito de Sachs-Wolfe, proposto por Rainer Sachs e o seu aluno Arthur Wolfe que descobriram [31] que a RFC seria influenciada pelo colapso gravitacional da matéria do universo. Desta forma, as flutuações de densidade primordiais deveriam deixar a sua marca na RCF sob a forma de pequenas variações na temperatura da sua radiação em diferentes direcções do céu. É pois um efeito de origem essencialmente gravitacional. Esse fenómeno, deduzido teoricamente por Sachs & Wolfe, foi usado para calcular as perturbações de primeira ordem num universo de FLRW com um espaço plano, preenchido quer com poeira quer por radiação.

Esta é apenas uma das várias fontes possíveis de anisotropia, que ocorre quando há falta de homogeneidade na distribuição de matéria sobre a última superfície de dispersão, que podem produzir anisotropias pelo *red-shift* ou *blue-shift* dos fotões.

Nesta abordagem calculámos o efeito de Sachs-Wolfe para dois modelos anisotrópicos mas homogêneos (Kantowski-Sachs e Bianchi III) que também são localmente rotacional-

mente simétricos (LRS) e descobrimos que sob o pressuposto  $H_{a_0} \simeq H_{b_0}$  (considerámos uma pequena anisotropia compatível com as observações do COBE) esses modelos permitem-nos recuperar o efeito clássico Sachs-Wolfe obtido para universos de FLRW. Este é um resultado interessante, que nos diz que as observações da RCF em grandes escalas angulares não são capazes de distinguir estes modelos anisotrópicos dos modelos isotrópicos de FLRW. Note-se, no entanto, que é possível construir outra classe de modelos anisotrópicos, que se aproximam assintoticamente da isotropia, de modo que os correspondentes efeitos cinemáticos sobre a radiação observada sejam evitados, como é demonstrado em [32].

## 4.2 O método

Como Collins e Hawking [33] muito bem assinalaram, o número de soluções cosmológicas que demonstram isotropia exacta bem depois da origem do *Big Bang* é uma pequena fracção do conjunto de soluções admissíveis para as equações de Einstein. É, por conseguinte, prudente levar a sério a possibilidade de que o Universo possa estar a expandir-se de forma anisotrópica, embora não muito acentuada, e investigar o efeito que essa expansão possa ter na distribuição angular da radiação de fundo. Neste trabalho mostramos que, para grandes escalas angulares ( $\vartheta \gtrsim 2^\circ$ ), existem modelos homogéneos mas anisotrópicos, onde os fótons que viajam da última superfície de dispersão para um observador encontram perturbações na métrica que o levam a mudar a sua frequência, como acontece no caso de modelos de FLRW.

As métricas anisotrópicas que consideramos aqui são as de Kantowski-Sachs e Bianchi III LRS, com fluido perfeito, com pressão anisotrópica nula, dadas por

$$d\tilde{s}^2 = -dt^2 + a^2(t)dr^2 + b^2(t)(d\theta^2 + f^2(\theta)d\phi^2), \quad (7)$$

onde

$$f(\theta) = \begin{cases} \sin \theta & \text{para Kantowski-Sachs} \\ \sinh \theta & \text{para Bianchi III} \end{cases}$$

Calculámos o efeito de Sachs-Wolfe [31, 34], assumindo pequenas perturbações nas métricas acima consideradas e depois integrando as equações das geodésicas para os fótons da RCF ao longo dos seus caminhos, a partir da última superfície de dispersão para o observador. Neste trabalho contabilizámos os ‘efeitos cinemáticos’ sofridos pela propagação da radiação livre desde o último *scattering*, num universo perturbado, e os ‘efeitos intrínsecos’ originados por o conjunto de processos físicos e microfísicos relacionados com as perturbações de densidade durante última superfície de dispersão.

Após algum trabalho matemático e diversas considerações físicas e cosmológicas obtemos a expressão do efeito de Sachs-Wolfe

$$\frac{\delta T_r}{T_r} = \frac{1}{3}\Psi_e + 2 \int_e^r \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} dw, \quad (8)$$

on de  $\Psi_e$  é uma perturbação escalar constante no momento da emissão dos fótons e o segundo termo é chamado de *efeito de Sachs-Wolfe integrado*. Esta expressão para o efeito de Sachs-Wolfe é a mesma que a que é obtida para a universos de FLRW, para a mesma ordem de aproximação e para condições iniciais adiabáticas. As restrições impostas<sup>5</sup> foram  $|\Omega_{M_0} + \Omega_{\Lambda_0} - 1| \simeq 10^{-9}$  e  $H_{a_0}/H_{b_0} = 1 \pm 3,6 \times 10^{-9}$ .

## 4.3 Conclusões finais sobre os modelos anisotrópicos

Destacamos mais uma vez que devemos ter presente que o pressuposto  $H_a \simeq H_b$  não implica por si só uma métrica isotrópica ou mesmo uma métrica quase isotrópica, tal como é expresso pelo crescimento do Weyl nas Equações (4), quando recuamos no tempo até à época da última superfície de dispersão. Embora  $\Sigma$  possua um valor baixo desde a época actual ( $\Sigma_0 \sim -3,6 \times 10^{-9}$ ) até ao instante da última superfície de dispersão ( $\Sigma_{fs} \sim -4,4 \times 10^{-5}$ ), o termo de Weyl, cresce de  $W_0 \sim 2 \times 10^{-10}$  no instante actual para  $W_{fs} \sim 3,8 \times 10^{-1}$  no instante da última superfície de dispersão. Isso mostra o carácter anisotrópico destes modelos no passado. Resumindo,  $\Sigma$  cresce cerca de  $1,2 \times 10^4$ , enquanto  $W$  cresce cerca de  $1,9 \times 10^9$ , quando recuamos no tempo ( $t_0 \rightarrow t_g$ ). Mesmo que se imponha um elevado grau de isotropia no presente, o comportamento anisotrópico destes modelos acabará por se evidenciar quando se recua suficientemente no tempo. No entanto, a variação do termo  $W$  não afecta decisivamente o cálculo de primeira ordem de  $\delta T_r/T_r$ .

Uma análise menos cuidadosa destes resultados poderia levar-nos a concluir que a precisão na fixação dos valores dos parâmetros de densidade e dos parâmetros de Hubble ( $H_a$  e  $H_b$ ) era tão grande que esses modelos se ‘transformavam’ em modelos isotrópicos e, portanto, sem interesse de estudo. O comportamento dos escalares  $W$  e  $\Sigma$  e suas derivadas temporais permitiram confirmar que, de facto, estes modelos podem apresentar um nível elevado de isotropia durante um período de tempo suficientemente elevado desde que  $W$  e  $\Sigma$  possam permanecer com valores próximos de zero. Mas recuando suficientemente no tempo (para épocas anteriores à última superfície de dispersão), estes escalares tendem para o infinito, independentemente da precisão que escolhamos para os parâmetros do Hubble e densidade, o que mostra a natureza anisotrópica desses modelos.

Uma vez que a expressão obtida (para o efeito de Sachs-Wolfe) nos modelos de Kantowski-Sachs e

<sup>5</sup> As densidades  $\Omega_{M_0}$  e  $\Omega_{\Lambda_0}$  são obtidas a partir da introdução dos modelos Kantowski-Sachs e Bianchi III nas equações de Einstein e integrando de seguida. Para as restrições pretendidas  $\Omega_{M_0}$  representa a densidade de matéria bariónica e  $\Omega_{\Lambda_0}$  a densidade associada à constante cosmológica. Para mais detalhes ver [24].

Bianchi III, é a mesma que é dada para o modelo plano de FLRW, podemos concluir que, estes modelos anisotrópicos são também bons candidatos para a descrição do Universo observado desde que possamos supor que  $H_{a_0} \simeq H_{b_0}$  (tendo em conta o limite superior para o valor actual do escalar de  $\Sigma$ , imposto por observações do COBE) e façamos uma escolha especial dos parâmetros de densidade:  $\Omega_0 + \Omega_{\Lambda_0} \simeq 1$ . Este é mais um passo dado no mesmo sentido do trabalho [24], citado anteriormente. De resto este estudo também está de acordo com outro resultado anterior [23]: não é possível distinguir o modelo Kantowski-Sachs dos modelos de FLRW, com os testes clássicos de Cosmologia, se os parâmetros do Hubble ao longo das direcções ortogonais forem considerados aproximadamente iguais.

Esta discussão poderia ter sido realizada usando dados mais recentes como os do satélite Planck [35] e o interferómetro AMIBA [36], cujos dados proporcionam muito melhor resolução, mas também exigiriam a consideração de outros termos como o efeito Sachs-Wolfe integrado. Porém, cremos que não mudariam no essencial as considerações aqui feitas.

Em conclusão, a observação do patamar do efeito de Sachs-Wolfe não nos permite distinguir entre os modelos de FLRW e os modelos anisotrópicos de Kantowski-Sachs e Bianchi III. Para responder a esta indefinição será necessário considerar e processar os dados dos projectos Planck [35] e AMIBA [36] para considerar regiões menores do que as do horizonte na última superfície de dispersão ( $l > 100$ ,  $b < 1^\circ$ ). Dentro desta região de multipolos, as perturbações são dependentes do modelo. Só com esta informação se poderá concluir se o nosso Universo pode ser modelado por um destes modelos anisotrópicos, ou se eles ficarão definitivamente excluídos.

Finalmente, não podemos terminar sem agradecer as sugestões de alguns colegas, em particular de José Pedro Mimoso, com quem um dos autores (PC) colaborou na realização de algumas publicações que abordaram temas aqui discutidos, e ao anónimo *referee* da Gazeta de Física que colocou algumas questões no intuito de melhorar a apresentação e o conteúdo do artigo.

#### Referências

1. Hubble, E. (1929) 'A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae', Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 15, Issue 3, p.168.
2. Kragh, H. and Smith, R.W. (2003). "Who Discovered the Expanding Universe", *History of Science*, 41, 141-162.
3. Brush, S. G. (2001). "Is the Earth too old? The impact of geochronology on cosmology, 1929-1952", in *The age of the Earth: From 4004 BC to AD 2002*, ed. by C.L.E. Lewis and S.J. Knell (London), 157-75, p. 62.

4. Nussbaumer, H and Bieri, L. (2009). *Discovering the Expanding Universe*, Cambridge Universe Press, Cambridge.
5. Bartusiak, M. (2009). *The Day We Found the Universe*, Pantheon Books, New York.
6. Friedmann, A. (1922). "Über die Krümmung des Raumes", *Zeitschrift für Physik*, 10, 377.
7. Lemaître, G. (1927). "Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques", *Annals de la Societ e Scientifique de Bruxelles*, série A, vol. 47, p.49.
8. Lemaître, G. (1931a). "A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius accounting for the Radial Velocity of Extragalactic Nebulae", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91, 483.
9. Strömberg, G. (1925). "Analysis of Radial Velocities of Globular Clusters and Non-Galactic Nebulae", *Astrophys. J.* 61, 353.
10. Slipher, V. M. (1917). "Nebulae", *Proceedings of the American Philosophical Society*, vol. 56, p. 403
11. Lemaître, G. (1931b), "The beginning of the world from the point of view of quantum theory", *Nature* 127, 706.
12. Eddington, A. S. (1933). *The Expanding Universe*. Cambridge. Cambridge University Press.
13. Einstein, A. (1917). *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.* p. 142.
14. De Sitter, W. (1917). *Proc. Akad. Wetench. Amsterdam*, vol. 19, 1217.
15. Ellis, G. F.R. (1971). *Relativistic Cosmology*. In *General Relativity and Cosmology*, ed. R. K. Sachs (Enrico Fermi School XLVIII). New York: Academic Press, 104-182.
16. P. Crawford and P. Vargas Moniz (1993), *Int. J. Theo. Phys.*, 32, 841-848.
17. Lemaître, G. (1925). "Note on de Sitter's universe". *Physical Review*, 25, Ser. II, 903.
18. Luminet, J.P. (2011). "Editorial note to 'The beginning of the world from the point of view of quantum theory'", *Gen.Rel.Grav.* 43, 2911-2928.
19. Ehlers, J., Geren, P e Sachs, R.K. (1968) *J. Math. Phys.* 9, 1344.
20. Stoeger, W. R., Maartens R. e Ellis, G. F. R. (1995), *Astrophys. J.* 443 1 (1995).
21. Wainwright, J., & Ellis, G. F. R. 1997, *Dynamical Systems in Cosmology* (Cambridge: Cambridge Univ. Press)
22. W. C. Lim *et. al.*, *Class. Quantum Grav.* 18, 5583 (2001).
23. A. Henriques, *Astrophysics and Space Science* 235 129 (1996).
24. P. Aguiar and P. Crawford, *Phys. Rev. D* 62 123511 (2000).
25. A. A. Penzias and R. W. Wilson, *Astrophys. J.* 142 419 (1965).
26. G. F. Smoot, *Astrophys. J.* 396 L1 (1992).
27. P. Coles and F. Lucchin, *Cosmology - The Origin and Evolution of Cosmic Structure* (Wiley, Chichester, England 1995), p. 185.
28. J. C. Mather *et. al.*, *Astrophys. J.* 420 439 (1994).
29. R. B. Partridge, *Class. Quant. Grav.* 11 A153 (1994).
30. R. B. Partridge, *Rep. Prog. Phys.* 51 647 (1988).
31. R. K. Sachs and A. M. Wolfe, *Astrophys. J.* 147 73 (1967).
32. José P. Mimoso and Paulo Crawford, "Shear-free Anisotropic Cosmological Models", *Class.Quantum Grav.*, 10 315-326 (1993)
33. C. B. Collins and S. W. Hawking, *Mon. Not. Astron. Soc.* 162 307 (1973).
34. M. White *et. al.*, *Ann. Rev. Astron. & Astrophys.* 32 319 (1994).
35. <http://www.esa.int/SPECIALS/Planck/index.html>
36. <http://amiba.asiaa.sinica.edu.tw/>



**Paulo Aguiar** é Licenciado em Física/Matemática Aplicada (Ramo Astronomia) pela Fac. Ciências da Universidade do Porto em 1991. É Mestre em “Altas Energias e Gravitação” pela Fac. Ciências da Univ. Lisboa em 1994,

onde também obteve o doutoramento em Cosmologia em 2004. É membro do Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa, integrado no Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço. Actualmente é professor na Universidade Lusíada do Porto.



**Paulo Crawford** é Professor Agregado Aposentado da Universidade de Lisboa, docente no Departamento de Física, onde leccionou e desempenhou diversos cargos pedagógicos e directivos. Tem desenvolvido investigação em Gravitação e Cosmologia

em vários centros de investigação da FCUL e é actualmente membro do Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço da Universidade de Lisboa. Tem publicado extensivamente, desde o final dos anos 80, sobre Buracos Negros, Wormholes e Estrutura Causal, Cosmologia Relativista, Teoria da Relatividade e Soluções Exactas das Equações de Einstein. Interessa-se, igualmente, pela História da Relatividade, tendo já publicado sobre o eclipse de 1919 e recepção da relatividade em Portugal e desenvolve uma forte actividade de divulgação destes tópicos para o grande público.

# Cem anos de Gravitação

Richard Brito<sup>1</sup>, Vitor Cardoso<sup>1,2</sup> e Paolo Pani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CENTRA, Dep. Física, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

<sup>2</sup> Perimeter Institute for Theoretical Physics, Waterloo, Ontario N2J 2W9, Canada

vitor.cardoso@ist.utl.pt

## Resumo

A teoria da Relatividade Geral de Einstein é uma das maiores proezas do pensamento humano. Um século depois de ter visto a luz do dia, continua a ser um desafio para cientistas. Segundo esta teoria, a gravidade deixa de ser uma força à distância e passa a ser um efeito da curvatura do espaço-tempo. A Relatividade Geral prevê a existência de “entidades” construídas apenas com tecido espaço-temporal: buracos negros e ondas gravitacionais. Nos próximos anos, estes objectos vão poder ser observados, iluminando finalmente os recantos mais misteriosos do Universo.

## Introdução: rugas no espaço-tempo

O último filme de Christopher Nolan, *Interstellar*, tem lugar num futuro próximo no qual a raça humana já tem a capacidade para fazer viagens cósmicas usando atalhos especiais, os “buracos de minhoca”. Apesar da aparência de ficção científica, os argumentistas - os irmãos Nolan - trabalharam lado a lado com Kip Thorne, professor de Física Teórica em Caltech e um dos pais da Relatividade Geral moderna, a teoria que explica o que buracos negros e de minhoca são e como se podem formar no universo.

A missão do Kip Thorne foi a de assegurar que o filme – protagonizado por Matthew McConaughey e Anne Hathaway – não contivesse cenas que fizessem o Einstein ranger os dentes. Será que isto significa que dentro em breve vamos poder comprar bilhetes (de ida e volta!) para o interior de buracos negros? Bem, ainda não... mas em breve físicos e astrónomos vão poder estudá-los de uma forma nunca antes possível. Cientificamente, e com o devido respeito ao Sr. Nolan, o proveito vai ser largamente superior às receitas de bilheteira do *Interstellar*!

A teoria da Relatividade Geral de Einstein faz cem anos em 2015, mas ainda tem muito para nos dar.

De facto, as previsões mais fantásticas – como a existência de buracos negros e ondas gravitacionais – ainda não foram completamente confirmadas. Mas felizmente, detectores mais sofisticados e novas missões espaciais vão com certeza trazer-nos novidades nos próximos anos.

O que são ao certo ondas gravitacionais? E qual a relação que têm com buracos negros? Antes de respondermos a estas questões, vejamos o que a Relatividade Geral diz. A teoria da Relatividade Geral é, por várias razões, uma ideia revolucionária. O espaço-tempo nas outras interações fundamentais (como o electromagnetismo que governa a dinâmica entre fótons e electrões ou a interação forte que governa quarks dentro de prótons e neutrões) é apenas uma arena cujo único papel é especificar “onde” e “quando” a interação ocorre. A gravitação descreve a arena. Einstein compreendeu<sup>1</sup> que alguns princípios básicos forcem o espaço-tempo a ganhar vida: o espaço-tempo reage a qualquer forma de energia e deforma-se, como se fosse elástico. Neste aspecto, o espaço-tempo é parecido com um trampolim, onde a elasticidade permite que seja deformado facilmente, como na Fig. 1.

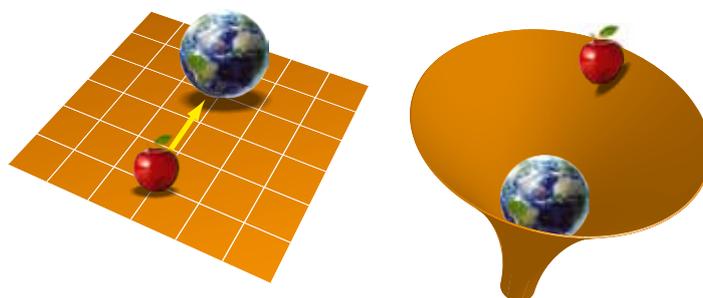


Fig. 1 - A gravidade na perspectiva de Newton e de Einstein. À esquerda, a maçã cai devido à força atractiva da Terra (visão Newtoniana). Esta força é descrita pela lei de Newton: proporcional à massa da maçã e da Terra e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas. À direita, a trajectória da maçã é deformada pela curvatura do espaço-tempo (visão Einsteiniana). A deformação depende da massa da Terra. O espaço é deformado, mas o tempo também o é: relógios andam em geral mais devagar ao pé da superfície do que longe dela.

<sup>1</sup> Uma das outras marcas de génio de Einstein foi o uso de *gedankenexperiments* - “experiências pensadas,” em alemão - para deduzir as equações relevantes a partir apenas de passos lógicos.

O espaço-tempo é então uma entidade dinâmica, tornando o conceito de forças – no qual a teoria de Newton se baseia – inútil. Segundo Einstein, a maçã de Newton não cai devido a uma força... na realidade, ela nem sequer “cai”! A massa da Terra curva o espaço-tempo e a maçã apenas “rola” livremente através dele como se estivesse acelerada. A grande descoberta de Einstein foi perceber a interação gravitacional em termos geométricos, introduzindo o conceito de *curvatura do espaço-tempo*.

Apesar destas visões radicalmente diferentes, a teoria de Einstein e a de Newton são difíceis de distinguir no dia-a-dia. Ao pé da superfície terrestre, o espaço-tempo é quase plano e as diferenças entre a Relatividade Geral e a teoria de Newton são praticamente inexistentes. No entanto, sem a teoria de Einstein o GPS não funciona! Contudo, corpos mais massivos do que a Terra – como o Sol, anãs brancas e estrelas de neutrões<sup>2</sup> – são tão compactos que a curvatura torna-se importante. Além do mais, a Relatividade Geral incorpora a outra grande descoberta de Einstein (encapsulada na relação  $E = mc^2$ ) segundo a qual massa e energia são duas faces da mesma moeda: a massa e qualquer outra forma de energia curvam o espaço-tempo. Por exemplo, para duas estrelas compactas em torno uma da outra com velocidades próximas da da luz, a contribuição da energia cinética é uma das maiores fontes de distorção do espaço-tempo.

O famoso físico John Wheeler uma vez disse: “A matéria diz ao espaço como se deve curvar, e o espaço diz à matéria como se deve mover”. Esta frase contém em si a Bela e o Monstro da Relatividade Geral. A elegância associada a uma descrição unificada e geométrica do espaço-tempo traz consigo uma enorme complexidade das equações, dado que agora o movimento dos corpos e a curvatura do espaço-tempo estão inextricavelmente ligados. Desta fusão emergem duas entidades, feitas unicamente de tecido espaço-temporal: buracos negros e ondas gravitacionais.

## Buracos negros

Nunca ninguém viu um buraco negro, e no entanto todos nós temos uma ideia do que é. Na realidade, a maioria de nós diria que é impossível ver um buraco negro... simplesmente por ser um buraco<sup>3</sup>!

Um buraco negro é uma região do espaço-tempo tão deformada que nenhum sinal é capaz de escapar do seu interior. A fronteira de um buraco negro chama-se *horizonte de eventos*. A razão é muito simples: como nem sequer a luz consegue sair, nunca podemos ver o que se passa lá dentro: “o que acontece dentro de um buraco negro, fica dentro do buraco negro”. Qualquer acontecimento ou evento que tenha lugar dentro do buraco negro está-nos vedado, isto é, está para lá do nosso horizonte e nunca saberemos nada sobre ele.

O conceito de buraco negro foi introduzido apenas na década de 1960, mas já no século XVIII o geólogo John Michell e o matemático Pierre-Simon Laplace tinham explorado independentemente a existência de “estrelas escuras” no âmbito da teoria de Newton. O raciocínio de Michell consiste em calcular a velocidade de escape de um corpo na superfície de uma estrela de massa  $M$  e raio  $R$ . O cálculo é simples e diz que a velocidade que o corpo tem de ter para conseguir escapar da atracção gravitacional da estrela é

$$V_{\text{esc}}^2 = GM/R \quad (1)$$

onde  $G$  é a constante de Newton. Existem assim estrelas onde a velocidade de escape é maior do que a da luz, e logo existem corpos dos quais a luz não consegue escapar. Estas estrelas parecem escuras para um observador! Como a luz se move a uma velocidade  $c$  (aproximadamente 300 mil quilómetros por segundo), a condição para o raio da estrela é

$$R_{\text{Schwarzschild}} = 2GM/c^2 \quad (2)$$

Curiosamente, apesar de este ser um cálculo newtoniano, o resultado coincide precisamente com o raio de um buraco negro na teoria de Einstein, e é chamado raio de Schwarzschild<sup>4</sup>. Resumindo e concluindo, se a nossa querida Terra fosse comprimida até ter um raio de 1 centímetro, transformar-se-ia um buraco negro.

Logo, parece impossível comprimir um objecto de tal forma que se venha a transformar num buraco negro. Contudo, a gravidade tem uma característica única que a torna predisposta a comprimir tudo: é *sempre atractiva*, e aumenta com a massa do corpo. Quando a matéria se acumula no centro de uma estrela grande e massiva, a força gravitacional aumenta, comprimindo ainda mais a matéria e começando um ciclo que pode ser de colapso indefinido. Muitas vezes, como no caso da Terra, a pressão à superfície é suficiente para contrariar a atracção gravítica e o corpo mantém-se em equilíbrio. Contudo, noutras situações em que a massa em questão é maior, não existe nenhum material que consiga sustentar o seu próprio peso. A situação é um pouco análoga a um castelo de cartas: quando um número crítico de cartas é atingido, o castelo simplesmente cai. Em estrelas, este processo é chamado colapso gravitacional. Em muitos casos, o que resta depois do fenómeno a que chamamos “explosão supernova” é precisamente um buraco negro.

<sup>2</sup> Estrelas de neutrões são as estrelas mais compactas que existem, formadas por neutrões. O que as impede de colapsar são forças quânticas, e por consequência têm densidades enormes. Por exemplo, uma colher de chá de material de uma estrela de neutrões pesa o equivalente a 900 pirâmides do Egipto!

<sup>3</sup> Felizmente, isto não é bem verdade. Existem algumas formas de “ver” um buraco negro, que não incluem ver o filme *Interstellar*, claro...

<sup>4</sup> A descoberta de Karl Schwarzschild tem uma história fascinante por trás: Schwarzschild encontrou esta famosa solução enquanto estava no exército alemão durante a Primeira Guerra Mundial, apenas uns meses depois de Einstein ter publicado a sua teoria. Infelizmente, Schwarzschild morreu no ano seguinte, devido a uma doença contraída enquanto estava na frente russa.

Uma explosão supernova é um dos acontecimentos mais luminosos no Universo. Durante a explosão, a estrela brilha mais que toda a galáxia. Esta é, claro, uma das razões pela qual conseguimos observar um grande número de supernovas mesmo quando elas explodem a milhões de anos-luz de nós<sup>5</sup> e é também a razão pela qual acreditamos que existem milhões de buracos negros na nossa galáxia.

No centro da Via Láctea está um buraco negro supermassivo. O estudo das órbitas de estrelas no centro da galáxia concluiu que elas se movem em torno de um objecto escuro com cerca de quatro milhões de massas solares. Nenhuma estrela estável consegue ter tanta massa. Décadas de esforços para encontrar explicações alternativas concluem sempre que a hipótese *mais conservadora* diz que o que está no centro da Via Láctea é um buraco negro (na realidade, a maioria das galáxias tem um buraco negro gigantesco no centro).

Apesar dos buracos negros não brilharem, eles falam – e falam bastante alto. Enquanto que outros objectos (como estrelas, planetas e até mesmo pessoas) podem ser vistos através da radiação electromagnética que emitem ou reflectem, os buracos negros são vistos através da radiação gravitacional.

### Ondas gravitacionais

A existência de ondas gravitacionais é fácil de entender na analogia da membrana elástica do trampolim da Fig. 1. Vemos na figura que se a esfera estiver parada, não acontece nada de especial. Mas se por alguma razão a bola for posta em movimento, são geradas *ondas* que se propagam com uma velocidade que depende do material da membrana elástica. Algo semelhante acontece quando um barco navega num lago, gerando ondas à superfície. Pois bem, as ondas gravitacionais são oscilações do próprio tecido do espaço-tempo, que transportam energia e são produzidas quando há movimento. Neste aspecto são parecidas com o som ou a luz, mas não as conseguimos ver nem ouvir. Contudo, podemos detectá-las: a passagem de uma destas ondas modifica a *distância* entre objectos e até mesmo o *tic-tac* dos relógios!

As ondas gravitacionais são uma *consequência necessária* de qualquer teoria relativista da gravidade, e não existem na teoria de Newton, onde a gravidade é uma interação instantânea. Vamos supor que o nosso Sol de repente desaparece. Segundo Newton, todos os planetas passariam imediatamente a sentir os efeitos deste desaparecimento: deixariam as órbitas elípticas e passariam para órbitas

rectilíneas. Contudo, a teoria da Relatividade Geral incorpora a relatividade restrita, que diz que nada se propaga mais rápido que a luz. Ora a luz leva cerca de oito minutos a viajar do Sol à Terra, portanto a Terra só pode sentir os efeitos deste desaparecimento pelo menos oito minutos depois dele acontecer. Os “mensageiros” que transportam esta informação são precisamente as ondas gravitacionais, e viajam à velocidade da luz. As partículas associadas com estas ondas são os *gravitões*, por analogia com os fotões que são a descrição corpuscular das ondas electromagnéticas.

As ondas gravitacionais produzidas por binários (par de estrelas em órbita mútua) de estrelas de neutrões e buracos negros são especialmente fortes. Para um binário de buracos negros, a energia perdida por segundo sob a forma de ondas gravitacionais pode atingir

$$L \sim 10^{52} \text{ watts} \quad (3)$$

Este número é impossivelmente grande e o binário brilha mais que todo o Universo!

O que acabámos dizer é surpreendente, especialmente se tivermos em conta que cem anos depois da sua previsão teórica, as ondas gravitacionais ainda não foram observadas. A razão para este aparente paradoxo é simples: apesar de extremamente poderosos, estes eventos catastróficos e energéticos ocorrem (felizmente para a vida na Terra) muito longe de nós, pelo que a energia que libertam é espalhada por uma grande porção do universo. Além disso, as ondas gravitacionais interagem muito pouco com a matéria, o que torna a sua detecção na Terra um problema delicado mas fascinante.

Por outro lado, a fraca interação é muito importante, pois significa que estas ondas conseguem viajar milhares ou milhões de anos-luz até nós, sem se deixarem perturbar nem amortecer por nada: a informação que transportam sobre buracos negros ou estrelas de neutrões, etc., chega até nós de forma pura, incorrupta. Mas não há bela sem senão: sendo extremamente difícil fazê-las interagir com um detector, é igualmente difícil (mas não impossível) detectá-las.

### Propriedade das ondas gravitacionais

Imaginem que têm um aro na mão, e que de repente uma onda gravitacional passa por vocês. Seria possível reparar na sua passagem? Provavelmente não, porque os efeitos da onda no aro seriam extremamente pequenos<sup>6</sup>. Mas esqueçam por um momento que este efeito é pequeno. Utilizando uma lupa, o que veriam está ilustrado na Fig. 2, onde o tempo evolui no eixo horizontal. Existem duas formas diferentes da onda deformar o aro: ou veriam o aro a oscilar na forma de um + ou de um x. Estas são as chamadas *polarizações* das ondas gravitacionais<sup>7</sup>.

<sup>5</sup> Uma supernova famosa é a SN 1006, que foi vista da Terra em 1006. Pela sua magnitude aparente, é considerada o evento mais luminoso de que há registo. Curiosamente, a Estrela de Belém – que terá revelado aos Magos onde Jesus tinha nascido – era de facto uma supernova, segundo algumas teorias.

<sup>6</sup> Se virem alguma coisa, o mais provável é ser um tremor de terra, por isso parem de ler isto e escondam-se num local seguro.

<sup>7</sup> Em geral a onda não está polarizada e o que veriam é uma combinação de ambas as polarizações.

Para meter isto em números e ver qual seria a deformação do aro, considerem que este tem um diâmetro dado por  $L$  e que a onda tem uma amplitude  $h$ . Devido à interacção do aro com a onda, o seu diâmetro sofre uma pequena variação  $\Delta L$  de tal forma que

$$\Delta L/L = h \quad (4)$$

Facilmente se vê a partir desta equação que quanto maior for a amplitude da onda  $h$ , maior é a deformação  $\Delta L$  que o aro sofre. Para um aro com  $L = 1$  m e uma onda gravitacio-

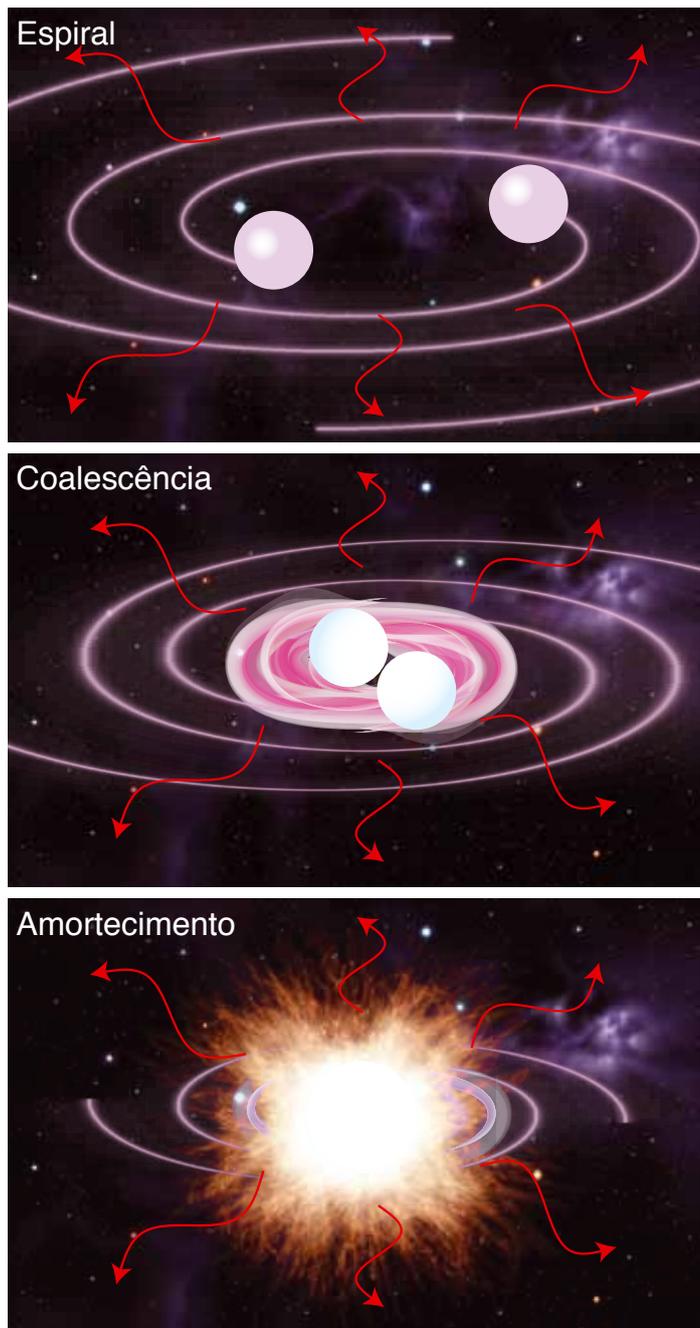


Fig. 3 - As três fases da vida de um binário de buracos negros ou estrelas de neutrões. Na fase "Espiral" os corpos orbitam a uma grande distância um do outro em órbitas (quase) de Kepler, emitindo ondas gravitacionais e lentamente espiralando, isto é, aproximando-se um do outro. Na segunda fase, de "coalescência", já perderam tanta energia que colidem um com o outro formando finalmente um único objecto - em geral um buraco negro - que está altamente deformado e vai emitir ondas gravitacionais até atingir o estado final estacionário ("fase de amortecimento"), tal como um sino quando é tocado.

nal com  $h = 0,001$ , o aro sofre uma deformação da ordem de  $\Delta L = 1$  mm. Na realidade,  $h$  mede a forma como as trajectórias de diferentes pontos do aro são afectadas pela curvatura do espaço-tempo. De facto,  $h = 0,001$  já é uma deformação muito grande, e se ondas gravitacionais com estas amplitudes fossem comuns, poderíamos observar estes efeitos a olho nu. Infelizmente, como discutiremos de seguida, mesmo para fontes extremamente energéticas,  $h$  é extremamente pequeno. Esta é uma das razões pelas quais a detecção de ondas gravitacionais é tão difícil.

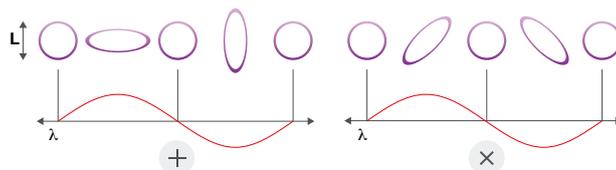


Fig. 2 - Deformação de um aro quando uma onda gravitacional atravessa o plano do papel. Existem dois tipos de "polarizações": do tipo + representada à esquerda e a do tipo x à direita. Estas duas polarizações são consequência do gravitão não ter massa, tal como os fótons. Se o gravitão fosse massivo, existiriam cinco polarizações.

### Fontes de ondas gravitacionais

As ondas gravitacionais são geradas pelo movimento dos corpos. A intensidade destas ondas é tipicamente dependente da fonte (tal como a intensidade de ondas electromagnéticas depende da antenna que as gera). Por exemplo, a amplitude típica de ondas gravitacionais emitidas por dois objectos com massas idênticas  $M$ , numa órbita circular em torno um do outro a uma distância  $r$ , é dada por

$$h \sim G^2 M^2 / (c^4 r D) \quad (5)$$

onde  $D$  é a distância ao observador. Esta fórmula diz-nos algo bastante familiar acerca do nosso dia-a-dia: quanto mais longe estivermos da fonte, menor é a intensidade da onda que detectamos<sup>8</sup>.

Mas se queremos detectar ondas gravitacionais, porque não construir uma fonte altamente energética aqui na Terra? Imaginem uma fonte constituída por dois pesos de uma tonelada cada, a um metro de distância um do outro, e em movimento circular com uma frequência de rotação de 1000 vezes por segundo. Se construirmos um detector a 300 quilómetros de distância, observaríamos hipoteticamente ondas com uma amplitude  $h \sim 10^{-39}$ . Não existe nenhum detector imaginável capaz de observar ondas com amplitudes tão pequenas! De facto, não há muito que se possa fazer aqui na Terra. À semelhança dos primeiros astrónomos, temos de olhar novamente para os céus na esperança de descobrir uma fonte poderosa.

<sup>8</sup> Liguem a vossa TV e tentem medir a intensidade do som em função da distância, enquanto se afastam dela. Num cenário perfeito, onde o som não se dissipa, achariam a mesma relação  $1/D$ .

## Sistemas binários de buracos negros e estrelas de neutrões

A radiação gravitacional mais intensa é produzida por binários de buracos negros e estrelas de neutrões, já que são extremamente compactos e podem mover-se a grandes velocidades (c.f. Eq. 5). Quando dois buracos negros colidem, a distância  $r$  entre eles é da ordem do seu raio de Schwarzschild. Neste caso, para um buraco negro com 1000 massas solares<sup>9</sup> a amplitude da onda gravitacional a uma distância  $D$  é  $h \sim 10^4 \text{ km}/D$ . Portanto, a 400 mil quilómetros de distância (que corresponde aproximadamente à distância Terra-Lua) teríamos  $h \sim 0,001$  e o aro de um observador iria encolher e dilatar por cerca de um milímetro! Isto aconteceria também na nossa Terra se a Lua fosse substituída por um binário de buracos negros. Este é claramente um exemplo pouco realista. Se estivéssemos a 1 megaparsec<sup>10</sup> de distância do sistema, a amplitude seria apenas de  $h \sim 10^{-17}$ . Este número é extremamente pequeno: é possível que uma onda com esta amplitude esteja a atravessar-nos sem que sintamos nada.

Uma solução para este problema é procurar os efeitos *indirectos* da emissão de ondas. Como as ondas gravitacionais transportam energia, então o sistema está a perder energia. Assim, para a energia se conservar, o binário de buracos negros ou estrelas tem de se aproximar com o tempo, isto é, o período orbital diminui à medida que o tempo passa. Portanto, mesmo sem detectarmos directamente as ondas na Terra, podemos ver o seu efeito no sistema que as está a radiar, medindo basicamente o período orbital do sistema.

Foi exactamente isto que Hulse e Taylor fizeram, analisando o pulsar PSR 1913+16<sup>11</sup> durante duas décadas (começando em 1974). Este pulsar orbita em torno de uma outra estrela de neutrões. As medições de Hulse and Taylor mostraram que o período orbital diminuía com o tempo, e que esta diminuição estava de acordo com as previsões da Relatividade Geral para a emissão de ondas gravitacionais. O seu trabalho foi recompensado com o Nobel da Física em 1993, e é para a comunidade científica em geral a prova de que as ondas gravitacionais existem.

A relevância de ondas gravitacionais em astronomia deve-se em grande parte à capacidade única que estas ondas tem de transportar informação vinda do núcleo das estrelas. Hoje em dia sabemos com uma precisão incrível como é que um binário de estrelas gera ondas gravitacionais. Como já foi dito,

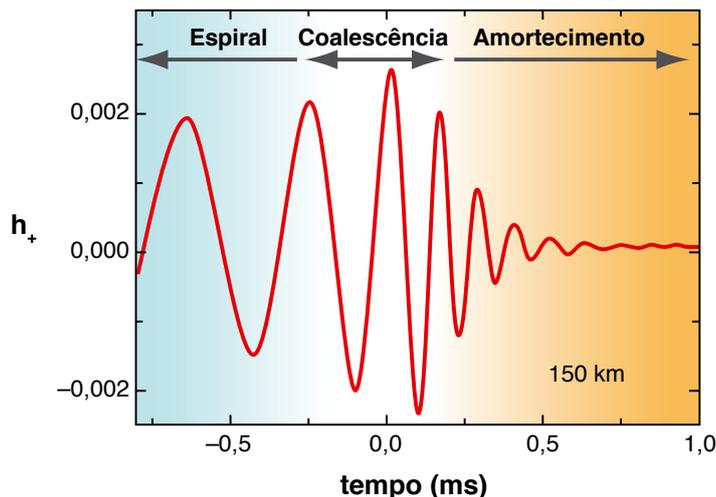


Fig. 4 - Onda gravitacional emitida por um sistema de dois buracos negros imediatamente antes e depois de chocarem. A última fase (quando a amplitude vai para zero) corresponde à formação de um único buraco negro final. A onda é vista segundo o plano orbital, a uma distância de 150 km (a amplitude decresce com  $1/D$ , pelo que a 1500 km de distância será 10 vezes menor). A esta distância, uma pessoa de 2 metros seria esticada ou comprimida em 3 mm com o passar da onda.

o sistema vai perdendo energia sob a forma de radiação gravitacional, o que faz com que os dois corpos espiralem lentamente em direcção um ao outro. Eventualmente colidem, formando um único objecto. As estrelas de neutrões que Hulse e Taylor observaram vão colidir dentro de aproximadamente 240 milhões de anos. Este processo tem três fases distintas, ilustradas na Figura 3. As características das ondas e do binário nestas três fases são muito diferentes, tal como se pode ver na Figura 4.

Este eventos são os processos mais poderosos do Universo. Para um sistema de dois buracos negros com mil massas solares cada, as últimas dez órbitas antes da colisão duram apenas 10 ms. Se fossemos capazes de observar este sistema a uma distância de 150 km seríamos esticados ou comprimidos em 3 mm com o passar da onda (infelizmente, sistemas deste tipo estão a anos-luz de distância de nós). Além disso, a energia transportada pela onda corresponde à equivalente a 100 mil vezes a massa da Terra. Esta luminosidade é gigantesca, muito maior do que a luminosidade do Universo inteiro que actualmente observamos!

## Ondas gravitacionais primordiais

As ondas gravitacionais são o mensageiro ideal para transportar informação vinda do início do Universo, há cerca de 14 mil milhões de anos. Em Março de 2014, a colaboração BICEP (com um telescópio no Pólo Sul) anunciou a primeira detecção de ondas gravitacionais produzidas durante os primeiros<sup>12</sup> tempos de vida do Universo. A experiência mediu a polarização da radiação cósmica de fundo, a relíquia da radiação térmica do Big Bang. Devido ao efeito representado na Figura 2, as ondas gravitacionais causam um efeito

<sup>9</sup> Os astrónomos já observaram buracos negros com mais de mil milhões de massas solares.

<sup>10</sup> Um megaparsec equivale a 300 mil anos-luz ou  $3 \times 10^{22}$  metros.

<sup>11</sup> Um pulsar é uma estrela de neutrões em rotação e que emite feixes de luz. Uma vez que apenas os vemos quando o feixe está na nossa linha de visão, o que observamos é uma série de pulsos de luz, daí o nome destes objectos.

<sup>12</sup> Cerca de 0,000 000 000 000 000 000 000 000 001 segundos depois do Big Bang.

peculiar nestes fotões, sob a forma de “remoinhos” (chamados modos-B) nos mapas de polarização da radiação cósmica de fundo. Se o resultado anunciado pela colaboração estivesse correcto, representaria um marco na história da ciência por várias razões.

Em primeiro lugar, as ondas gravitacionais primordiais são produzidas por flutuações quânticas no início do Universo e são extremamente fracas. Contudo, um mecanismo chamado *inflação cosmológica* pode amplificá-las e torná-las detectáveis. A inflação prevê que houve uma transição de fase no Universo imediatamente após o Big Bang, em que o Universo se expandiu exponencialmente durante um tempo muito curto ( $10^{-32}$  segundo) amplificando qualquer pequena flutuação até a tornar detectável nos dias de hoje<sup>13</sup>. Assim, a detecção de ondas gravitacionais primordiais vindas do Big Bang seria também automaticamente uma prova da existência da inflação, algo de que se está à procura há várias décadas.

Em segundo lugar, esta detecção seria, claro, uma segunda confirmação independente da própria existência de ondas gravitacionais. Finalmente, a teoria clássica da Relatividade Geral e a inflação não chegam para explicar o que o BICEP 2 detectou: o mecanismo de produção das flutuações que originaram as ondas gravitacionais tem origem quântica. A escala de energia destes efeitos (cerca de  $10^{25}$  electrón-volts) é muito maior do que a disponível em aceleradores de partículas, actuais ou futuros. Assim, a detecção destas ondas seria também uma confirmação da natureza quântica da gravitação, o Santo Graal de toda a física teórica das últimas décadas!

Os resultados do BICEP 2, a confirmarem-se, seriam extraordinários por tudo o que representam para a física teórica, a astrofísica e a cosmologia. Por essa razão, foram escurupulosos e meticulosamente verificados. Duas das maiores experiências – PLANCK e BICEP – uniram esforços para analisar os dados em conjunto e mostraram que o anúncio da descoberta foi precipitado (uma parte do efeito era causado por poeira interestelar). É assim que a ciência funciona: tudo tem que ser escrutinado, verificado e reproduzido. Para já, portanto, ondas gravitacionais ainda não foram medidas.

### Detectores de ondas gravitacionais

Como as fontes mais fortes estão tão longe de nós, a amplitude das ondas gravitacionais quando chegam à Terra é muito pequena, cerca de  $h \sim 10^{-21}$ . Portanto, quando uma onda passa, um aro de raio igual à distância Terra-Sol oscila com uma amplitude que é uma fracção do raio atómico!

Mesmo parecendo impossível, existem detectores capazes de medir essa variação. Estes instrumentos usam os princípios da interferometria para medir a diferença entre dois comprimentos. De uma forma simplista, os detectores são compostos por dois “braços” perpendiculares (tipica-

mente com alguns quilómetros cada) e percorridos por um feixe laser. Graças a uma série de espelhos, os feixes laser são depois obrigados a interferir, e a partir do padrão de interferências pode-se medir muito precisamente a diferença relativa no comprimento de cada braço. Como os braços são perpendiculares, uma onda gravitacional como a da Figura 2 faz os braços variarem de comprimento de forma diferente, podendo assim ser detectada.

Os detectores de ondas gravitacionais *funcionam*. Neste momento existem dois grandes instrumentos nos Estados Unidos (LIGO), um em Itália (Virgo), um na Alemanha (GEO) e um no Japão (TAMA). O Virgo e o LIGO estão neste momento na “mesa de operações” para se tornarem dez vezes mais eficientes e estarão operacionais em 2016-2018. Nessa altura, espera-se que detectem ondas gravitacionais várias vezes por ano. Entretanto, um novo detector (KAGRA) está a ser construído no Japão, e existem estudos para a construção de um outro ainda mais avançado, o chamado Einstein Telescope.

Finalmente, existem também planos para o espaço. Uma versão actualizada de um detector gigantesco no espaço (eLISA) foi aprovado pela Agência Espacial Europeia, e espera-se que esteja a funcionar na década de 2030. Este detector será especialmente sensível a ondas de baixa frequência, como as emitidas por buracos negros gigantes (como aquele que existe no centro da Via Láctea).

### Astronomia de ondas gravitacionais: uma nova janela para o Universo

Dentro em breve, o conjunto de detectores de ondas gravitacionais irão permitir-nos ver o universo de uma forma completamente diferente, complementando a informação que já temos no espectro electromagnético... e quiçá observando coisas nunca esperadas nem previstas. Este esforço, a uma escala global, é impulsionado pelo enorme potencial da astronomia de ondas gravitacionais: a fraca interacção com a matéria, faz com que a informação que estas ondas transportam – sobre o núcleo das estrelas de neutrões e sobre buracos negros onde foram produzidas – não seja corrompida por poeira estelar nem por nenhum outro obstáculo; chegam até nós limpas e puras, tal como foram criadas no interior de estrelas de neutrões, buracos negros ou mesmo durante o nascimento do universo. Toda esta informação (e muito mais!) ficará assim acessível a observadores na Terra.

Por último, a detecção de ondas gravitacionais vai permitir testar a teoria de Einstein, em regimes até agora nunca estudados. Por exemplo, se descobrirmos que as ondas gravitacionais não deformam os corpos como na Figura 2, isto significa que a Relatividade Geral terá de ser revista, e que afinal Einstein não estava totalmente correcto.

<sup>13</sup> O modelo inflacionário foi bem sucedido porque explica outras características do Universo, como o facto de ser plano, homogéneo e isotrópico. Na prática, a inflação é um mecanismo dinâmico a partir do qual o Universo emerge como isotrópico e homogéneo a partir de condições iniciais genéricas.

A humanidade assemelha-se neste momento aos prisioneiros da *Alegoria da Caverna* de Platão, vendo apenas as “sombras electromagnéticas” do Universo gravitacional; a “verdadeira forma” – aquela dada a conhecer sob a forma de ondas gravitacionais – tem estado perdida no espaço. Como num pesadelo, o Universo está constantemente a falar e a gritar, mas nós apenas vemos a sua boca a abrir, sem conseguirmos ouvir o seu som. O que é que o universo nos está a dizer? Seja o que for, representará um grande salto na forma como o entendemos. Continuem à escuta...

*Por decisão pessoal, o autor do texto não escreve segundo o novo Acordo Ortográfico.*



**Richard Brito** é um estudante de Doutoramento no grupo de gravitação do CENTRA-IST com uma bolsa da FCTIDPASC. Obteve o Mestrado em Engenharia Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico (IST) em 2012.

Durante o seu Doutoramento pretende investigar possíveis candidatos para matéria escura e teorias alternativas da gravidade baseado na dinâmica de objectos compactos. Os seus interesses de investigação incluem física de buracos negros, ondas gravitacionais e testes de gravidade forte.



**Vitor Cardoso** é Professor Auxiliar “Com Agregação” no Departamento de Física do IST, e investigador do CENTRA-IST. É *Adjunct Professor* no Mississippi e *Visiting Fellow* do Perimeter Institute. Fez o doutoramento no CENTRA-IST, e trabalhos de pós-

doutoramento em Coimbra, Wash-U (St. Louis) e Mississippi. Foi *Fulbright Fellow*, e foi distinguido pelo European Research Council por duas vezes, com uma *Starting Grant* e uma *Consolidator Grant*. Os seus interesses de investigação incluem física de buracos negros, ondas gravitacionais e Gravitação e Física de Altas Energias em geral. Tem mais de 130 artigos publicados.



**Paolo Pani** é um Investigador FCT no grupo de gravitação do CENTRA-IST. Obteve o doutoramento na Universidade de Cagliari, Itália, e mudou-se para Portugal em 2011, com uma bolsa de investigação Marie Curie. Colabora com vários institutos

de renome, entre os quais o Centro Harvard-Smithsonian de Astrofísica e a Universidade “Sapienza” em Roma. Os seus interesses de investigação são a física de buracos negros e das estrelas de neutrões, testes de gravidade forte, ondas gravitacionais, e a interacção entre matéria escura e objetos compactos.



## Física do filme *Interstellar*

Pedro V. P. da Cunha

Dep. Física, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, R. Larga, 3004-535 Coimbra

cunhapcc@gmail.com

### Resumo

O filme *Interstellar*, que estreou recentemente nos cinemas, fascinou o público com imagens de buracos negros, *wormholes*, planetas extraterrestres e alguma física muito estranha como ondas gigantes e uma forte dilatação do tempo. Serão todos estes fenómenos pura ficção ou têm algum fundamento científico? Este artigo tem como objectivo discutir alguns destes temas, concluindo-se que há mais ciência envolvida no filme do que à partida seria de esperar.

### Introdução

O filme de ficção científica de título *Interstellar* [1] retrata um futuro não muito longínquo do presente, no qual a civilização humana está à beira do colapso. Devido à propagação incontrolável de pestes agrícolas, há uma grande escassez de alimentos e alterações na composição da atmosfera, ameaçando levar a humanidade à extinção dentro de poucas gerações. Neste contexto, é organizada uma viagem interplanetária em busca de um planeta potencialmente habitável e no qual seja possível reconstruir a civilização. Fazendo uso de um misterioso *wormhole* que surgiu no sistema solar, e que constitui um portal para outra galáxia, a expedição viaja até um sistema planetário com vários candidatos, circundando um buraco negro supermassivo denominado *Gargantua*. Um dos planetas visitados, o planeta de Miller, possui muita água no estado líquido e orbita muito perto do buraco negro. Neste planeta os astronautas observam efeitos curiosos de gravitação, como ondas gigantes, e fenómenos de Relatividade Geral, como grandes dilatações do tempo (uma hora no planeta corresponde a sete anos na Terra).

Tendo em conta que o revisor científico do filme é Kip Thorne, uma das maiores referências internacionais na área da

gravitação, é interessante questionar até que ponto estes fenómenos estão retratados de forma verosímil e científica. Parte deste artigo é aliás fortemente baseado num livro da sua autoria [2], no qual é discutida também a forma como o buraco negro e o *wormhole* foram representados graficamente, com um rigor científico inédito no cinema. No entanto, nem tudo no filme é rigoroso, nomeadamente a parte final após um dos astronautas entrar em *Gargantua*, que é extremamente especulativa [2]. O livro é fortemente recomendado a leitores que procurem uma discussão científica mais completa dos fenómenos do filme. Contudo, este é muito pouco explícito em termos de cálculos matemáticos, sendo pertinente discutir alguns aspectos do filme em mais detalhe.

### *Gargantua*

Em Relatividade Geral a gravidade é descrita como uma consequência da geometria do espaço-tempo, sendo a mesma alterada pela matéria no Universo. Para um buraco negro como *Gargantua* a geometria deverá ser bem descrita pelo espaço-tempo de Kerr [3], solução das equações de campo de Einstein para um buraco negro com rotação. Este espaço-tempo depende de dois parâmetros:  $m = GM/c^2$  e  $a = J/(Mc)$ , em que  $G$  é a constante de gravitação universal,  $c$  é a velocidade da luz no vazio,  $M$  é a massa de *Gargantua* e  $J$  é o momento angular deste. O parâmetro  $a$ , também chamado de rotação, tem de satisfazer a condição:

$$a^2 \leq m^2, \quad (1)$$

ou seja, o buraco negro tem um rotação máxima

permitida. Uma possível interpretação heurística para esta restrição é o facto de as forças centrífugas não poderem superar a atracção gravitacional do buraco negro. Para o caso limite em que a rotação é máxima, os buracos negros são chamados de extremos e concluiu-se curiosamente que *Gargantua* tem de se encontrar praticamente nesse limite de forma a satisfazer a dilatação do tempo mencionada no filme (ver final do artigo).

Um aspecto peculiar deste espaço-tempo é o acoplamento entre a coordenada temporal e a angular, chamado de *frame dragging*. Este é um desvio angular no sentido de rotação do buraco negro, sofrido por um referencial relativamente a observadores no infinito, induzido pela própria curvatura do espaço-tempo. Isto significa que mesmo um observador com zero momento angular é desviado angularmente, consequência da rotação intrínseca do espaço-tempo.

Uma analogia para este efeito é o movimento de uma folha na superfície de um lago com um movimento em espiral ao entrar num buraco de escoamento. Mesmo se localmente a folha não tiver movimento relativamente à superfície de água, um observador na margem irá observar uma rotação da folha induzida pela circulação da água.

### Forças de maré

Como a atracção gravitacional é dependente da distância, a “face” do planeta de Miller voltada para *Gargantua* sofre uma maior atracção que a parte posterior. Estas variações do campo gravítico ao longo do planeta dão origem a forças de maré e zonas promotoras de maré alta e baixa, tal como no planeta Terra. Estas regiões dependem à partida apenas da orientação entre o planeta de Miller e *Gargantua* e portanto deverão estar fixas relativamente a este último. Na Relatividade Geral as forças de maré estão associadas à aceleração do desvio geodésico  $S^{\hat{a}}$  num referencial local ortonormado [4], e são proporcionais à curvatura do espaço-tempo, contemplada no tensor de Riemann  $\mathcal{R}^{\hat{a}}_{\hat{\tau}\hat{\tau}\hat{b}}$ :

$$\frac{D^2 S^{\hat{a}}}{d\tau^2} = \mathcal{R}^{\hat{a}}_{\hat{\tau}\hat{\tau}\hat{b}} S^{\hat{b}}. \quad (2)$$

Explicitamente no equador do buraco negro obtemos curiosamente o mesmo resultado obtido pelas leis de Newton [5], se tomarmos  $R$  como a distância do observador a um buraco negro de massa  $M$ :

$$\frac{D^2 S^{\hat{r}}}{d\tau^2} = \frac{2GM}{R^3} S^{\hat{r}}, \quad (3)$$

$$\frac{D^2 S^{\hat{\theta}}}{d\tau^2} = -\frac{GM}{R^3} S^{\hat{\theta}}. \quad (4)$$

Estas equações traduzem respectivamente as forças de maré ao longo da direcção longitudinal a *Gargantua* e a uma direcção perpendicular a esta.

### Órbita do planeta de Miller

No filme o planeta de Miller encontra-se muito perto de *Gargantua*, orbitando o buraco negro a quase metade da velocidade da luz no plano equatorial. A órbita é praticamente coincidente com o horizonte de eventos [2], um ponto sem retorno que define para todos os efeitos a fronteira do buraco negro. Temos portanto que  $R \approx GM/c^2$ , para um buraco negro quase extremo. Para esse género de buracos negros há órbitas estáveis praticamente até ao horizonte [6], não havendo portanto o risco de o planeta cair no buraco negro à mínima perturbação na trajectória.

Devido às enormes forças de maré de *Gargantua*, o planeta de Miller deverá ter uma forma deformada, quase elipsoidal. Se o planeta não tivesse sempre a mesma “face” voltada para o buraco negro haveria tremendas compressões e distensões devido a essas forças. O atrito provocado por tais deformações levaria a um vulcanismo extremo e o planeta seria de rocha fundida, algo que os astronautas não observam. No entanto, para o planeta ter a mesma face voltada para *Gargantua*, e como orbita a velocidades próximas da luz, teria de ter uma rotação relativista que à partida despedaçaria o planeta com forças centrífugas. Contudo, devido ao enorme *frame dragging* perto do horizonte de eventos, localmente o planeta praticamente não roda relativamente ao próprio espaço-tempo e as forças centrífugas deverão ser na verdade muito pequenas.

### Estabilidade estrutural do planeta de Miller

A condição necessária para que o planeta não seja desfeito pelas enormes forças de maré do buraco negro é que a sua própria gravidade  $g_o$  tem que ser grande o suficiente para manter o planeta unido. Claramente temos que ter que à superfície do planeta de raio  $r$  e massa  $m_o$ :

$$\frac{2GMr}{R^3} < \frac{Gm_o}{r^2}. \quad (5)$$

Assumindo uma densidade  $\rho_o = 5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  igual à da Terra obtemos

$$M > \frac{c^3}{\sqrt{\frac{2}{3}\pi\rho_o G^3}} \approx 242,18 \text{ milhões de } M_{\odot}. \quad (6)$$

Ou seja, para ter forças de maré suficientemente “suaves”, é necessário que  $M$  seja maior que uma massa crítica  $M_{\text{crítica}}$  e que o buraco negro seja supermassivo, milhões de vezes a massa do Sol  $M_{\odot}$ , um resultado bastante contra-intuitivo! Nos cálculos seguintes, o valor assumido para a massa foi de  $M = 242,28$  milhões de  $M_{\odot}$ , um valor próximo mas não igual ao da massa crítica (por razões explicadas mais à frente). Em termos de comparação, a massa do buraco negro no centro da nossa galáxia é superior a 4 milhões de massas solares, e o da galáxia de Andrómeda

(a galáxia mais perto da nossa) tem uma massa de cerca de 230 milhões de massas solares. Existem também galáxias com buracos negros muito mais massivos e portanto o valor assumido para  $M$ , é aceitável.

## Oscilações

A configuração estável do planeta de Miller é ter sempre a mesma “face” voltada para *Gargantua*. Devido à assimetria do planeta, algo que pode ocorrer são oscilações sobre essa posição de equilíbrio, uma vez que as forças de maré funcionam como forças restauradoras (ver Figura 1). O sistema é portanto semelhante a um pêndulo físico sujeito a um campo de acelerações  $g_{\text{tidal}} = 2GMr/R^3$ . Contudo esta abordagem só deverá ser válida em primeira aproximação e não constitui um cálculo rigoroso. Uma vez que a massa de água à superfície do planeta está fixa relativamente a *Gargantua*, um observador no planeta irá observar ondas com o período das oscilações:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{m_o r g_{\text{tidal}}}} \quad (7)$$

Aproximando o momento de inércia  $J$  do planeta ao de uma esfera obtemos

$$T = \frac{2\pi GM}{\sqrt{5}c^3} \sim 1 \text{ h.} \quad (8)$$

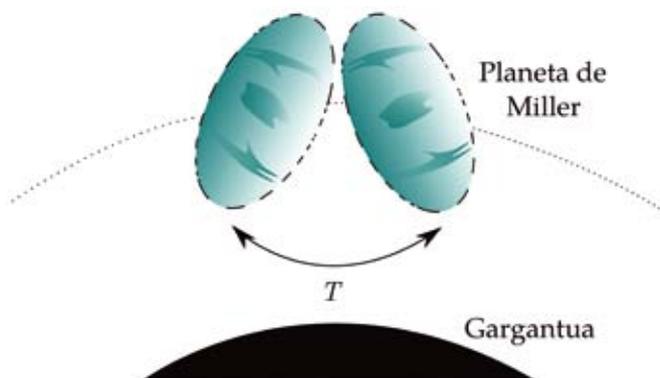


Fig. 1 - Oscilação do planeta de Miller sobre posição de equilíbrio com período  $T$ .

Isto é, obtemos um período entre ondas da ordem de uma hora. Tal está consistente com o intervalo de tempo que os astronautas observam no filme!

## Altura das ondas

Se designarmos a região (1) como de maré alta e a região (2) como de maré baixa (ver Figura 2), a gravidade efectiva é

$$g'_1 = g_o - g_1 = \frac{Gm_o}{r^2} - \frac{2GMr}{R^3} \quad (9)$$

$$g'_2 = g_o - g_2 = \frac{Gm_o}{r^2} + \frac{GMr}{R^3} \quad (10)$$

Assumindo que a massa de água à superfície do planeta de Miller, fixa relativamente a *Gargantua*, encontra-se em equilíbrio hidrostático, é possível estimar a altura das ondas observadas:

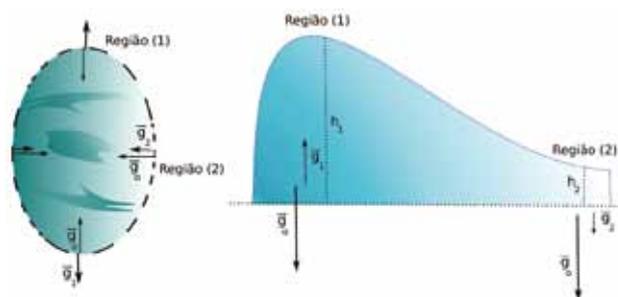


Fig. 2 - Ondas de maré no planeta de Miller.

$$\rho g'_1 h_1 = \rho g'_2 h_2. \quad (11)$$

Assumindo que  $h_2 \sim 0,5$  m (no filme os astronautas tinham a água pelo joelho) e combinando as expressões (9) a (11), obtemos para a diferença de altura

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \frac{9h_2}{\frac{4\pi\rho_o G^3 M^2}{c^6} - 6} \approx 871 \text{ m.} \quad (12)$$

Esta é praticamente a altura da torre Burj Khalifa no Dubai, que detém o recorde mundial de torre mais alta do mundo! As ondas de maré deverão ser monstruosas, tal como é sugerido no filme. Contudo para ter ondas tão altas são necessárias condições especiais: as forças de maré deverão estar praticamente no limite em que quase superam a gravidade do próprio planeta:  $g_o \approx g_1$  (ou seja  $M_i \sim M_{i, \text{critica}}$ ) e portanto  $g'_1 \ll 1$  e  $h_1 \gg 1$ . Note-se que o valor de  $\Delta h$  depende fortemente da massa  $M_i$ , uma vez que no limite em que  $M_i$  se aproxima da massa crítica  $M_i \rightarrow M_{i, \text{critica}}$  temos que  $\Delta h \rightarrow \infty$ . A massa assumida nos cálculos  $M_i = 242,28$  milhões de  $M_\odot$  é próxima do valor crítico, não sendo contudo igual a esta para evitar a divergência. Usaram-se os seguintes valores para as constantes:  $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  e  $M_\odot = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$ .

## Dilatação do tempo

Um dos fenómenos mais interessantes mencionados no filme é a dilatação do tempo, ou seja, o ritmo deste não é necessariamente igual para todos os observadores. Nomeadamente, o intervalo de tempo  $\Delta t_o$  medido em regiões do espaço-tempo com campos gravíticos muito intensos, como perto de buracos negros, é menor relativamente ao intervalo  $\Delta t_\infty$  medido por um observador na Terra. No filme, uma hora no planeta de Miller equivale a sete anos na Terra, tendo este efeito consequências pessoais dramáticas para os astronautas.

De forma a ter a dilatação pretendida temos que ter o factor de *red-shift*  $S$  igual a:

$$S = \frac{\Delta t_o}{\Delta t_\infty} = \frac{1 \text{ h}}{7 \text{ anos}} = \frac{1}{61362} \quad (13)$$

O cálculo exato da energia  $E_o$  medida no planeta de Miller de um fóton proveniente do infinito com energia  $E_\infty$  (sem momento angular orbital) é dada por:

$$E_o = \frac{(g_{\varphi\varphi} + 2g_{t\varphi})E_\infty}{\sqrt{(g_{t\varphi}^2 - g_{tt}g_{\varphi\varphi})(4g_{tt} + 4g_{t\varphi} + g_{\varphi\varphi})}} \quad (14)$$

em que  $g_{\mu\nu}$  são os elementos da métrica de Kerr nas coordenadas de Boyer-Lindquist [3]. Como a energia do fóton é proporcional à frequência, pode relacionar-se os intervalos de tempo entre os referenciais:

$$\frac{E_o}{E_\infty} = \frac{\Delta t_o}{\Delta t_\infty} = s. \quad (15)$$

Assume-se que a rotação do buraco negro é muito próxima do máximo, nomeadamente

$$|a| = m(1 - \alpha), \quad \text{com } \alpha \ll 1. \quad (16)$$

Fazendo uma expansão em série de Taylor de  $S(\alpha)$  obtemos

$$s = \left(\frac{3\sqrt{3}\alpha}{16}\right)^{1/3}, \quad (17)$$

e portanto

$$S = \frac{1 \text{ h}}{7 \text{ anos}} \Rightarrow \alpha \sim 10^{-14}, \quad (18)$$

de forma a que o buraco negro teria que ter praticamente rotação máxima (a diferença para o máximo é cerca de um centésimo de um bilionésimo)! Em termos astrofísicos não deverá ser provável encontrar rotações maiores que 99,8% do máximo, uma vez que a partir deste ponto o buraco negro cria muita resistência a aumentar ainda mais a sua rotação. Conclui-se assim que uma hora no planeta de Miller para sete anos na Terra é **possível** mas improvável.

## Conclusões

A altura das ondas de cerca de 871 m no planeta de Miller é explicável devido às incríveis forças de maré de *Gargantua*. O intervalo de tempo de uma hora entre cada onda está também de acordo com o que é retratado no filme. A enorme dilatação do tempo de uma hora para sete anos é também possível conceptualmente mas muito improvável de obter na prática, uma vez que é necessário que o buraco negro tenha rotação quase máxima. Assim, apesar da parte final ser fantasiosa, há diversos aspectos no filme que são mais verosímeis do que à partida seria de esperar.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao meu amigo Maurício Moreira Soares pela ajuda na concepção das figuras e ao meu orientador de mestrado o Prof. Carlos Herdeiro pelas valiosas discussões e sugestões. Eventuais imprecisões são porém da minha responsabilidade.

## Referências

1. C. Nolan, *Interstellar*. Paramount Pictures and Warner Bros. Pictures, 2014.
2. K. Thorne, *The Science of Interstellar*. WW Norton & Company, 2014.
3. J. Hartle, *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. Pearson Education, Limited, 2013.
4. C. Misner, K. Thorne, e J. Wheeler, *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.
5. M. Visser, "The Kerr spacetime: A brief introduction," arXiv preprint arXiv:0706.0622 (2007).
6. D. C. Wilkins, "Bound geodesics in the Kerr metric," *Physical Review D* 5 (4), 814 (1972).



**Pedro Cunha** é aluno do mestrado de Astrofísica e Instrumentação para o Espaço na Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra. Concluiu a Licenciatura em Física no ano de 2012 na mesma Universidade. Presentemente encontra-se a preparar a dissertação de mestrado.

# José Mariano Gago,

## físico que serviu o país

Carlos Fiolhais

Mariano Gago escreveu no seu prefácio à reedição *Física para o Povo* (com o título *A Física no Dia-a-Dia, Relógio d'Água*, 1995, uma vez que para o autor do livro já não havia “povo”): “Rómulo de Carvalho veio recordar-nos, mais uma vez, como a Física também é quotidiana. A sua obra de divulgação científica, agora em reedição, ocupa um lugar destacado na história da divulgação em Portugal. Aí chegou por um caminho simples, rente à comoção humilde de saber, à altura da nossa ignorância e vontade de aprender.”

O mesmo Mariano Gago, na Introdução ao seu livro *Homens e Ofícios* subtítulo *Manual de Fichas e Exploração Temática para animação cultural sobre tecnologias e sociedades*, publicado em 1978 em edição de autor a partir de um seu trabalho com emigrantes portugueses na Suíça nos dois anos anteriores, escreveu: “O coração da cultura bate ao ritmo da prática humilde das bibliotecas de bairro, dos grupos de alfabetização, dos grupos corais, do teatro amador, dos pequenos cineclubes; vive do sangue e do esforço de quem se junta e age, sem ficar à espera que alguém resolva, talvez, um dia, a mudar o mundo que nos diz respeito”.

Foi colando estas duas frases de José Mariano Gago que o recebi, a 12 de Março de 2013, no *Rómulo – Centro Ciência Viva* da Universidade de Coimbra, uma biblioteca que honra o grande professor de Física e Química e também poeta que o ministro Mariano Gago elevou patrono da Cultura Científica Nacional. Nunca pensei que, passados pouco mais do que dois anos, não mais o pudesse receber naquele espaço de cultura científica. Sabia que estava a lutar contra uma doença, de que ele não falava por entender ser uma questão pessoal, mas foi em estado de choque que fiquei ao fim da tarde de 17 de Abril passado, quando, quase a iniciar mais uma sessão do curso de História da Ciência no *El Corte Inglés* em Lisboa, um jornalista da Antena 1 me informou que Mariano Gago tinha falecido. A morte é uma grande safada!

Bertold Brecht escreveu: “Temam menos a morte do que a vida insuficiente”. Ora Gago teve uma vida muito mais do que suficiente. De animador cultural em Genebra passou em poucos anos primeiro a presidente da JNICT, antecessora da FCT, e depois a Ministro da Ciência e Tecnologia. Como



gestor e político de ciência nunca deixou a Física, nem deixou de pensar como um físico, sem para isso ser preciso incluir o seu nome em cada *paper* que ia saindo do seu laboratório. Ajudou a esse marco da internacionalização da ciência portuguesa que foi a entrada de Portugal no CERN, em 1985, faz agora 30 anos, ainda estava longe de ser ministro. E celebrou, como todos os físicos, a descoberta da partícula de Higgs, anunciada a 4 de Julho de 2012, quando já não era ministro. Estive com ele, após essa descoberta, num Café de Ciência da Assembleia da República numa sessão em que defendi a relevância da associação de Portugal ao CERN e, mais em geral, o valor da ciência fundamental.

Como ministro, Mariano Gago valorizou sempre a cultura científica, por saber que ela era condição necessária da ciência. Ao longo do ano, e em particular na semana que integrava o Dia Nacional da Cultura Científica, 24 de Novembro (data do nascimento de Rómulo de Carvalho), era visto, com uma energia extraordinária, por todo o país, ora num centro Ciência Viva ou numa escola, ora num Laboratório Associado ou numa outra unidade de ciência, dando um elogio amigo e uma sugestão amável. Para o José Mariano, tal como para Rómulo, a ciência devia ser para todos sem excepção, devia ser para o “povo”. Fez um Ministério novo precisamente para isso, para a ciência estar ao serviço do país e não de grupos restritos. Não se serviu, serviu-nos.

Caro José Mariano: faz-nos hoje muita falta. Mas, invocando as palavras de Jorge de Sena que tu mesmo citaste na morte de Rómulo de Carvalho, estar morto é apenas estar impedido de se pronunciar. Pronunciar-nos-emos nós, cientistas e amigos da ciência, por ti, lembrando-nos sempre do modo sábio e afável como te pronunciavas.

*Por decisão pessoal, o autor do texto não escreve segundo o novo Acordo Ortográfico.*

# Porque é que o quadrado vermelho desaparece?

Constança Providência e Pedro Providência

## Material

- Caixa de papelão forrada de cartolina preta
- Papel celofane vermelho, azul e verde
- Cartolina preta e branca
- Papel mate vermelho, verde e azul
- Cola e tesoura

## A cor dos objetos

Certamente já observaste um arco-íris num dia de chuva. As gotas de água separam a luz branca do Sol em diferentes componentes que os olhos identificam com cores diferentes. Sobrepondo-as novamente voltamos a ter branco. Mas não são necessárias todas as cores do arco-íris para obter branco: basta sobrepor igual quantidade de vermelho, verde e azul. Três é o menor número de cores necessárias para reproduzir todas as cores, incluindo o branco! Os nossos olhos estão preparados para detetar estas três cores e criar mais de dez milhões de cores diferentes pela combinação de quantidades diferentes de cada uma.

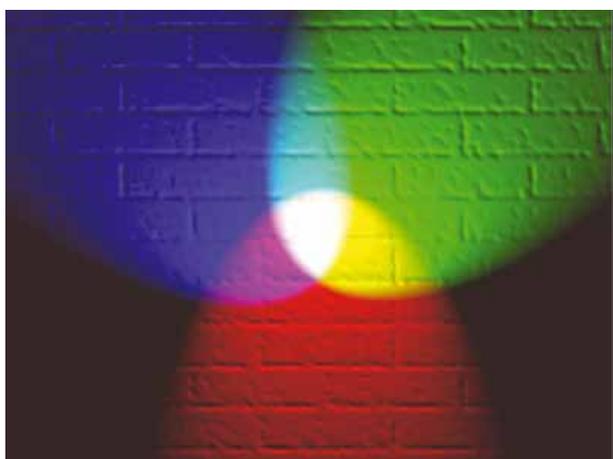


Fig. 1 - Sobreposição de três focos emitindo luz de cor vermelha, azul e verde. A região da parede onde as três cores se sobrepõem fica branca. (fonte: *Wikipedia*)



Fig. 2 - Arco-íris. (fonte: *Wikipedia*)

Mas, então, por que é que uma camisola é vermelha? Será a cor uma propriedade da camisola ou depende de algo mais? Na verdade a cor de um objeto depende da cor da luz que a ilumina. Se estiveres vestido de vermelho e saíres à rua num dia de Sol todos dirão que estás vestido de vermelho. Mas, imagina que entras numa sala iluminada de luz azul. De que cor és visto? Dir-te-ão que estás vestido de preto. Uma superfície vermelha absorve a luz verde e a luz azul e só reflete a luz vermelha. Assim, se estiveres a ser iluminado apenas com luz azul, a tua roupa vermelha absorve toda a luz azul e não reflete nada: parece preta, o que corresponde à ausência de cor. A tabela 1 ajuda-te a identificar quais as cores que são absorvidas ou refletidas por cada superfície.

Imagina que queres passar despercebido numa casa assombrada que tem todas as suas divisões pintadas de preto ou branco. Além disso, as salas são iluminadas com luz vermelha, verde ou azul. Supõe ainda que levas contigo três fatos que te cobrem completamente: um vermelho, um verde e um azul. Que fato deves escolher para atravessar cada sala e que salas deves mesmo evitar?

Para responderes a estas perguntas faz a seguinte experiência. Precisas de uma caixa de cartão (por exemplo uma

Tabela 1

superfície \ luz	branco	preto	vermelho	verde	azul
	reflete	absorve	reflete	absorve	absorve
	reflete	absorve	absorve	reflete	absorve
	reflete	absorve	absorve	absorve	reflete

caixa de resmas de papel A4) forrada de cartolina preta por dentro. Na tampa de cima faz um buraco centrado com dimensões aproximadas de 15 cm x 18 cm. Prepara três filtros: um vermelho, um azul e um verde. Para cada um toma um quarto de cartolina preta, dobra-a ao meio, e faz um buraco centrado de 15 cm x 18 cm em ambas as partes da cartolina dobrada. Coloca no meio da cartolina dobrada um retângulo de papel celofane vermelho com medidas 18 cm x 20 cm, a tapar o buraco, colando o celofane à cartolina e ambas as metades da cartolina uma à outra. Se o celofane for muito fino usa dois retângulos iguais sobrepostos. O teu filtro está pronto. Repete para os filtros verde e azul.

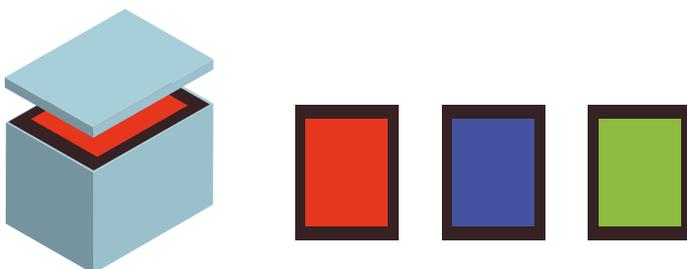


Fig. 3 - Caixa forrada de preto com a tampa com abertura e um filtro a cobrir a caixa por baixo da tampa; os três filtros, vermelho, azul e verde.

Agora prepara uma folha branca de papel e uma folha preta colando-lhes recortes de papel vermelho, verde ou azul com formas diferentes. Por exemplo cola triângulos azuis, quadriláteros vermelhos, e outras formas verdes. Podes também preparar as folhas no teu computador com um programa gráfico e imprimi-las. Coloca, agora, a folha branca no fundo da caixa forrada de preto, tapa a caixa com o filtro vermelho dobrando um pouco as bordas para não deslizar nem cair para dentro da caixa e cobre com a tampa da caixa. Vira a caixa para a luz. O que observas? Repete substituindo a folha branca pela preta. O que observas desta vez? Então já consegues responder à pergunta colocada? Como te deves vestir para passares despercebido e que salas deves evitar?

Quando olhamos através do filtro vermelho a folha branca no fundo da caixa não conseguimos ver os quadriláteros e todas as outras formas aparecem com a cor preta. O que se passa? A luz branca atravessa o filtro vermelho que apenas deixa passar a luz vermelha. O fundo branco

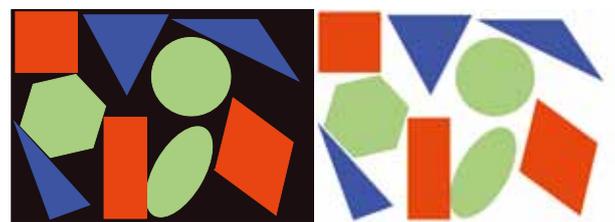


Fig. 4 - Fundo preto (esquerda) e branco (direita) com montagem de formas geométricas vermelhas, verdes e azuis.

reflete todos os tipos de luz. Se apenas é iluminada com luz vermelha só pode refletir o vermelho, e os nossos olhos vêem-no vermelho. Um objeto vermelho reflete apenas o vermelho e absorve o verde e o azul. Quando iluminado com vermelho vai refletir toda a luz. É também observado com a cor vermelha, confundindo-se com o fundo. Um objeto azul só reflete o azul e absorve o vermelho e o verde. Se for iluminado com luz vermelha vai absorver toda a luz e não reflete nada. É visto como sendo preto. O mesmo se passa com um objeto verde que só consegue refletir o verde. Quando iluminado com vermelho fica preto porque absorve toda a luz. Assim, o mais seguro para atravessar uma sala branca iluminada com luz vermelha sem seres visto é vestir um fato vermelho. Concordas?

Observa agora a cartolina preta através do filtro vermelho? Consegues perceber o que observas? Desta vez só se veem as formas vermelhas. Porquê?

O vermelho reflete a luz vermelha, o azul e verde absorvem a luz vermelha, e o fundo preto absorve a luz de todas as cores. Assim, o fundo e as formas azuis e verdes ficam pretas e só distinguimos o vermelho dos quadriláteros. Então numa sala preta iluminada com uma luz vermelha é melhor não te vestires de vermelho que serás logo descoberto. Escolhe antes o azul ou verde.

E o que se passa com os filtros azuis e verdes? Se colocares no fundo da caixa a cartolina preta com as formas verdes, azuis e vermelhas vêes que: qualquer que seja o filtro verde ou azul as formas



Fig. 5 - Fundo branco (esquerda) e fundo preto (direita) com filtro vermelho.

vermelhas não são vistas. Os filtros verde e azul não deixam passar qualquer luz vermelha. Também as formas azuis parecem quase pretas com o filtro verde, e as verdes quase pretas com o filtro azul, mas não se confundem tão bem com o fundo preto da caixa como as formas vermelhas. Então se estiveres numa sala preta iluminada por uma luz verde ou azul é preferível vestires-te de vermelho. Concordas?

Coloca agora a cartolina branca com as colagens verdes, vermelhas e azuis no fundo da caixa e observa-a através do filtro azul. O que observas? As formas vermelhas parecem pretas. As verdes ficam mais escuras mas não totalmente pretas. As formas azuis aparecem azuis mas com um azul diferente do azul refletido pelo fundo da caixa. Estes resultados indicam que não é seguro atravessar uma sala branca iluminada com luz azul, e o melhor é evitares as salas brancas da casa assombrada iluminadas com luz azul. Algo semelhante se passa com as salas brancas iluminadas com luz verde.

Os filtros verde e azul não funcionam tão bem como o vermelho e os motivos poderão ser vários. Os filtros podem não estar bem calibrados e o filtro azul deixa passar um pouco de luz verde, e vice-versa, o filtro verde deixa passar um pouco de luz azul. Nem sempre é possível desenvolver técnicas que nos permitam obter filtros perfeitos. Mas a diferença também pode estar associada ao modo como detetamos o verde e o azul, ambas as cores estimulando as mesmas partes do olho. O corpo humano é muito complexo e ainda não é claro como é que a informação relativa à cor é processada pelo cérebro.

É possível criar efeitos muito interessantes brincando com a cor das luzes e das paredes de uma sala. Para descobrires alguns destes efeitos visita a página <http://www.carnovsky.com/RGB.htm> que mostra os trabalhos de dois designers de Milão. Queres tu criar os teus próprios desenhos que mudam conforme o filtro que usares para os iluminar? Experimenta! Usa a caixa e os filtros que preparaste.



Fig. 6 - Fundo branco (esquerda) e fundo preto (direita) com filtro azul.

## Uma Introdução à Mecânica

Carlos Fiolhais

Não são muitos os professores de Física portugueses que põem à disposição dos seus alunos e dos alunos de outros, sob a forma de livro impresso, elementos de estudo. Muitos fazem-no sob a forma de notas de curso *on-line*. Mas o livro está bem longe de estar morto e todos sabemos que a manipulação física das folhas de um livro para a frente ou para trás não é exactamente o mesmo que percorrer um ficheiro num ecrã. O conteúdo pode ser exactamente o mesmo, mas o *design* conta. Num livro que seja nosso podemos sublinhar e anotar o que bem queremos (bem sei que isso é de certo modo possível também num ficheiro *pdf*, mas não é a mesma coisa...).

É, por isso, de saudar que os físicos António Silvestre e Paulo Teixeira, professores do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (o primeiro, doutorado pela Universidade de Lisboa e especialista em ciência de materiais, e o segundo, doutorado pela Universidade de Southampton e especialista em matéria mole), tenham decidido publicar as suas lições do curso de Mecânica Geral que ensinam na sua escola a estudantes do primeiro ano de Engenharia Química e Biológica. O livro foi um êxito, pois, saído em 2013, um ano depois aparecia a segunda edição, convenientemente revista. No prefácio à primeira edição os autores justificavam a sua obra referindo a escassez de obras de Física Introdutória em português. De facto, como eles próprios reconhecem, há muitas em português do Brasil, quer em tradução quer originais. Eles referem dois dos clássicos traduzidos para português, o Sears e Zemansky e o Halliday e Resnick. Mas há outros, como o Tipler (que adoptei quando ensinei Física Geral em Portugal) ou o Hecht (que adoptei em cursos desse tipo que dei nos Estados Unidos e que tem tradução em português). Não penso, como os autores, que as traduções brasileiras sejam más, mas concordo com eles que constitui um lucro para a cultura portuguesa a publicação de obras pedagógico-científicas usando a nossa norma. A física é universal, mas, agora que há entre nós mais estudantes a estudar física, sejam eles de física, sejam de outras ciências, sejam ainda de engenharia, eles lucram em ter à sua disposição mais manuais na sua língua-mãe. Este livro vem, em boa hora, juntar-se a outros congéneres -

não muitos, lembro-me do *Fundamentos de Física*, saído na Almedina, de Maria José Almeida e Maria Margarida Costa, que já vai na terceira edição e que, além de mecânica, inclui outros temas da Física Clássica, como Electromagnetismo e Óptica.

O livro em apreço é bastante completo abordando os assuntos da mecânica de um modo padrão, progredindo do conceptualmente mais fácil para o mais difícil: após a apresentação do cálculo vectorial, os autores tratam a cinemática do ponto, as leis de Newton, a dinâmica de uma partícula material, a dinâmica de um sistema de partículas, a dinâmica do corpo rígido e, finalmente, a relatividade restrita (interessante, mas há tempo?). Um apêndice apresenta relações matemáticas. O capítulo introdutório sobre cálculo vectorial poderia também ter vindo em apêndice, sendo chamado no corpo principal do texto à medida que a física o exigisse (o professor poderia sempre, perante alunos carentes, começar pelo apêndice). Tendo consultado de forma aleatória algumas das secções em que está estruturado percebi logo que a escrita era clara, cumprindo o livro o seu propósito pedagógico. Gostei, por exemplo, da discussão sobre massa variável, que nem sempre se faz. Não simpatizei tanto com a secção sobre “energia térmica” e “conservação da energia total”. De facto, não gosto da expressão “energia térmica”, por ela poder dar azo a más interpretações, como a de calor: prefiro falar em “energia interna”. E falar de energia total é algo ambíguo, pois poder-se-ia logo ter esclarecido que num sistema que além de mecânico é termodinâmico, à variação da energia mecânica (do sistema como um todo, visto como “concentrado” no centro de massa) acresce a variação de energia interna. Mas este assunto tem muito que se lhe diga (por exemplo, a questão do pseudo-trabalho) e percebo que os autores tenham querido ser sucintos. O livro em causa tem o grande mérito de incluir numerosos exemplos de aplicação, com questões resolvidas e problemas (as soluções estão, e muito bem, no fim). Fiquei um pouco admirado de o livro não incluir mais exemplos relacionados com a biologia, já que o público-alvo é formado por alunos de Engenharia Química e Biológica, mas percebo essa omissão uma vez que a mecânica introdutória não encontra uma aplicação fácil nessas áreas.

De que é que gostei mais e do que é que gostei menos neste livro? Gostei mais das secções com asterisco, aplicações da mecânica muito interessantes, que num caso resultam de investigação pedagógica original dos autores (designadamente a que consta do artigo “Uma normal muito anormal” publicado na *Gazeta de Física* em 2000). Há aqui verdadeiras pérolas, que dificilmente se encontram noutra lado. Gostei menos da apresentação do livro, demasiado espartana, numa época em que os livros de Física Geral internacionais privilegiam as imagens, incluindo não só fotografias como simulações computacionais. Mas mais e melhores ilustrações tornaria caro um livro que é barato.

Recomendo portanto o novo manual não só a alunos que estão a frequentar nas universidades ou politécnicos uma disciplina introdutória de Física, como, agora que houve uma ligeira alteração dos programas do secundário, aos professores de Física desse grau de ensino que queiram ter

à mão um livro de referência sobre o sempre eterno tema da mecânica clássica e relativista. Os autores e a sua escola estão de parabéns por mais esta contribuição ao ensino da Física em Portugal.



### **Mecânica. Uma introdução**

António Jorge Silvestre e

Paulo Ivo Teixeira

Lisboa: Edições Colibri e

Instituto Politécnico de Lisboa,

2.<sup>a</sup> edição revista, 2014

ISBN 978-989-689-295-1

# Portal da Sabedoria: uma mudança no paradigma da educação

Diogo Bragança

A educação em português enfrenta hoje um desafio que se tem vindo a demonstrar cada vez mais importante. De facto, como disse um senhor de bigode, que revolucionou a física com a sua Teoria da Relatividade, “*it is a miracle that curiosity survives formal education*”<sup>1</sup>. O que se observa hoje é que esse “milagre” acontece cada vez menos.

A curiosidade e a paixão pelo conhecimento são progressivamente destruídas pelo atual sistema de ensino, que formata a mente dos seus alunos num pragmatismo de médias.

O grande desafio é voltar a trazer a curiosidade e a paixão pelo conhecimento.

Foi como uma resposta a este desafio que surgiu, em 2013, o *Portal da Sabedoria*, projeto inovador criado por dois alunos do curso de Engenharia Física Tecnológica do Instituto Superior Técnico, Francisco João Lopes e Rogério Jorge.

A missão do projeto é oferecer um serviço de ensino à distância de excelência, oferecido por alunos de reconhecido mérito e valor, que fomente a aprendizagem de conhecimentos e o sucesso escolar dos alunos. O facto de a aprendizagem ser de aluno para aluno facilita a verdadeira missão de quem ensina, que é, como diz o mesmo senhor de bigode, “*the supreme art of the teacher is to awaken joy in creative expression and knowledge*”<sup>2</sup>.

Hoje, o *Portal da Sabedoria* conta com um canal do YouTube que contém mais de duas centenas de vídeos curtos (média de 10 minutos) produzidos pelos melhores alunos das várias áreas do conhecimen-



to: Física, Matemática, Química, Economia e até Música. Estes alunos transmitem nos seus vídeos a sua paixão pela respetiva área, apaixonando assim também o visualizador. Estes vídeos também se encontram no *website* do projeto, <http://www.portaldasabedoria.pt>, que possui várias funcionalidades adicionais, entre as quais contas pessoais com um sistema de sugestão de vídeos e de apontamentos em tempo real. Tudo isto oferecido em prol da paixão pelo conhecimento. Existe uma especial atenção para garantir a qualidade dos vídeos, não só gráfico-sonora mas também científica.

Há um ponto importantíssimo que é preciso sublinhar: o objetivo não é substituir o ensino presencial, mas sim complementá-lo, usando o tempo da aula para discutir dúvidas mais interessantes e debater problemas que só o meio universitário permite, aproveitando assim ao máximo a disponibilidade do professor e a socialização entre colegas. Os alunos fazem parte de algo muitíssimo maior do que uma audiência longínqua que muitas vezes entra muda e sai calada, mas têm de o sentir e de investir nesse sentimento comum. Só assim se alcançará o verdadeiro sucesso escolar, só assim o alcança quem o tem.

O público-alvo do projeto é constituído pelos estudantes de língua portuguesa, do ensino secundário/médio e do ensino superior, que são, entre Portugal e Brasil, 16 milhões

<sup>1</sup> “É um milagre que a educação sobreviva à educação formal” (N. do Ed.)

<sup>2</sup> “A arte suprema do professor é despertar a alegria na expressão criativa e no conhecimento” (N. do Ed.)



(excluindo os PALOP). Através dos vídeos, estes estudantes conseguem adaptar o seu ritmo de aprendizagem às suas necessidades, o que não acontece no ensino presencial, uma vez que o professor impõe um único ritmo para vários alunos diferentes.

O projeto conta atualmente com mais de cinco mil subscritores no *YouTube*, que dão um *feedback* muito positivo, e pedem sempre novos vídeos. Esses novos vídeos são sempre anunciados na página de *Facebook* do projeto, plataforma privilegiada para o contacto com os visualizadores dos vídeos.

Finalmente, o projeto é constituído unicamente por alunos motivados em espalhar esta chama pelo conhecimento. Hoje, esses alunos são mais de vinte em número, mas o *Portal* tem como objetivo a curto prazo reunir muitos mais cérebros motivados por este grande ideal: mudar o paradigma do universo da educação em português colocando, no centro, a paixão pelo conhecimento.

Para se candidatar a colaborar neste projeto único através da produção de vídeos, basta enviar um email para [diogo.braganca@portaldasabedoria.pt](mailto:diogo.braganca@portaldasabedoria.pt). Para ser um candidato a explicador do *Portal da Sabedoria*, basta enviar um e-mail para [explicacoes@portaldasabedoria.pt](mailto:explicacoes@portaldasabedoria.pt). O projecto está à

procura de alunos para produzir vídeos de análise complexa, equações diferenciais, mecânica, ondas, sistemas digitais, teoria dos circuitos, fundamentos de eletrónica, entre outros...

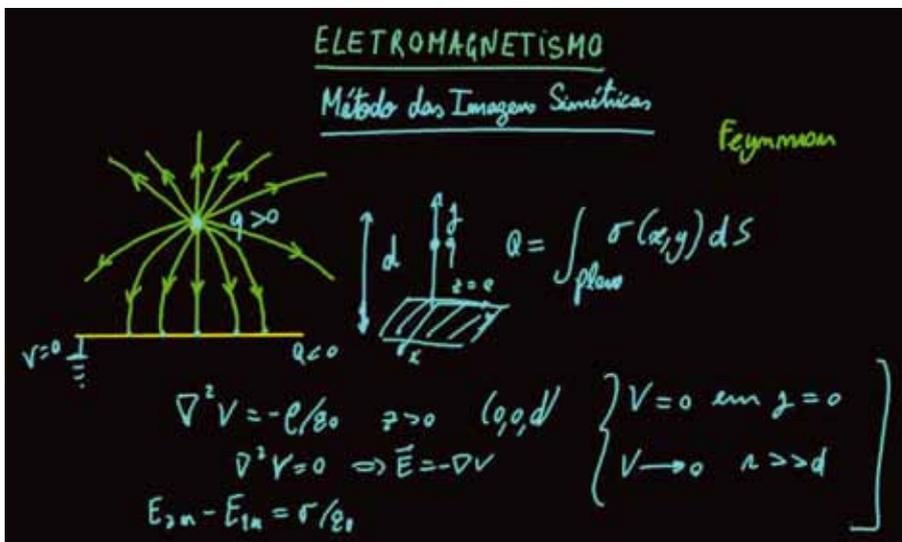
O *Portal* chama por estes alunos que querem renovar a educação em português.

Para saber mais:

<http://portaldasabedoria.pt>

<http://www.youtube.com/user/matmania1>

<http://www.facebook.com/portaldasabedoria>



# Scientix: a comunidade *online* para a educação em ciência na Europa

Carlos Cunha

Escola Secundária Dom Manuel Martins, Av. António Sérgio, 2914-505 Setúbal

cjcunha@sapo.com

## Resumo

O portal *Scientix*, promovido pela European Schoolnet (EUN), alberga os recursos de todos os projetos envolvendo a educação em STEM (Ciência, Tecnologia e Matemática) financiados com fundos públicos e pela Comissão Europeia. Neste portal podem ser encontrados milhares de recursos para utilização nas salas de aula do ensino básico e secundário, podendo ainda ser solicitada a tradução para uma das línguas europeias, num serviço gratuito.

Tendo por enquadramento a declaração de Lisboa (2000) e o reconhecimento da Comissão Europeia da necessidade de aumentar a promoção das metodologias de ensino por pesquisa (*inquiry based learning*) nas escolas dos ensinos básico e secundário, bem como reforçar o apoio às redes estabelecidas entre os professores (2007), foi lançado o projeto *Scientix*, pela European Schoolnet (EUN), que consiste numa plataforma de informação ao serviço da educação em ciência, na Europa.

O projeto *Scientix* promove e suporta a colaboração trans-europeia entre professores STEM (professores de Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática), investigadores em educação, decisores políticos e outros profissionais relacionados com a educação STEM.

Durante a sua primeira fase de implementação (2009-2012), o projeto implementou um portal online que permitisse agrupar e apresentar os projetos europeus no domínio das STEM, bem como os seus resultados e recursos, tendo ainda organizado diversos workshops com professores. O principal encontro promovido pelo projeto foi a Conferência *Scientix*, que decorreu em Maio de 2011, em Bruxelas.

O objetivo da segunda fase (2013-2015) é a ex-

pansão do projeto a nível nacional. Através de uma rede de Pontos de Contacto Nacionais (NCPs), pretende-se que o projeto chegue às comunidades de professores de cada país, contribuindo para um maior desenvolvimento de estratégias e enraizamento de estratégias como o ensino por pesquisa entre outras abordagens inovadoras no domínio do ensino das ciências da matemática.

O portal (<http://scientix.eu>) está disponível em seis línguas europeias e oferece um repositório de recursos contendo centenas de materiais para o ensino, resultantes dos mais variados projetos europeus, para além dos relatórios finais desses projetos que entretanto finalizaram, bem como as conclusões registadas pelos decisores políticos relacionados com os projetos; o portal disponibiliza ainda, para utilizadores registados, um serviço de tradução por pedido dos recursos educativos que aí se encontram, para uma das 23 línguas oficiais da União Europeia, para além de um *chat* e de um fórum; é ainda disponibilizado um serviço de notícias sobre diversos tópicos no domínio da educação em ciência e um calendário dos diversos encontros e oportunidades de formação. Finalmente, o projeto disponibiliza mensalmente uma *newsletter* enviada aos utilizadores registados.

Para além do portal, o *Scientix* irá organizar diversos *workshops* pela Europa, de forma a disseminar o portal e os serviços por ele disponibilizados. As *newsletters* e os *workshops* têm como objetivo prestar informações aos professores de ciências, explicar-lhes como utilizar da melhor forma a plataforma *Scientix* em sala de aula e também proporcionar-lhes a oportunidade de conhecerem outros professores de ciências e matemática. A 2.<sup>a</sup> Conferência *Scientix* realizou-se de 24 a 26 de outubro de 2014, em Bruxelas, na Bélgica. Com uma participação que rondou 550 professores, decisores políticos, investigadores e gestores de projetos, ela constituiu um dos maiores encontros em rede da educação STEM na Europa.

## Referências

1. <http://www.scientix.eu/>

**Gazeta de Física****- Edição especial AIL2015**

A 25 de Novembro de 2013, na 68.<sup>a</sup> sessão da Assembleia Geral das Nações Unidas foi proclamado 2015 como o Ano Internacional da Luz e das Tecnologias baseadas em Luz (AIL2015). O AIL2015 é uma iniciativa global que pretende destacar aos cidadão de todo o mundo a importância da luz e das tecnologias ópticas nas suas vidas, no seu futuro, e no desenvolvimento da sociedade. Trata-se de uma oportunidade única para inspirar, educar, e conectar à escala global.

Este Ano Internacional resulta da iniciativa de um vasto consórcio de diferentes entidades científicas juntamente com a UNESCO, tais como sociedades, uniões e instituições científicas, instituições educacionais, plataformas tecnológicas, organizações sem fins lucrativos e parceiros do sector privado.

Com a proclamação de um Ano Internacional dedicado ao tema da ciência da luz e das suas aplicações, as Nações Unidas reconhecem a importância da crescente consciência global sobre como as tecnologias baseadas na luz promovem o desenvolvimento sustentável e possibilitam soluções para os desafios globais na energia, educação, agricultura e saúde, entre muitas outras áreas.

A Luz desempenha um papel central na nossa vida e é uma disciplina transversal no século XXI, abrangendo a física, química, biologia, medicina, telecomunicações, e também as artes, a cultura e a economia.

Desde o início que a Sociedade Portuguesa de Física e a Gazeta de Física têm estado associadas à iniciativa AIL2015. Para registar esta celebração, e no âmbito do programa nacional para as comemorações, iremos lançar uma edição especial da revista, a publicar no final do ano, e para a qual vimos formalmente abrir o convite à submissão de trabalhos, aberto a cientistas, professores, investigadores, alunos e demais profissionais relacionados com a luz de um modo lato.

Os artigos deverão ser relacionados com os temas do AIL2015, e cumprir as habituais regras da Gazeta de Física quanto ao tamanho e modelo, bem como cumprir os objectivos de divulgação científica. Será disponibilizada mais informação na página web da revista. Os editores estão disponíveis para apreciar propostas de artigos, antes de proceder a uma submissão formal.

O prazo limite para submissão dos trabalhos é 30 de Setembro de 2015.

Para mais informações:

Página nacional: <http://ail2015.org>

Página internacional: <http://www.light2015.org>



Gazeta de Física | Edição Especial  
**ANO INTERNACIONAL DA LUZ 2015**

ciência tecnologia sociedade engenharia medicina arte natureza história arquitectura cultura

Call for papers  
Prazo para submissão 30 de Setembro de 2015  
Para mais informação <http://gazetadefisica.spf.pt>

fisica

INTERNATIONAL YEAR OF LIGHT 2015

**20 de Maio****- Dia Mundial da Metrologia****Olivier Pellegrino**

Em 20 de maio de 1875, há 140 anos, foi assinada a Convenção do Metro, um tratado diplomático que criou o Bureau Internacional dos Pesos e Medidas (BIPM) e foi celebrado em Paris entre representantes de dezassete países, entre os quais Portugal. Esta Convenção consagrou o Sistema Métrico decimal, hoje designado por Sistema Internacional de unidades de medida (SI), de utilização universal e adotado formalmente em Portugal em 1983.

A Convenção do Metro tem agora 55 países membros e 41 outros associados, tendo cada estado a sua própria infraestrutura estabelecida através de um Laboratório Nacional de Metrologia (LNM), eventualmente apoiado por Laboratórios Designados (DI), responsáveis pelos padrões de medição nacionais e efetuando a ligação com o BIPM para garantir a rastreabilidade dos padrões ao SI e a equivalência com os padrões nacionais dos outros países.

Assim, em 1999 foi celebrado um Acordo de Reconhecimento Mútuo (MRA) que consagra o reco-

nhecimento dos padrões nacionais de medida e a equivalência dos certificados de calibração emitidos pelos LNM desses países, desde que participem em comparações inter-laboratoriais regulares e tenham sistemas de gestão da qualidade segundo as normas internacionais aplicáveis.

Em Portugal, o Laboratório Nacional de Metrologia do Instituto Português da Qualidade (IPQ) é o LNM responsável pelas grandezas de base comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria e intensidade luminosa e diversas grandezas derivadas, num total de 32 grandezas. Por sua vez, o Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes do Instituto Superior Técnico / Campus Tecnológico e Nuclear (IST/CTN) é o DI responsável pelas grandezas derivadas do domínio das radiações ionizantes. Está atribuída a estes Laboratórios a missão de disseminar aquelas grandezas em todo o território nacional, assegurando o rigor e a rastreabilidade das medições efetuadas em todos os domínios metrológicos.

A exemplo dos anos anteriores, no dia 20 de maio é celebrada a assinatura da Convenção do Metro através do “Dia Mundial da Metrologia”, uma iniciativa do BIPM e da Organização Internacional de Metrologia Legal (OIML). Para se associar ao decretado pela UNESCO “2015 Ano Internacional da Luz e das Tecnologias baseadas na Luz”, o tema do “Dia Mundial da Metrologia 2015” é “As medições e a Luz”.

Representante de Portugal no BIPM e na OIML, o IPQ associa-se a esta iniciativa através de comemorações com palestras e visitas aos Laboratórios e ao Museu da Metrologia. Mais informações estão disponíveis no sítio internet: <http://www.ipq.pt>



## Ciclo de Palestras no Porto

### – Ano Internacional da Luz

#### Joaquim Agostinho Moreira

A Delegação Norte da SPF, o Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e o Museu de Ciência da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto organizaram um ciclo de palestras comemorativo do Ano Internacional da Luz, abertas ao público em geral. As palestras terão lugar na cidade do Porto de acordo com o seguinte calendário:

#### A Luz e a Literatura

Mário Cláudio (escritor)

Biblioteca Almeida Garrett, 18 Abril 2015 às 17:00

#### História da Investigação sobre a Luz

Professor Luís Bernardo (Dep. de Física e Astronomia, Fac. de Ciências, Universidade do Porto)

Biblioteca Almeida Garrett, 16 Maio 2015 às 17:00

#### A cor dos alimentos

Professor Vitor Freitas (Dep. Química, Fac. Ciências, Universidade do Porto)

Biblioteca Municipal do Porto, 20 Junho 2015 às 17:00

#### A luz dos Novos Mundos

Professor Nuno Santos (Dep. Física e Astronomia, Fac. Ciências, Universidade do Porto)

Biblioteca Municipal do Porto, 18 Julho 2015 às 17:00

#### Acreditar para Ver: Luz e Imagem na Investigação Aplicada em Ciências da Visão

Professor José Manuel González-Méijome (Dep. Física, Universidade do Minho)

Biblioteca Almeida Garrett, 17 Outubro 2015 às 17:00

#### Luz: sonda do espaço-tempo

Professor Orfeu Bertolami (Dep. Física e Astronomia, Fac. Ciências, Universidade do Porto)

Biblioteca Almeida Garrett, 21 Novembro 2015 às 17:00 (também no contexto do Centenário da Teoria da Relatividade Geral)

## Colóquio Interdisciplinar “Visões da Luz” Rui Travasso

A propósito do Ano Internacional da Luz 2015 e do 725.º aniversário da Universidade de Coimbra (UC), pretende-se organizar um Colóquio interdisciplinar, alargado a diversas áreas do conhecimento desenvolvidas na Universidade de Coimbra, com o patrocínio do Instituto de Investigação Interdisciplinar da UC.

Este Colóquio, subordinado ao tema “Visões da Luz”, decorrerá nos dias 1 a 3 de Outubro de 2015, das 10:00 às 17:30, em auditórios da UC.

Cada dia será dedicado a um mote, começando pela “Descoberta da Luz”, passando por “Um Olhar sobre a Luz” e terminando no “Futuro da Luz”.

O Colóquio está estruturado em seis blocos de três conferências apresentadas por especialistas de cada área temática, seguidas de comentário e debate.

Os temas a apresentar nas palestras e nos comentários pelos moderadores das sessões cobrem as seguintes áreas: Física, Filosofia, Transcendência, Astronomia, Geologia, Literatura, História da Ciência, Química, História, Geografia, Energia, Relações Internacionais, Zoologia, Antropologia, Psicologia, Conservação e Restauro, Cinema e Fotografia, Imagiologia Médica, Robótica, Visão e Cérebro e História da Arte.

Pretende-se igualmente organizar atividades diversas ao fim de cada dia de conferências, a partir das 18:00.

Com este Colóquio pretende-se atingir o público académico (docentes, investigadores, funcionários e alunos), escolar (em particular escolas secundárias) e sociedade civil em geral.

### Uma excelente participação de Portugal na XIX Olimpíada Ibero-americana de Física

A equipa portuguesa que se apresentou em Assunção, Paraguai, para competir na XIX Olimpíada Ibero-americana de Física obteve três medalhas de prata e uma menção honrosa.

A XIX Olimpíada Ibero-americana de Física decorreu de 29 de Setembro a 4 de Outubro, colocando em competição 63 estudantes finalistas do ensino secundário de 18 países. No final de duas longas e difíceis provas de Física (uma prova teórica e uma prova experimental) o vencedor foi um estudante da Costa Rica.

Os *team-leaders* que acompanharam a delegação ao Paraguai, Orlando Oliveira e Rui Vilão, fazem um balanço extremamente positivo da prestação portuguesa: “É um dos melhores resultados de sempre. Não só todos os estudantes foram premiados como também obtivemos as duas melhores medalhas de prata e a melhor menção honrosa.”

Os docentes da Universidade de Coimbra destacam “a prova teórica, que era muito longa e cobria variadíssimos tópicos de Física. Salientamos também o bom desempenho na prova experimental, que os próprios alunos atribuíram ao trabalho de preparação realizado ao longo do ano na UC”.

A lista dos estudantes portugueses é a seguinte:

João Fragoso Melo (E. S. Santa Maria, Sintra)

– medalha de prata

Maria Eduarda Carvalho Lucas de Sá Marta

(E. S. Infanta D. Maria, Coimbra)

– medalha de prata

António de Almeida e Sousa Cardoso Fernandes

(E. S. Garcia de Orta, Porto)

– medalha de prata

António João Caeiro Heitor Coelho

(E. S. Gabriel Pereira, Évora)

– menção honrosa

As Olimpíadas de Física são uma atividade promovida pela Sociedade Portuguesa de Física com o patrocínio do Ministério da Educação e Ciência e da Agência Ciência Viva. O treino da equipa decorreu no Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, integrado nas atividades da escola Quark! de Física para jovens, com o apoio do programa operacional QREN-Mais Centro.



Participação portuguesa na XIX Olimpíada Ibero-americana de Física. Da esquerda para a direita: Orlando Oliveira, João Melo, António Fernandes, Maria Eduarda Marta, António Coelho, Rui Vilão.

### Carlos Matos Ferreira (1948-2014) e José Mariano Gago (1948-2015)

No espaço de poucos meses, a física e a ciência perderam dois dos seus mais brilhantes membros. Carlos Matos Ferreira e José Mariano Gago foram colegas de curso, eram ambos professores catedráticos no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico (IST), e deixam marcas muito duradouras no desenvolvimento desta ciência em Portugal. Deixamos aqui apenas uma breve nota, que será desenvolvida numa próxima edição.

Carlos Matos Ferreira licenciou-se em Engenharia Electrotécnica no IST e doutorou-se em Física na Universidade de Paris em 1976. Tornou-se Professor Catedrático do IST em 1979, tendo sido presidente desta escola entre 2001 e 2009.

Teve um papel dinamizador na Sociedade Portuguesa de Física, na qual exerceu os cargos de Secretário Geral de 1990 a 1998 e Secretário Adjunto para os Assuntos Nacionais de 1987 a 1989.

José Mariano Gago licenciou-se em Engenharia Electrotécnica no IST em 1971, e obteve doutoramento em Física na École Polytechnique e Université Pierre e Marie Curie em Paris em 1976. Foi investigador no CERN em Genebra de 1976 a 1978. No regresso ao IST, garantiu a adesão de Portugal ao CERN, e lançou o Laboratório de Instrumentação e Partículas.

De 1986 a 1989 foi Presidente da JNICT e entre 1995 e 2002 foi Ministro da Ciência e da Tecnologia dos XIII e XIV Governos constitucionais. Instituiu o sistema de avaliação internacional no sistema científico nacional. Entre várias iniciativas criou a Agência Nacional Ciência Viva para a cultura científica e tecnológica. Em 2000 preparou com a Comissão Europeia a Estratégia de Lisboa, na área da Investigação Europeia e da Sociedade da Informação na Europa. De 2005 a 2011 foi Ministro da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior em mais dois governos constitucionais. Aquando da sua morte, o seu legado foi unanimemente elogiado por todos os seus colegas e quadrantes políticos, num reconhecimento público raramente visto.

# TABELA DE PUBLICIDADE 2015



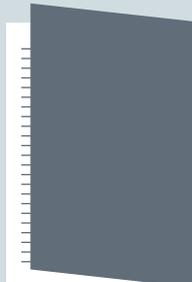
A) verso da capa



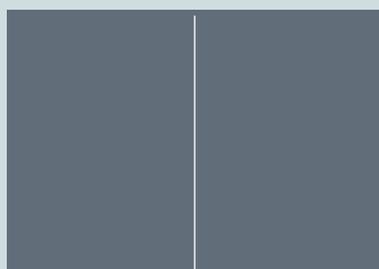
B) destacável/folha



C) verso da contracapa



D) contracapa



E) página dupla



F) página inteira



G)  
coluna ou  
1/2 página

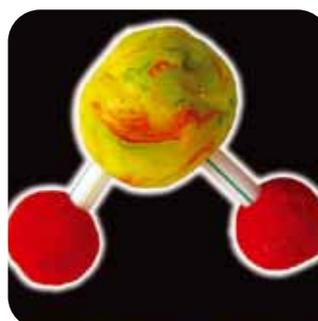
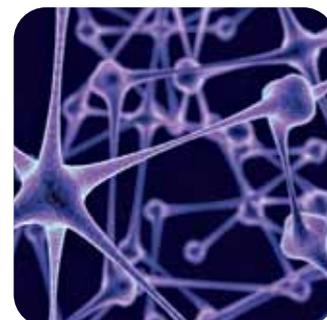
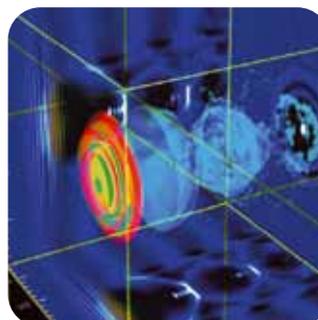
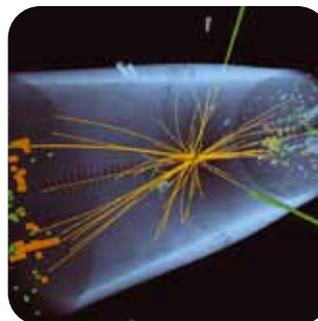


H)  
1/4 página  
ou faixa

Posição	Preço (Euros)	
	Ímpar	Par
A	900	
B	900	
C	900	
D	1200	
E	1000	
F	600	550
G	400	350
H	250	200
banner website	100/mês	



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



Aos preços da tabela acresce o IVA à taxa em vigor

Descontos de quantidade:

2X: -20%      3X: -25%      4X: -30%

Tiragem anual 2013:

5400 exemplares

Contactos:

Sociedade Portuguesa de Física

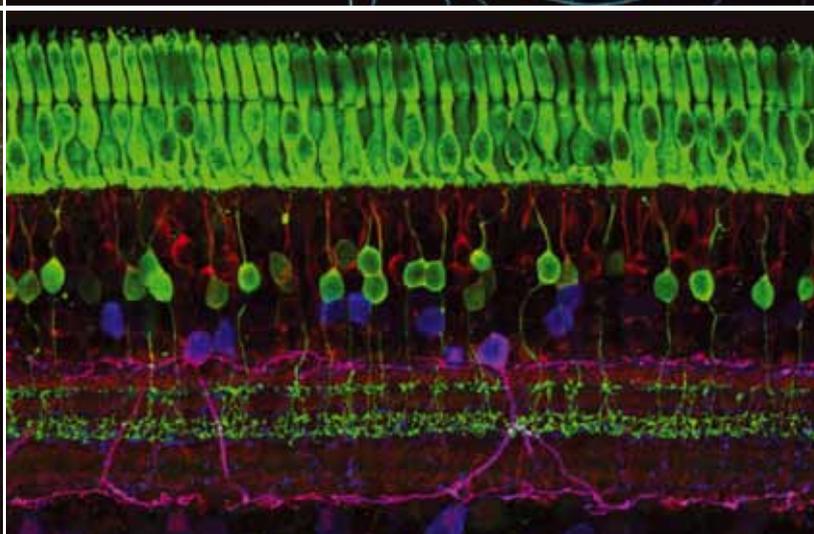
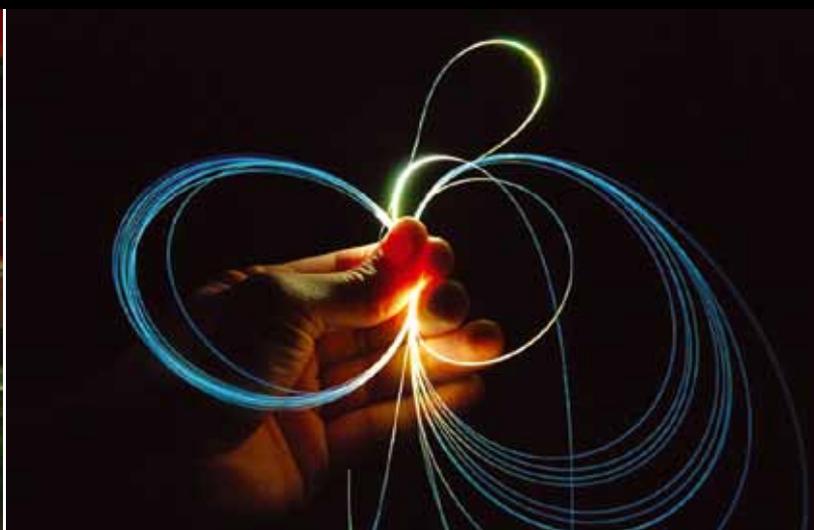
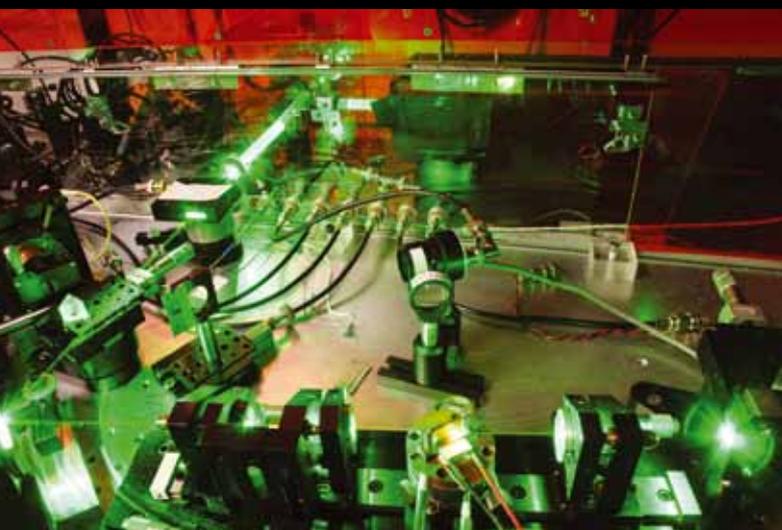
Av. República 45 3ª esq. · 1050-187 Lisboa

Tel: 351 21 799 36 65 · spf@spf.pt

# Gazeta de Física | Edição Especial

# ANO INTERNACIONAL DA LUZ 2015

ciência tecnologia sociedade engenharia medicina arte natureza história arquitectura cultura



## Call for papers

Prazo para submissão  
Para mais informação

30 de Setembro de 2015  
<http://gazetadefisica.spf.pt>



INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
2015