

Os alunos apinham-se no auditório da escola. Alguns têm um ar de quem está genuinamente interessado na apresentação; outros, de quem não teve alternativa e está ali obrigado. Neste dia, o orador sou eu, e o tema é lasers na vida moderna, uma das palestras que dei com frequência durante o último ano.

Começo por explicar que a luz laser tem um conjunto de propriedades interessantes e invulgares. Dentro de momentos irei falar-lhes de coisas como multiplicação de fótons e emissão estimulada, mas para já apenas vou desvendando algumas das características que exibe, por exemplo, o brilhante feixe de luz verde do laser que uso como apontador.

É uma forma de luz extremamente direcional, digo. Exemplifico apontando para uma parede próxima, e depois para outra parede distante: o minúsculo ponto de luz mantém praticamente o mesmo tamanho, o que é uma das qualidades mais extraordinárias e úteis dos lasers. O público, composto por miúdos que já nasceram num século em que a internet de alta velocidade e o *wifi* são dados adquiridos, não parece muito impressionado.

“Reparem que, para aparecer naquela parede, a luz do laser tem que viajar toooda esta distância pelo ar”, digo com ar casual, acompanhando com um gesto do braço, antes de fazer uma pausa. “Toda a gente sabe isso, certo?” O facto é óbvio, mas o ar de surpresa em algumas caras parece dizer o contrário...

Peço então a ajuda dum voluntário da plateia para realizar uma simples experiência. O meu jovem assistente segura o apontador laser ligado e orientado para a tal parede distante, enquanto eu pego num apagador de quadro de ardósia – previamente preparado para estar o mais sujo possível de giz – e raspo-o para espalhar uma nuvem de pó fino no percurso do feixe. Como por

magia, um fio de luz verde surge no meio do ar, tornando-se perfeitamente visível para dezenas de olhos. Ouvem-se expressões de espanto e admiração, que culminam num aplauso! Agradeço ao voluntário e retomo a palestra, normalmente com o público mais interessado do que no início.

Esta história repetiu-se comigo em diversas escolas básicas e secundárias durante as palestras do programa *Haja Luz nas Escolas*, uma das iniciativas levadas a cabo durante o Ano Internacional da Luz 2015. Conto-a porque me parece uma excelente metáfora da nossa relação habitual com a luz e de como o AIL2015 veio despertar consciências.

Para nós, também a luz é um dado adquirido, um bem em que podemos confiar e que certamente é parte fundamental da nossa vida, só que raramente paramos para pensar nisso. Ela “está lá” a ligar dois pontos da nossa existência, mas ignoramos a parte invisível do seu percurso. Com o AIL2015, procurámos mostrar como a luz está presente, cada vez mais, em muitos aspectos diferentes da nossa vida presente, celebrando o passado e abrindo caminho para o futuro.

Uma das iniciativas previstas desde o começo do AIL2015 foi a edição deste número especial da *Gazeta de Física*, integralmente dedicado à luz. Mantivemo-nos fiéis à intenção original: sair do mundo da física e convidar outras vozes, não só na ciência, mas também nas artes, na história, na literatura... o que deu origem à (literalmente) grande edição que agora chega aos leitores. Não sei se será a maior *Gazeta* nos seus setenta anos que história – que comemoraremos este ano – mas é certamente uma das mais extensas e variadas. Tenho também a certeza que foi uma das que me deu mais prazer editar: foi uma honra poder contar com os contributos dos autores presentes nesta edição. Em nome da Sociedade Portuguesa de Física, agradeço profundamente a todos.

Gonçalo Figueira

Por opção 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

Colunistas e Colaboradores regulares

Ana Simões, Carlos Fiolhais,
Constança Providência

Colaboraram também neste número

Maria Conceição Abreu, Paulo André, Ricardo André, Luís M. Bernardo, Orfeu Bertolami, Miguel C. Brito, Carlos da Camara, Paulo Simeão Carvalho, Luís Coelho, André David, Rosa Doran, Ana M. Eiró, Nuno C. Ferreira, Carlos Fiolhais, Raquel Forca, Sara Freitas, Francisco Gil, Maria José R. Gomes, Paula Lagarto, Ilídio Lopes, Katharina Lorenz, Clarisse Magarreiro, José G. Marques, José Tito Mendonça, Teresa Monteiro, Teresa Paiva, Luís Peralta, Pedro Pombo, José Manuel Rebordão, Pedro Redol, Ana Rita Ribeiro, Patrícia Santos, Fernanda Saraiva, Carlos Serpa, Adriano Sampaio e Sousa, Sylvie de Sousa, Gonçalo M. Tavares

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 Eng^a 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
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.

O Ano da Luz em Portugal

Carlos Fiolhais e Pedro Pombo

Comissão Nacional do 2015 Ano Internacional da Luz

O Ano Internacional da Luz (AIL2015) foi anunciado em Portugal em Setembro de 2014 na Conferência Nacional de Física realizada no Instituto Superior Técnico, que contou com a presença do Comissário internacional e Presidente da Sociedade Europeia de Física, John Dudley. Após ter sido criada uma Comissão Nacional que reúne representantes das Sociedades Portuguesas de Física, de Química e de Óptica, da Ordem dos Biólogos, da UNESCO e da Agência Ciência Viva, o AIL2015 foi inaugurado em Portugal, em Março de 2015 com uma palestra do Coordenador da Comissão Nacional sobre a história do nosso conhecimento da luz e um espectacular *show* de luz da responsabilidade da Fábrica Ciência Viva em Aveiro, na mais antiga escola secundária portuguesa, a Escola Básica e Secundária Passos Manuel, em Lisboa.

Foi um ano em que por todo o país se sucedeu um sem número de actividades (ver ail2015.org), das quais, dada a exiguidade de espaço, só aqui podem ser reportadas algumas, digamos alguns *highlights*, resultado de uma selecção que corre o risco de ser injusta. De resto, no passado dia 15 de Dezembro, na Fundação Calouste Gulbenkian, na abertura da conferência internacional *Haja Luz – Diálogos em Volta da Luz*, que contou com a presença de Manuel Heitor, ministro da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, e apresentação inicial de Jorge Calado, foi anunciado que o Ano Internacional da Luz, à semelhança do que se passou noutros países, ia ser prolongado por mais seis meses em

2016. As actividades vão continuar e o relatório final terá, por isso, de aguardar.

Foi decidido, com a ajuda da Agência Ciência Viva, colocar o foco do AIL2015 em actividades escolares. As conferências nas escolas do quadro do programa *Haja Luz nas Escolas* foram até agora cerca de uma centena em todo o país, envolvendo mais de 5000 alunos (Figura 1). O programa inclui ainda *workshops* de formação de professores (centrados no uso pedagógico de *kits* de luz: foram oferecidos cerca de uma centena desses *kits*), em colaboração com alguns dos Centros Ciência Viva espalhados pelo país: realcem-se acções de formação como a *Photonics Explorer* realizada em Lisboa (coorganizada pelo Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear - Instituto Superior Técnico, Sociedade Portuguesa de Física e Agência Ciência Viva), Porto (organizada pela Universidade do Porto), Aveiro e Ponta Delgada (ambas organizadas pela Universidade de Aveiro), que envolveram mais de 175 professores. Também logo no início do ano, a Fábrica Centro Ciência Viva de Aveiro realizou uma acção de formação nacional sobre luz, envolvendo mais de 500 professores de 10 cidades nacionais. Outra acção de formação em Lisboa na área da biologia foi realizada pela Ordem dos Biólogos e pela Agência Ciência Viva. As escolas básicas e secundárias, para além de receberem iniciativas do *Haja Luz nas Escolas*, estão a organizar várias iniciativas autónomas e a colaborar em diversos projectos com outras entidades.

Decorreram várias exposições sobre a luz. A Comissão Nacional promoveu uma exposição itinerante *Janelas de Luz* sobre hologramas (Figura 2), da autoria da Fábrica Centro Ciência Viva da Universidade de Aveiro, que foi inaugurada em Aveiro e que já passou pela Guarda, Covilhã (com um total de 2000 visitantes até agora), e que viajará para o Lousal, Lagos, Faro, Estremoz, Coimbra e Porto. No Porto, abriu a 15 de Dezembro no Museu Nacional Soares dos Reis a exposição *Lux Mirabilis*, que mostra instrumentos científicos e objectos artísticos



Fig. 1 - Palestra do programa *Haja Luz nas Escolas* em Macedo de Cavaleiros.

dos acervos do Museu da Ciência da Universidade do Porto e daquele museu nacional. Em Lisboa, estiveram duas exposições luminosas, muito perto uma da outra: *A Luz de Lisboa*, num torreão do Terreiro do Paço, e *Na Luz/ Dentro do Vidro*, na Galeria Millennium, na Rua Augusta, a primeira com a colaboração do Museu da Cidade de Lisboa e a segunda da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. *A Festa do Avante* na Quinta da Atalaia, Setúbal, incluiu uma exposição e uma palestra sobre a luz. Em Óbidos, no âmbito do Festival literário *Fólio* e em vários concelhos limítrofes, esteve uma exposição de *cartoons* internacionais sobre a luz, organizado pelo Museu da Imprensa do Porto. Em Coimbra esteve no Museu da Ciência da Universidade de Coimbra a exposição *Visões – o interior do olho humano*, da responsabilidade do Centro Cirúrgico de Coimbra, para além da sua mostra permanente *Segredos da Luz e da Matéria*.

O Ano chamou-se *da Luz e das Tecnologias da Luz*. Na Feira do Património 2015 realizada em Coimbra uma empresa de luz, o atelier OCubo fez uma fantástica apresentação de luz no Mosteiro de Santa-Clara-a-Velha, em Coimbra, que acresceu ao espectáculo que tinha apresentado antes nas fachadas do Paço das Escolas da Universidade de Coimbra, a que assistiram mais de 30 mil pessoas, no quadro da celebração dos 725 anos da Universidade de Coimbra, e ao festival de luz *Lumina*, realizado em Setembro, em Cascais. Houve outros espectáculos de luz em Aveiro, Lousada, Barreiro, Oeiras e Lisboa. Também houve espectáculos de luz da autoria de outras empresas, por exemplo em Almeida, Sintra e Lisboa. No Porto, abriu uma instalação de Luz, *Porto Light Experience* (Figura 3), perto da Estação de São Bento, promovida pelo *Lighting Living Lab* de Águeda e que ganhou um prémio no concurso internacional *Happy LED Life*.

As Câmaras Municipais organizaram ou apoiaram várias actividades luminosas, como o evento que congregou várias empresas industriais associadas à luz (*Lighting Living Lab*), patrocinado pelo município de Águeda, que culminou na inauguração de iluminação pública inteligente, e o festival *Cultura e Luz*, em Almeida. O mesmo se passou com associações e ordens profissionais: a Ordem dos Engenheiros realizou uma conferência na sua sede em Lisboa e outro no Funchal (na “Casa da Luz”), além de ter editado um número especial da sua revista *Ingenium*, quase todo ele devotado ao tema da luz.

Tiveram lugar numerosas conferências sobre luz, além das que já foram referidas, designadamente na Faculdade de Ciências e no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, e na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, sobre vários aspectos da ciência e tecnologia da luz, na Faculdade de Letras da Universidade do Porto, sobre luz



Fig. 2 - *Janelas de Luz*, exposição itinerante sobre hologramas.

e museus (*Lights on*), na Universidade do Minho, em Braga, sobre luz e *media* (*Comunicação e Luz*), na Madeira, sobre luz e estratégias educativas (*Hands-on Science 2015*), na Universidade de Évora, sobre luz, arte e ciência (*Colours 2015*), duas na Universidade de Coimbra, uma sobre interdisciplinaridade e outra sobre sustentabilidade (intituladas respectivamente *Visões da Luz* e *À Volta da Luz*), na Academia das Ciências de Lisboa (*International Seminar on Light and its Applications*), no Instituto Português de Qualidade, no Monte da Caparica, em Almada, nas comemorações do Dia Mundial da Metrologia, a 20 de Maio, sobre o tema “As Medições e a Luz” e no Pavilhão do Conhecimento - Ciência Viva de Lisboa (*Light, from the Earth to the Stars*), com o apoio da Câmara Municipal de Lisboa, na qual foi prestada uma justíssima homenagem a José Mariano Gago (Figura 4) e na qual falou o físico espanhol do CERN Álvaro de Rujula. Logo no início da *rentrée*, tiveram lugar dois eventos internacionais: conferências científicas na Figueira da Foz (*Colloquium Spectroscopicum Internationale*) e em Faro (*International Conference on Advanced Laser Technologies*). E outras conferências houve em Novembro em torno da teoria da relatividade geral. A 10 de Novembro, Dia Mundial da Conferência pela Paz e Desenvolvimento, a Comissão Nacional da UNESCO realizou no Pavilhão do Conhecimento uma conferência sobre o AIL2015 e sobre o Ano Internacional dos Solos, que é simultâneo do Ano da Luz. Mas merece especial relevo a conferência sobre luz, centrada na radiação cósmica de fundo e no Telescópio Espacial James Webb, que foi proferida no Teatro Rivoli do Porto pelo cientista da NASA e Prémio Nobel da Física em 2006 John



Fig. 3 - *Porto Light Experience*, instalação de luz no Porto.

Mather, no quadro do *Festival do Pensamento* organizado pelo saudoso Paulo Cunha e Silva, vereador da cultura da Câmara Municipal do Porto, e à qual assistiram mais de 600 pessoas. No quadro internacional, os signatários fizeram uma apresentação sobre a história da luz, acompanhada de experiências interactivas, no *Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física*, que teve lugar em Julho em Gijon, Espanha.

Realizaram-se outras sessões sobre luz por todo o país: na Biblioteca de Viana do Castelo (*Mundos de Luz*), sobre a luz nos livros, na Faculdade de Nutrição e Ciências da Alimentação da Universidade do Porto (Dia da Faculdade), sobre luz e saúde, na Academia Portuguesa de Medicina e na Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra (também Dia da Faculdade), sobre luz e medicina, etc., no Rómulo – Centro Ciência Viva da Universidade de Coimbra e na Fábrica Ciência Viva de Aveiro (*Noite Europeia dos Investigadores*). No Rómulo, teve lugar uma série intitulada *À luz da ciência*. Muito intensas têm sido as actividades no Ano da Luz da Biblioteca da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, no Monte da Caparica, dirigida por José Moura, que procuraram juntar ciência e arte, acrescentando às palestras e debates pequenas exposições. Destaque particular para a *Noite da Luz*, que mobilizou muita gente do *campus*.

Houve celebração da luz em forma teatral (peça *Luz* estreada pela Marionet no Teatro Académico de Gil Vicente, em Coimbra) e cinema (*Let there be light*, uma curta-metragem sobre o “fim da luz” realizada por Laura Seixas, que foi apresentada na Conferência Internacional na Gulbenkian).

A luz de dia vem-nos do Sol e de noite vem-nos dos outros astros. Salientem-se, portanto, as várias actividades de astronomia realizadas no Verão, entre as quais uma na aldeia da Luz, Reserva de Escuridão do Alqueva, onde esteve uma exposição de fotografia astronómica de Miguel Claro, e outra, a *Astrofesta*, em Castro Verde, congregando astrónomos amadores de todo o país, bem como outras realizadas em diversos locais de Portugal ao longo de todo o ano (designadamente no Observatório Astronómico de Lisboa, onde se realizou o ciclo de palestras mensais *Noites de Ciências*, *Noites de Luz*, e ainda a muito original *Noite de Estrelas e Pirlampos*, em Azeitão, na Serra da Arrábida.

Foram várias as edições de livros. Saíram na Gradiva *Uma Biografia da Luz*, de José Tito Mendonça, *QED*, de Richard

Feynman (reedição), *Cosmicomix*, de Amedeo Balbi e Rossano Piccioni (banda desenhada sobre o *Big Bang*), e *Histórias da Física em Portugal no século XX* (eds. Teresa Pena e Gonçalo Figueira). Saiu no Centro Atlântico *Dark Sky – Alqueva*, com fotos astronómicas de Miguel Claro feitas na Reserva do Alqueva. Foi editado pelo Museu da Imprensa, no Porto, o catálogo sobre os *cartoons* de luz que estiveram em Óbidos (no Facebook também houve uma galeria de *cartoons* intitulada *iLuz2015*, de onde saiu uma *t-shirt*). A Tinta da China editou *A Luz dos Livros*, de António Leal, fotografias de *pin-hole* feitas na Biblioteca de José Pacheco Pereira, na Marmeleira. E a ISTpress publicou a 3.ª edição de *Haja Luz*, de Jorge Calado. A Relógio d’Água republicou *A Luz de Newton*, da escritora Hélia Correia (prémio Camões 2015).

Os *media* acompanharam o AIL2015. Nos jornais, o *Público* dedicou o seu número de aniversário aos cem anos da teoria da relatividade geral de Einstein e publicou, na sua revista dominical, uma série sobre diferentes aspectos científicos e artísticos da luz (*A Luz como meio e limite*). Outros jornais, como o semanário *Sol*, publicaram reportagens sobre o AIL2015. A agência de notícias Lusa divulgou o conceito do AIL2015 e alguns dos eventos. A imprensa regional esteve muito atenta ao AIL2015, através do programa *Ciência na Imprensa Regional*, dinamizado por António Piedade. A RTP passou um *spot* sobre o ano da luz, preparado pela Fábrica Ciência Viva de Aveiro (que já antes tinha feito os *posters* do AIL2015). E foram transmitidos programas sobre a luz na RTP2, em particular *Sociedade Civil*, e na rádio, em particular na Antena 2. A *Gazeta de Matemática* publicou um número especial sobre a luz. O *Boletim da Sociedade Portuguesa de Química* publicou alguns artigos sobre a luz. O presente número da *Gazeta de Física* é todo ele dedicado ao tema da luz. A revista *Rua Larga*, da Universidade de Coimbra, dedicou um número à luz. Revistas de iluminação técnica como o boletim da *Aura Light* e a revista digital do *Light Living Lab* dedicaram artigos ao Ano da Luz.

Houve concursos de fotografia e cinema, designadamente o concurso *Luz em Flash*, organizado pela Comissão Nacional do AIL2015 (ao qual concorreram cerca de 500 fotografias de participantes vindos de 15 distritos nacionais) e o concurso também de fotografia organizado pela Ordem dos Engenheiros. A Associação Portuguesa da Indústria de Ourivesaria promoveu o seu 7.º Concurso de Ourivesaria, dedicado este ano ao tema da Luz e a Sociedade Portuguesa de Óptica e Fotónica, em parceria com a Associação *Hands-on Science*, organizou o concurso *Feira de Ciência À Descoberta da Luz*, dedicado às escolas e a alunos de todos os níveis de ensino. Finalmente, os CTT – Correios de Portugal realizaram uma emissão, onde se destacam as duas



Fig. 4 - Conferência *Light, from the Earth to the Stars* no Pavilhão do Conhecimento, Lisboa.

comemorações mundiais deste ano: o Ano Internacional da Luz e o Ano Internacional dos Solos.

Patrocinaram estas iniciativas o Ministério da Educação e Ciência, através da Fundação para a Ciência e Tecnologia, a Agência Nacional para a Cultura Científica – Ciência Viva e a Fundação Calouste Gulbenkian (apoio centrado na conferência na sua sede), para além de várias outras entidades, algumas das quais atrás mencionadas.

Em conclusão: o ano de 2015 foi muito iluminado em Portugal. As actividades foram muito variadas e descentralizadas, tendo chegado no total, de uma forma ou de outra, a milhões de portugueses. Prevedemos que 2016 continue a ser um ano iluminado com a celebração que se prolonga até ao final do mês de Junho. Se a abertura foi em Lisboa, o fecho do AIL2015 será a 21 de Junho na Casa da Música no Porto, reflectindo o carácter nacional do conjunto de actividades.

Por opção pessoal, os autores do texto não escrevem segundo o novo Acordo Ortográfico.



Carlos Fiolhais nasceu em Lisboa em 1956. Licenciou-se em Física na Universidade de Coimbra em 1978 e doutorou-se em Física Teórica em Frankfurt/Main, Alemanha, em 1982. É Professor Catedrático no Departamento de Física da Universidade de Coimbra desde 2000. É autor de 160 artigos científicos e de mais de 500 artigos pedagógicos e de divulgação. Publicou mais de 50 livros, entre os quais vários *bestsellers*. Criou e dirige o *Rómulo - Centro Ciência Viva da Universidade de Coimbra*, e ganhou vários prémios e distinções pelo seu trabalho científico, pedagógico e de divulgação. Os seus interesses científicos centram-se na Física da Matéria Condensada e na História das Ciências.



Pedro Pombo é físico e especialista em Holografia e Divulgação da Ciência. É Director da Fábrica Centro Ciência Viva de Aveiro e assistente no Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Tem realizado trabalho em holografia e imagens 3D, holografia pseudocor, hologramas gerados por computador e holografia educacional. Tem-se dedicado ao desenvolvimento de novos projetos, exposições, módulos interativos, espectáculos de física e *kits* de ciência, bem como projectos multidisciplinares, na área do ensino das ciências e envolvimento do público em ciência. Recebeu três prémios europeus na área da comunicação da ciência e tem dezenas de publicações em revistas nacionais e internacionais.

Luz: História, Natureza e Aplicações

Ana Rita Ribeiro, Luis Coelho, Orfeu Bertolami, Ricardo André

Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

Resumo

O ano de 2015 foi proclamado pela UNESCO como o Ano Internacional da Luz e das Tecnologias baseadas em Luz. Neste sentido, pretende-se consciencializar a população para a importância do papel que a luz desempenha no nosso dia-a-dia. Com este artigo, os autores pretendem fazer uma breve revisão da História da luz, descrevendo sucintamente as teorias adjacentes a este fenómeno, bem como as principais descobertas que assentam na mesma. Para além disto, são também expostas algumas aplicações em que a luz é utilizada.

Até ao início do século XVII, o entendimento humano sobre a luz tanto ao nível da sua natureza como ao nível da explicação de fenómenos ópticos evoluiu muito lentamente. Desde o mundo antigo que sabemos que a luz se propaga em linha recta, embora a ideia estivesse ligada a raios que saíam dos olhos em direcção aos objectos de modo a “sentir” esses objectos. Esta noção começou com Euclides (ca. 325 a.C. a 265 a. C.) que, no seu tratado *Optica*, descrevia a luz como raios que partiam dos olhos para os objectos. No entanto, foi também o primeiro a notar que a luz viajava em linha recta e descreveu a lei da reflexão. Heron de Alexandria (ca. 10 d.C. a 70 d.C.), na sua obra *Catoptrica*, mostrou geometricamente que um raio de luz segue o caminho mais curto quando reflectido por um espelho plano. Já Ptolomeu (ca. 90 d.C. a 168 d.C.), que estudou a refacção, sugeriu que o ângulo de refacção era proporcional ao ângulo de incidência.

Após o desenvolvimento das primeiras noções e teorias da luz pelos gregos até ao segundo século d.C., seguiu-se um longo período de hibernação científica até ao início do século XVII. Nestes cerca de 1500 anos, destaca-se Ibn al-Haitham (963–1039), conhecido na Europa como Alhazen. Ibn al-Haitham foi o primeiro a destrinçar luz de visão, a retirar da óptica o aspecto subjectivo do que os olhos vêem. Refutou a lei da refacção de Ptolomeu, explicando que apenas se verificava para pequenos ângulos, discutiu a refacção atmosférica, explicou o aumento aparente do Sol e da Lua quando perto do horizonte e foi o primeiro a dar uma descrição precisa do funcionamento do olho humano. Ibn al-Haitham foi sem dúvida a figura mais importante na

história da óptica e da luz desde a antiguidade até ao século XVII, de tal modo que o Ano Internacional da Luz 2015 assinala, entre várias efemérides, o milésimo aniversário do seu tratado *Kitab al-Manazir* (Livro de Óptica).

Como em tempos de seca qualquer gota conta, no século XIII, destacam-se três figuras na Europa: Robert Grosseteste, Roger Bacon e Vitelo de Silesia. Robert Grosseteste (ca. 1175–1253), cientista, teólogo e bispo de Lincoln, propôs que a teoria deveria ser combinada com a observação experimental, lançando as bases do que é hoje conhecido como o método científico. Acreditava que as cores estavam relacionadas com a intensidade da luz e que o arco-íris resultava da reflexão e refacção por camadas numa cortina de água, embora nunca tenha considerado o efeito de gotas individuais. Tal como Euclides e os primeiros gregos, acreditava que a visão envolvia emanações do olho para o objecto. Roger Bacon (ca. 1215–1294), seguidor dos trabalhos de Grosseteste e do seu método científico, levou a cabo diversas experiências com lentes e espelhos, considerou que a luz teria uma velocidade finita e atribuiu o arco-íris à reflexão da luz solar em gotas individuais. Vitelo de Silesia (1230–1275) escreveu um texto sobre óptica, *Perspectiva*, que permaneceu uma das referências na área durante séculos, embora tenha sido em grande parte baseado no tratado em óptica de Ibn al-Haitham. Reconheceu ainda que o ângulo de refacção não é proporcional ao ângulo de incidência.

O grande desenvolvimento do início do século XVII foi iniciado pela invenção de novos instrumentos ópticos. Foi nesta altura que tanto o microscópio como o telescópio foram inventados, e a sua origem é ainda hoje debatida. A invenção do microscópio é atribuída ao fabricante de óculos holandês Zacharias Janssen, em 1590. No entanto, esta descoberta é disputada pelo seu compatriota Hans Lippershey. Já a invenção do telescópio está associada não só a estes dois fabricantes de óculos mas também ao



Fig. 1 - Objectiva do telescópio de Galileu e o próprio telescópio no detalhe.

fabricante de instrumentos e oculista, também holandês, Jacob Metius, em 1608. O desenvolvimento de ambos os instrumentos prosseguiu durante o século XVII e a notícia das invenções rapidamente se espalhou pela Europa. Galileu Galilei (1564–1642) construiu em 1609 o seu próprio telescópio com uma ampliação superior ao telescópio de Lipperhey, permitindo-lhe fazer observações e descobertas astronómicas que eventualmente fundamentaram o modelo heliocêntrico de Copérnico (Figura 1). Johannes Kepler (1571–1630), um dos poucos que aceitava a teoria heliocêntrica de Copérnico, apresentou explicações dos princípios que envolviam a utilização de lentes convergentes e divergentes em microscópios e telescópios e descobriu as leis de movimento planetário. Apresentou uma explicação correcta da visão e das funções da pupila, da córnea e da retina e descobriu ainda a reflexão interna total, mas foi incapaz de deduzir uma relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de refração. Só em 1621, Willebrord Snell (1580–1626) descobriu experimentalmente a lei da refração, a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de refração quando a luz passa de um meio transparente para outro. A lei da refração na sua forma actual, envolvendo termos sinusoidais, foi publicada por René Descartes (1596–1650) em 1644. Em 1657, Pierre de Fermat (1601–1665) deduziu a lei da refração do seu princípio de tempo mínimo, que diz que “a trajetória percorrida pela luz ao se propagar de um ponto a outro é tal que o tempo gasto em percorrê-la é um mínimo”.

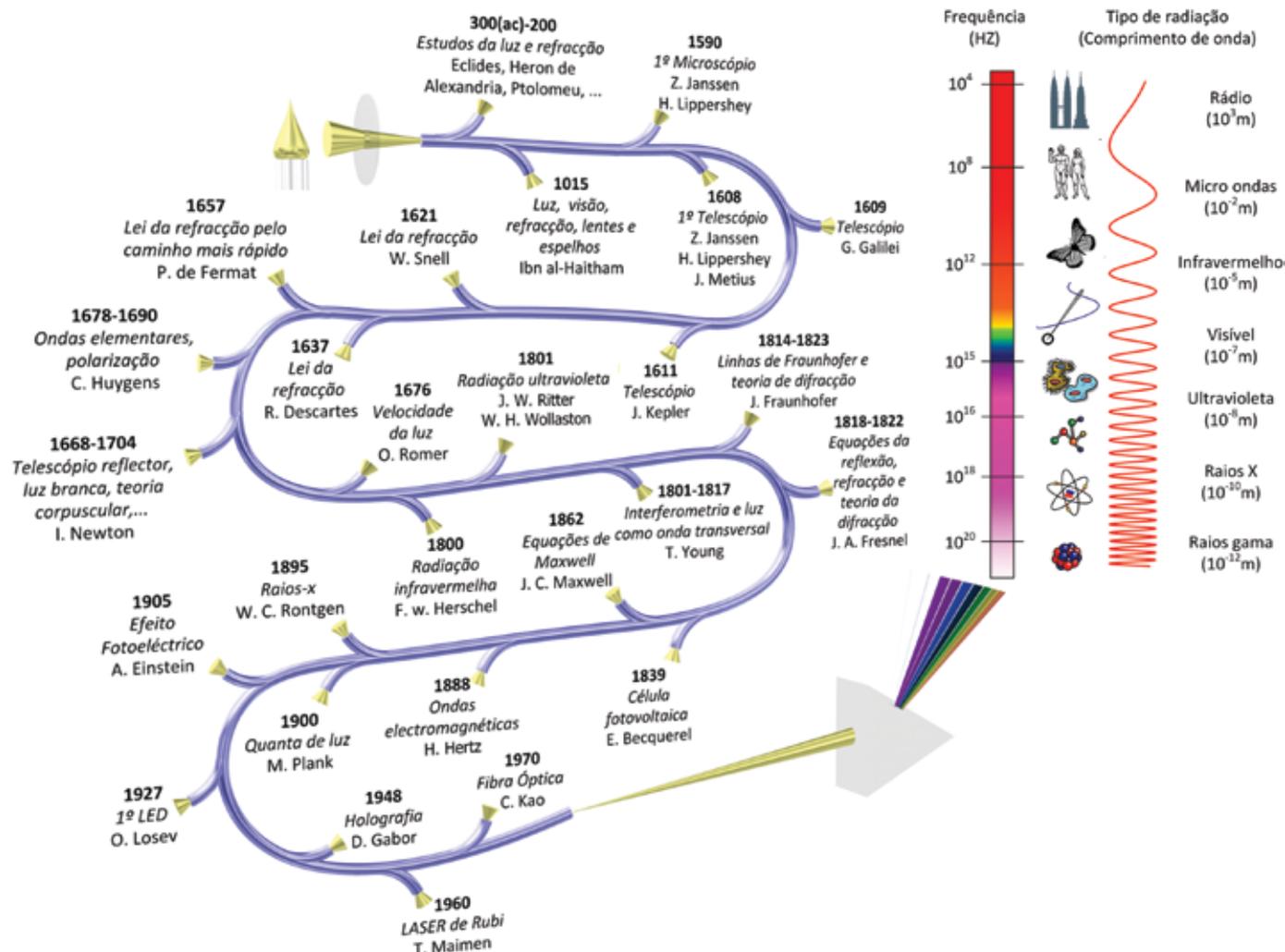
No final do século XVII, a óptica geométrica e o fabrico de lentes eram bem compreendidos, mas a natureza da luz era ainda um mistério. É aqui que Isaac Newton (1642–1727) dá um contributo essencial ao descrever a dispersão da luz branca quando atravessa um prisma (1666) e concluir que a luz solar era constituída por luz de diferentes cores. Construiu também o primeiro telescópio reflector para solucionar o problema da aberração cromática exibida pelos telescópios refractores (1668). Nesta altura, Christiaan Huygens (1629–1695) desenvolvia

a sua teoria ondulatória proposta no seu *Traité de Lumière* em 1690. De acordo com a teoria de Huygens, em cada ponto do espaço, a luz excita ondas elementares. Essas excitações funcionam então como fontes secundárias, e assim se propaga a luz. O mais surpreendente é que o modelo de Huygens não é uma verdadeira teoria ondulatória; as suas ondas elementares são de facto mais comparáveis a frentes de onda ou ondas de choque e não estão relacionadas com nenhuma noção de movimento periódico. Com a sua teoria, Huygens consegue explicar a velocidade reduzida da luz num meio mais denso, a refração, a polarização e a birrefringência.

A visão que Newton tinha de luz chocava com a de Huygens. Na sua obra *Opticks* (1704), Newton apresentou a ideia que a luz é corpuscular, é formada por raios que viajam em linha recta e não como ondas. Para Newton a propagação em linha recta da luz não era compatível com uma teoria ondulatória. Newton explicou muitos fenómenos com a sua teoria corpuscular e, devido ao peso das suas opiniões, levou a que esta fosse a mais aceite durante cem anos. É de salientar que durante esta disputa, em 1676, Ole Rømer determinou a velocidade da luz através do atraso nos eclipses das luas de Júpiter durante o período de afastamento entre a Terra e este planeta. Rømer obteve um valor de cerca de 2×10^8 m/s.

O século XVIII foi mais uma vez escasso em desenvolvimentos ópticos, mas no século XIX a óptica evoluiu rapidamente. Em 1802, Thomas Young (1773–1829) formulou o princípio da interferência e mostrou, com uma série de experiências engenhosas, que a luz se comporta claramente como uma onda. Explicou assim a difração da luz, e foi também o primeiro a introduzir a ideia da luz como onda transversal (1817), que era até então vista como uma onda longitudinal. Muito do progresso da teoria ondulatória deve-se a Augustin Jean Fresnel (1788–1827). Apologista da teoria ondulatória, Fresnel explicou a propagação rectilínea da luz em meios homogéneos e isotrópicos, calculou padrões de difração e deduziu equações para a intensidade da luz reflectida e refractada – as equações de Fresnel. Juntamente com Dominique François Arago (1786–1853) demonstrou que dois raios de luz com polarizações perpendiculares não interferiam, o que levou Young à conclusão que a luz é uma onda transversal. Ainda no século XIX, Joseph von Fraunhofer (1787–1826), entre outras experiências com a luz, inventou a espectroscopia, sendo o seu trabalho continuado e consolidado por Gustav Kirchhoff (1824–1887). Os sucessos da teoria ondulatória até então não tinham rival na teoria corpuscular, mas a decisão final veio da medição da velocidade da luz por Jean Bernard Léon Foucault (1819–1868) que em 1850 provou que a velocidade da luz num meio (água neste caso) era inferior à velocidade da luz no vácuo, algo que contrariava Newton e a sua teoria corpuscular. Foucault obteve um valor de 298 000 km/s para a velocidade da luz no ar.

Baseado nos trabalhos de Michael Faraday (1791–1867), James Clerk Maxwell (1831–1879) derivou as equações fundamentais do electromagnetismo, que implicam a existência de ondas electromagnéticas transversais a propagar-se a



Cronologia de acontecimentos históricos e descobertas relacionadas com a luz com inclusão do espectro electromagnético.

uma velocidade fixa, à velocidade da luz. Em 1888, Heinrich Hertz (1857–1894) desenhou um detector e um oscilador que lhe permitiram gerar e detectar ondas electromagnéticas, fazendo da óptica um ramo da electrodinâmica. Hertz descobriu também o efeito fotoeléctrico (1887), embora a sua explicação viesse apenas com Einstein, anos mais tarde.

No fim do século XIX, o sucesso da teoria ondulatória parecia inequívoco, mas Max Planck (1858–1947) explicou em 1900 a distribuição de energia de um corpo negro usando a sua teoria quântica. Esta suscitou que Albert Einstein (1879–1955) introduzisse o conceito de *quanta* de energia (mais tarde denominado *fotão*) e assim atribuiu novamente propriedades corpusculares à luz. Ao renovar a perspectiva corpuscular, Einstein abriu caminho à noção de dualidade onda-partícula. Este conceito foi central na revolução desencadeada pela mecânica quântica, onde reciprocamente se atribui às partículas microscópicas um comportamento ondulatório.

No seu *annus mirabilis*, 1905, Einstein publicou quatro artigos que revolucionaram a física. Nesses trabalhos, Einstein resolveu quatro problemas, directa ou indirectamente associados à luz. Começa por examinar o efeito fotoeléctrico, verificado experimentalmente no final do século XIX, que

consiste na dependência da energia dos electrões emitidos por superfícies metálicas em função da frequência da luz incidente. Esta ideia, essencial para o entendimento do efeito fotoeléctrico, assume que a luz é composta por corpúsculos, os fotões, com energia proporcional à sua frequência. Estuda de seguida o movimento browniano, a deslocação errática de partículas suspensas numa solução devida às colisões com moléculas de água.

A explicação deste fenómeno encerrou definitivamente a querela acerca da existência dos átomos, até então inobservados. Apresenta então a teoria da relatividade restrita, no seio da qual a luz tem um papel estruturante, e a demonstração da equivalência entre a massa de repouso, m , de um corpo e a energia, E , nele armazenada: a célebre equação $E = mc^2$, sendo c a velocidade da luz no vácuo.

A teoria da relatividade restrita veio resolver outra crise da física clássica. A mecânica de Newton e a teoria electromagnética de Maxwell haviam sido formuladas no pressuposto de que as suas leis eram independentes da velocidade relativa constante, v , entre sistemas de referência (referenciais de inércia).

Contudo, as equações da mecânica newtoniana

eram invariantes sob as chamadas transformações de Galileu, que assumiam ser o tempo absoluto. Porém, a aplicação destas transformações às equações de Maxwell não as deixa invariantes. Em oposição, as equações que unificam a electricidade e o magnetismo são invariantes sob as chamadas transformações de FitzGerald-Lorentz, transformações em que o tempo deixa de ser absoluto.

Einstein adoptou as transformações de FitzGerald-Lorentz e generalizou a mecânica de Newton. Nesta generalização assumiu dois postulados, um dos quais se refere explicitamente à luz:

- 1) As leis da física, da mecânica ao electromagnetismo, da física estatística à nuclear, etc. são invariantes sob as transformações de FitzGerald-Lorentz;
- 2) A velocidade da luz no vácuo, c , é constante e tem o mesmo valor independentemente da velocidade da fonte emissora ou do observador.

Esses postulados têm implicações que, do ponto de vista da mecânica de Newton, são paradoxais. O facto de a informação sobre os acontecimentos ser transmitida pela luz a uma velocidade finita, implica que acontecimentos simultâneos num referencial não o são noutra. Pode também concluir-se que comprimentos e intervalos de tempo não são iguais quando observados de sistemas de referência distintos, de modo que efectivamente o tempo se dilata e o espaço se contraí.

Concluída a relatividade restrita, que estabelece a invariância das leis da física para referenciais inerciais, o passo seguinte passava pela generalização para referenciais acelerados. Einstein alcançou esta extensão, a Teoria da Relatividade Geral, em 1915. Para tal observou que, na vizinhança de um dado ponto, os efeitos de um campo gravitacional são equivalentes aos observados num referencial acelerado, e que neste referencial um raio de luz é curvado, pelo que dever-se-ia esperar que o mesmo acontecesse num campo gravitacional. Na teoria da relatividade geral, a gravitação é uma consequência da curvatura do espaço-tempo, sendo esta curvatura determinada pela dinâmica da matéria/energia. Reciprocamente, a dinâmica da curvatura do espaço-tempo afecta a matéria/energia.

Assim, ao propagar-se num espaço-tempo curvo, a luz é deflectida na vizinhança de corpos massivos e o movimento dos corpos celestes é determinado por essa curvatura. A teoria também prevê a existência de “lentes” gravitacionais, isto é, distorções, imagens duplas, concentrações de luz sob a forma de arcos, etc. causadas pela curvatura do espaço-tempo.

O desenvolvimento da teoria quântica por Planck e as contribuições dadas por Einstein no início do século XX levaram a um entendimento mais profundo das propriedades e natureza da luz. Desencadeou-se então um processo acelerado de invenções e desenvolvimento de tecnologia baseada na luz, das quais se destacam o laser e a fibra óptica (ver caixas).

Durante as últimas décadas, foram alcançados significativos avanços tecnológicos baseados na óptica. Uma vez

Laser

Em 1916, Albert Einstein propôs que a emissão estimulada de luz é um processo que deve ocorrer juntamente com a absorção e a emissão espontânea, lançando assim as bases para o que viria a ser uma das mais importantes invenções da história da luz, o LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). A emissão estimulada é o processo pelo qual um fóton incidente de uma frequência específica interage com um electrão atómico excitado, provocando a sua transição para um nível de energia mais baixo. A energia é libertada sob a forma de um novo fóton com características idênticas: a mesma frequência, fase, polarização e direcção do fóton incidente. Em condições normais, o processo contrário à emissão estimulada – a absorção – é mais frequente, visto que há mais electrões em estados de energia mais baixos que em estados de energia mais elevados. É possível criar uma inversão de população electrónica, de modo a obter amplificação óptica. Esta inversão de população criada num meio com ganho óptico, juntamente com uma cavidade ressonante são a base do laser e do maser (*Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*).

Em 1954, os primeiros maser foram desenvolvidos

independentemente por Charles Townes e Jim Gordon nos Estados Unidos e por Nicolay Basov e Alexandr Prokhorov na URSS. Em 1958, Townes e Arthur Schawlow publicaram e patentearam o conceito de *maser óptico* para radiação visível e infravermelha. Com esta publicação iniciou-se a corrida em busca do primeiro laser. Foi Theodore Maimon que em 1960 demonstrou o primeiro laser funcional – o laser de Rubi. Este era tão simples que em apenas poucas semanas diversos grupos de investigação conseguiram construir o seu próprio dispositivo. Desde então, seguiram-se rapidamente outros tipos de laser como de He-Ne em 1961, o de semicondutores (GaAs) em 1962, o de CO₂ em 1963, o de iões em 1964, o de corante orgânico em 1966, o de electrões livres em 1971/76 e o de raios-x em 1985.

Desde a sua descoberta, o laser tornou-se uma ferramenta indispensável nas nossas vidas. A primeira aplicação amplamente reconhecida do laser apareceu em 1974 com a introdução de leitores de códigos de barras. Nos anos que passaram, os lasers aplicaram-se nas mais diversas áreas desde as mais tradicionais como a medicina com técnicas de imagiologia (por exemplo OCT) e cirurgia (LASIK) a laser, comunicações ópticas, corte industrial, apontadores laser, leitura e gravação de CD e DVD, holografia e LIDAR (*Light Detection And Ranging*) a técnicas de ponta como fotografia ultra-rápida, arrefecimento a laser e propulsão a laser.

Fibra óptica

Desde há milhares de anos que a luz tem sido utilizada em telecomunicações. Sinais de fumo, velas em navios ou fogueiras no topo de torres, são apenas alguns exemplos de sistemas simples de comunicar informação a longa distância. Foi apenas no final do século XVIII que um sistema mais complexo de luzes posicionadas em torres – o primeiro telégrafo óptico – foi inventado pelo francês Claude Chappe. Os operadores destas torres transmitiam a informação de uma torre para a seguinte ao longo de uma cadeia.

Em 1841, o suíço Jean-Daniel Colladon mostrou pela primeira vez a guiagem de luz e a reflexão interna total num jacto de água mas foi John Tyndall que, em 1854, demonstrou efectivamente que a luz podia ser curvada para seguir o percurso de um fluxo de água (Figura 4). Tyndall e Colladon são considerados hoje os precursores da fibra óptica.

Alexander Graham Bell patenteou em 1880 um sistema de telefone óptico, a que chamou fotofone. Este permitia que sinais sonoros fossem codificados e transmitidos num feixe de luz em que a variação de intensidade representava diferentes tons. Embora Bell considerasse o fotofone a sua melhor invenção, a sua invenção anterior, o telefone eléctrico, era mais simples, prático e barato, e provou ser mais realista. Nesse mesmo ano, William Wheeler inventou um sistema de tubos revestidos interiormente com uma camada reflectora que era utilizado para conduzir a luz e iluminar casas usando uma lâmpada de arco eléctrico colocada na cave.

Já no século XX, mais especificamente nos anos 20, John Logie Baird patenteou a ideia de usar matrizes de varas transparentes para transmitir imagens para televisão, enquanto Clarence W. Hansell desenvolveu o mesmo para fac-símiles. Foi no entanto Heinrich Lamm que, em 1930, na tentativa de iluminar partes inacessíveis do corpo humano, transmitiu pela primeira vez uma imagem através de um molhe de fibras ópticas.

Em 1954, Abraham Van Heel e Harold Hopkins apresentaram separadamente molhes de fibras ópticas para a transmissão de imagem. A ideia inovadora surgiu uns anos mais tarde por Van Heel, que propôs cobrir as fibras com uma bainha transparente de índice de refração inferior. Esta

bainha protegia assim a superfície de reflexão total de distorção exterior e reduzia a interferência entre fibras. Este foi um grande progresso visto que o grande obstá-

culo ao uso de fibra óptica eram as suas enormes perdas.

Com a crescente necessidade de aumento da largura de banda e o facto de as frequências de micro-ondas e de rádio estarem já no limite das suas capacidades, foi necessário procurar a solução em frequências mais altas. Com a invenção do laser em 1960, as comunicações ópticas pareciam ser o caminho a seguir. Em 1961, Elias Snitzer publicou uma descrição teórica de fibras monomodo, cujo núcleo seria tão pequeno que guiaria luz num único modo.

Nesta altura, quase toda a comunidade considerava que as fibras tinham demasiadas perdas para utilizar as em comunicações. Uma atenuação de 1 decibel por metro era suficiente baixa para aplicações médicas, porém comunicações a longa distância não pareciam factíveis.

Foi em 1964 que Charles Kao e George Hockham publicaram um artigo em que demonstraram teoricamente que as perdas em fibras de vidro existentes podiam ser drasticamente reduzidas removendo impurezas. Mostraram que o problema não era da sílica, mas sim da sua pureza. Kao estava convencido que as perdas na fibra podiam ser reduzidas a menos de 20 dB/km. Esta previsão, anunciada em 1966, a tornar-se verdade, tornaria as fibras ópticas num dispositivo extremamente apetecível no âmbito das comunicações. Assim, vários laboratórios pelo mundo fora começaram a tentar reduzir a atenuação das fibras. Em apenas quatro anos atingiu-se o valor previsto por Kao. Foi na Corning Glass Works que Robert Maurer, Donald Keck e Peter Schultz começaram a investigar sílica fundida, um material capaz de ser produzido com alta pureza e baixo índice de refração, do qual produziram uma fibra monomodo com atenuação inferior a 20 dB/km a 633 nm.

Esses primeiros sistemas eram capazes de transmitir luz por vários quilómetros, contudo era inevitável que a tecnologia evoluísse para larguras de banda superiores, com menor atenuação e maior capacidade de transmissão de informação. Hoje em dia, as fibras ópticas são utilizadas nas mais diversas áreas incluindo a medicina e as telecomunicações, áreas que estiveram na sua origem (Figura 5).

que esta é uma área extremamente vasta, isto faz com que desenvolvimentos com múltiplas finalidades tenham sido alcançados. Neste sentido, alguns dos tópicos mais relevantes são as comunicações, os ecrãs, a saúde e medicina, a energia e a astronomia.

Comunicações

Tradicionalmente, as tecnologias ópticas têm sido usadas

na área das telecomunicações a longa distância (quilómetros), usando a fibra óptica como meio de transmissão de dados (ver caixa). Um exemplo óbvio é a internet. Mais recentemente, com o aparecimento e desenvolvimento das micro e nanotecnologias baseadas em dispositivos miniaturizados (normalmente apelidados *chips*), novas configurações propiciam comunicações a escalas muito reduzidas



Fig. 2 - Telescópio Yepun: formação de uma estrela artificial que é usada como referência para corrigir os efeitos da atmosfera e dos espelhos do telescópio na captação de imagens.

(desde alguns micrómetros até alguns centímetros). Desta forma, é possível utilizar a luz como meio de transmissão de informação entre chips e até mesmo no seu interior.

Ecrãs

Hoje, muita da tecnologia que nos rodeia usa como interface um ecrã, permitindo assim que haja interação entre o utilizador e a “máquina”. Esta interação pode ser apenas visual ou por meio do tacto. Exemplos destes dispositivos são as televisões, os ecrãs dos computadores, os *smartphones*, os *tablets*, ou até mesmo os mostradores de micro-ondas, de um relógio digital, entre outros. Existem vários tipos de ecrãs, tais como os do tipo CRT (tubo de raios catódicos), LCD (ecrã de cristais líquidos), plasma, outros baseados em LED (díodo emissor de luz), entre outros. Os CRT foram os primeiros a surgir, tornando-se comerciais em 1922. O seu funcionamento baseia-se num canhão de electrões que é disparado numa tela fluorescente e que permite assim a formação de imagens. No caso dos LCD e dos plasmas, ambos se baseiam em duas lâminas entre as quais há um cristal líquido ou um gás, respectivamente. Entretanto, quando estimulados electricamente, estes meios reagem, e em conjunto com outros mecanismos ocorre a formação de imagens. Relativamente aos ecrãs OLED, estes apareceram no mercado mais recentemente e são energeticamente mais eficientes do que os LCD. Neste caso, para que haja a criação de imagem, existe uma camada semicondutora composta por moléculas orgânicas que funciona como meio activo. Para além da enorme variedade de ecrãs, existe ainda tecnologia que permite que visualizemos a imagem em três dimensões, o que é normalmente conseguido com a ajuda de uns óculos apropriados baseados em efeitos de polarização.

Saúde e Medicina

A luz tem também tido um papel revolucionário no âmbito da medicina e da bioquímica. Esta tem sido usada como instrumento de diagnóstico (estudo) e de tratamento de doenças. Alguns dos pontos mais relevantes nesta área são: microscopia de alta

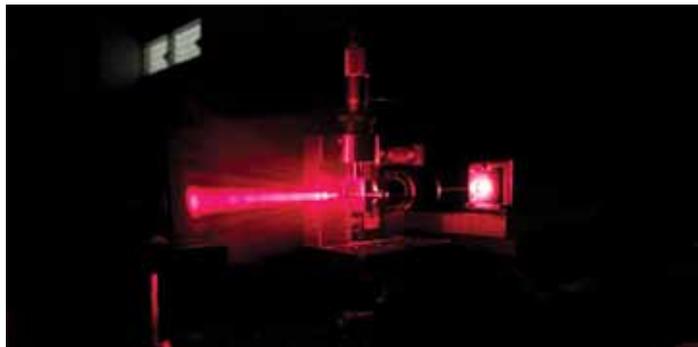


Fig. 3 - Expansão de um feixe laser, e projecção do seu padrão de Airy em três dimensões.

resolução, permitindo fazer imagens de células à escala nanométrica; espectroscopia, onde novas formas de absorção e fluorescência permitem perceber como certas reacções químicas e moleculares ocorrem ao nível celular; tomografia de difusão, no qual por exemplo o corpo humano pode ser iluminado, e a luz difundida é depois recolhida e as suas propriedades correlacionadas com as características do corpo humano, permitindo assim perceber se existe alguma anomalia, nomeadamente um tumor; na optogenética a luz é utilizada para controlar células vivas, normalmente neurónios, que foram alterados para que respondam a estímulos luminosos.

Energia

Uma vez que as energias não renováveis estão cada vez mais escassas e ao mesmo tempo a poluição atmosférica está a aumentar radicalmente, o uso da luz solar como energia renovável, é para todos benéfica e essencial. Os raios de luz que provêm do sol podem ser convertidos em energia através do uso de painéis térmicos e fotovoltaicos. Os primeiros são usados para converter a luz solar em energia que permite, por exemplo, aquecer água, já os segundos transformam a energia solar em electricidade através das células fotovoltaicas. O desafio atualmente passa por tornar estes conversores luz-electricidade mais eficientes, visto que os sistemas comerciais ainda estão muito aquém do pretendido com valores da ordem dos 20 % a 30 %.

Astronomia

Desde sempre a luz tem sido a portadora da informação das partes mais longínquas do cosmos. A descoberta e o desenvolvimento do telescópio permitiu uma rápida aceleração dos conhecimentos astronómicos e a confirmação e aplicação de fenómenos ópticos e físicos fundamentais, tais



Fig. 4 - Recombinação de três feixes laser guiados por um líquido, originando luz branca.

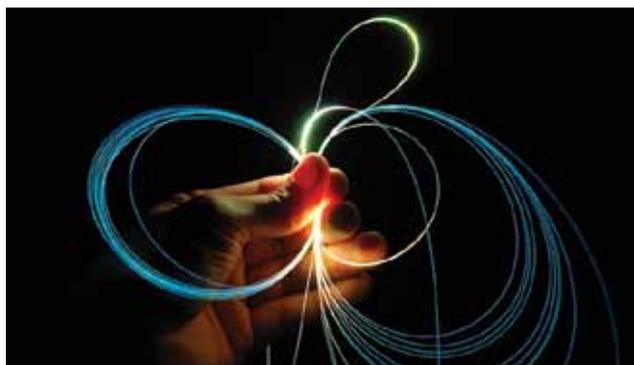


Fig. 5 - Fibra óptica.

como o efeito Doppler, o desvio de frequência gravitacional e a descomposição espectral. Esta última permitiu aos astrónomos determinar com grande precisão a composição de objectos astronómicos, assim como as condições físicas neles reinantes. Estes desenvolvimentos deram origem à astrofísica, e no seio desta a teoria da evolução estelar, à astronomia extragaláctica e eventualmente à cosmologia observacional (Figura 2). Mais recentemente, instrumentos de grande sensibilidade permitem detectar minúsculas variações de luminosidade das estrelas, levando por exemplo à detecção de planetas extrassolares.

O ano de 2015, eleito como Ano Internacional da Luz, marca um período de eventos e actividades que pretendem enfatizar a sua importância, não só como fenómeno, mas também como elemento tecnológico. Actualmente, seria irrealista imaginar o nosso mundo sem o domínio que o ser humano detém sobre a luz e a forma como a aplica. Este artigo pretende dar uma visão geral sobre a história da luz e as suas aplicações, no entanto ficou ainda muito por dizer.

Neste sentido, tecnologias emergentes como computadores quânticos, sistemas telescópicos avançados (James Webb Space Telescope), interferómetros de extrema precisão (10^{-18}) para detecção de ondas gravitacionais (LIGO), e novas microscopias destinadas ao preenchimento de lacunas existentes no conhecimento do corpo humano foram omitidas neste artigo, mas seguramente constituem grande parte do futuro fantástico tendo a luz como elemento de estudo fulcral.

Referências

Luís Miguel Bernardo, *Histórias da Luz e das Cores* (Editora da Universidade do Porto 2005, 2007, 2010)

Orfeu Bertolami, *O Livro das Escolhas Cósmicas* (Editora Gradiva 2006)

A. E. Willner, R. L. Byer, C. J. Chang-Hasnain, S. R. Forrest, H. Kressel, H. Kogelnik, G. J. Tearney, C. H. Townes, M. N. Zervas, *Optics and Photonics: Key Enabling Technologies*. Proc. IEEE 100 (Special Centennial Issue), 1604-1643 (2012).

Orfeu Bertolami e Jorge Páramos, *Einstein e a Descrição Unificada da Natureza*, *Gazeta de Física* 28, 3 (2005).

<http://ail2015.org/>

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

Por opção pessoal, os autores do texto não escrevem segundo o novo Acordo Ortográfico.



Ana Rita S. R. Ribeiro é licenciada e mestre em Física pela Faculdade de Ciência da Universidade do Porto (FCUP) desde 2012. Actualmente é aluna de doutoramento em Física na Universidade do Porto e no Centro de Fotónica Aplicada do INESC TEC. O tema do seu doutoramento relaciona-se com o desenvolvimento

de dispositivos em fibra óptica para a imobilização e manipulação celular, através da fabricação de lentes com características especiais. Parte do seu doutoramento foi feito em colaboração com o *MASDAR Institute* em Abu Dhabi.



Luís Coelho é licenciado em Engenharia Física (2005) e Mestre em Instrumentação e Microelectónica (2006) pela Universidade de Coimbra. Desenvolveu trabalho de instrumentação atómica e nuclear na experiência internacional *Xenon Direct Dark Matter Search* localizada em L'Aquila, Itália. Actualmente esta a

terminar o doutoramento em Física na FCUP no Centro de Fotónica Aplicada do INESC TEC, com o tema de filmes finos aplicados a sensores em fibras ópticas. A sua investigação actual envolve estudos de sensores em fibra óptica com camadas metálicas e dieléctricas com vista à monitorização de meios líquidos e gasosos, em particular óleos alimentares e hidrogénio, através de redes de período longo e plasmões de superfície.



Orfeu Bertolami nasceu em São Paulo, Brasil, em 1959. Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo em 1980, obteve o mestrado no Instituto de Física Teórica em São Paulo em 1983, o Grau Avançado em Matemática na Universidade de Cambridge no Reino Unido em 1984 e o doutoramento em física teórica na Universidade de Oxford em 1987. Foi, de 1991 a 2010, professor no Departamento de Física do Instituto Superior Técnico e é actualmente Professor Catedrático no Departamento de Física e Astronomia da FCUP. Os seus principais interesses centram-se nas áreas da astrofísica, cosmologia, física e propulsão espacial, gravitação clássica e quântica, e em teorias de cordas.



Ricardo André nasceu em New London, Estados Unidos, em 1989. Foi licenciado em Física pela FCUP em 2010 e obteve o mestrado em Engenharia Física também na FCUP em 2012. Actualmente é estudante de doutoramento em Física na FCUP e no laboratório associado INESC TEC, no

Centro de Fotónica Aplicada. No desenvolvimento do seu trabalho de doutoramento esteve já em centros de excelência na Eslovénia, na Alemanha e nos Emirados Árabes Unidos. O seu doutoramento centra-se no design e fabricação de micro e nano-estruturas em fibra óptica para a criação de sensores.

Prémios Nobel da Física em Óptica, Fotónica e áreas relacionadas

1901	Wilhelm C. Röntgen	em reconhecimento dos serviços extraordinários prestados pela descoberta dos raios, posteriormente nomeados em sua homenagem
1902	Pieter Zeeman e Hendrik A. Lorentz	em reconhecimento dos extraordinários serviços prestados através das suas pesquisas sobre a influência do magnetismo diante do fenómeno da radiação
1907	Albert A. Michelson	pelos seus instrumentos de precisão óptica e a investigação espectroscópica e metrológica feitas com a sua ajuda
1908	Gabriel Lippmann	pelo seu método de reproduzir fotografias coloridas baseado no fenómeno de Interferência
1909	Guglielmo Marconi e Karl F. Braun	pelas suas contribuições no desenvolvimento da telegrafia sem fios
1911	Wilhelm Wien	pelas suas descobertas sobre as leis que regem a radiação de calor
1914	Max von Laue	pela sua descoberta da difração de raios x por cristais
1915	William L. Bragg e Sir William H. Bragg	pelos seus serviços na análise da estrutura cristalina através do uso de raios x
1918	Max Planck	pelos serviços prestados no avanço da física através da descoberta de "quanta" de energia
1919	Johannes Stark	pela sua descoberta do efeito Doppler em raios anódicos e a divisão das linhas espectrais na presença de campos elétricos
1921	Albert Einstein	pelos serviços na física teórica e especialmente pela sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico
1922	Niels Bohr	pelos serviços na investigação da estrutura dos átomos e da radiação emanada por eles
1923	Robert A. Millikan	pelo seu estudo das cargas elétricas elementares e do efeito fotoelétrico
1930	Sir Chandrasekhara Raman	pelo seu estudo da dispersão da luz e por descrever o fenómeno de espalhamento inelástico da luz através da matéria
1932	Werner Heisenberg	pela criação da mecânica quântica, cuja aplicação levou à descoberta das formas alotrópicas do hidrogénio
1933	Erwin Schrödinger e Paul A. M. Dirac	pela descoberta de novas formas produtivas da teoria atómica
1944	Isidor I. Rabi	pelo seu método de ressonância para registo das propriedades magnéticas de núcleos atómicos
1953	Frederik Zernike	pela demonstração do método de contraste de fase, em especial pela invenção do microscópio de contraste de fase
1954	Max Born	pela pesquisa fundamental na mecânica quântica, especialmente pela sua interpretação estatística da função de onda
1955	Willis E. Lamb Polykarp Kusch	pelas suas descobertas sobre a estrutura fina do espectro de hidrogénio pela sua determinação precisa do momento magnético do electrão
1964	Charles H. Townes, Aleksandr M. Prokhorov e Nicolay G. Basov	por trabalho fundamental no campo da eletrónica quântica, que levou a construção de osciladores e amplificadores baseados no princípio maser-laser
1965	Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger e Richard P. Feynman	pelo trabalho fundamental na eletrodinâmica quântica, com profundas consequências para a física de partículas elementares
1966	Alfred Kastler	pela descoberta e desenvolvimento de métodos ópticos no estudo da ressonância hertziana nos átomos
1971	Dennis Gabor	pela invenção e desenvolvimento da holografia
1978	Robert W. Wilson e Arno Penzias	pela descoberta da radiação cósmica de fundo em micro-ondas
1981	Kai M. Seigbahn Arthur L. Schawlow e Nicolaas Bloembergen	pela contribuição no desenvolvimento da espectroscopia de electrões de alta resolução pelas contribuições no desenvolvimento da espectroscopia a laser
1988	Ernst Ruska Heinrich Rohrer e Gerd Binnig	por trabalhos fundamentais em óptica de electrões e pelo desenvolvimento do primeiro microscópio eletrónico pelo desenvolvimento do microscópio de efeito de túnel
1989	Norman F. Ramsey Wolfgang Paul e Hans G. Dehmelt	pela invenção do método de campos oscilantes separados, e o seu uso no maser de hidrogénio e em outros relógios atómicos pelo desenvolvimento da técnica <i>ion trap</i>
1997	William D. Phillips, Claude Cohen-Tannoudji e Steven Chu	pelo desenvolvimento de métodos de arrefecimento e captura de átomos com luz laser
2000	Herbert Kroemer e Zhores I. Alferov	pelo desenvolvimento de hetero-estruturas semiconductoras utilizadas em electrónica de altas velocidades e em optoeletrónica
2001	Carl Weiman, Wolfgang Ketterle e Eric Cornell	pela criação experimental do condensado de Bose-Einstein em gases diluídos de átomos alcalinos, e por estudos fundamentais das propriedades dos condensados
2005	Theodor W. Hänsch e John L. Hall Roy J. Glauber	pela contribuição no desenvolvimento da espectroscopia de precisão a laser, incluindo a técnica de pente de frequências pela contribuição na teoria quântica da coerência da luz
2006	George Smoot e John C. Mather	pela descoberta da forma de corpos negros e da anisotropia da radiação cósmica de fundo
2009	George E. Smith e Willard S. Boyle Charles K. Kao	pela invenção do dispositivo de carga acoplada (CCD) pelas realizações relativas à transmissão da luz através de fibras para a comunicação óptica
2012	Serge Haroche e David J. Wineland	por métodos experimentais inovadores que permitem a medição e a manipulação de sistemas quânticos individual
2014	Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura	pela invenção de díodos azuis emissores de luz que permitiram a criação de fontes de luz brilhantes e economizadoras de energia

A Luz: Natureza, Aplicações, Ficção

José Manuel N. V. Rebordão

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL)
Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas (LOLS), Departamento de Física
Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço (IA)

Jmrebordao@ciencias.ulisboa.pt

Este texto segue de perto a intervenção com o mesmo título que tem sido apresentada pelo autor em diversas sessões públicas para estudantes e para o público em geral no Ano Internacional da Luz. Ao invés da apresentação, profusamente ilustrada, este texto tem como objectivo confrontar o leitor, de uma forma contextualizada, com inúmeros conceitos, tecnologias e desafios, numa narrativa com os três principais pilares identificados no título. A falta de uma contextualização dificulta a apreensão do mundo dos fenómenos da luz. De alguma forma, pretende-se descrever um “mapa” (um dos muitos...) das coisas da Luz no início do século XXI.

1. Introdução

A Luz é certamente a única coisa que “entra pelos olhos adentro” de todos os que têm a sorte de não serem invisíveis. Todos “sabem” o que a luz é e o que se faz com ela! Uma vez reconhecida a sua natureza de onda electromagnética, a sua importância como sonda, como mediadora de informação ou causa de processos físicos e químicos na matéria, passou a ser manifesta. Desde o início do século XX, a Luz esteve, de alguma forma, por trás de três dezenas de prémios Nobel da Física, nos domínios da óptica, electromagnetismo, astrofísica, instrumentação, electrodinâmica, coerência, tecnologias, entre outros.

Com o advento do laser e com o desenvolvimento da tecnologia de outras fontes luminosas e dos sensores, bem

como com a melhor compreensão das propriedades da matéria nos canais de propagação, a luz precipitou o controlo ou a invenção de novas aplicações, reconhecendo-se hoje a sua função para o desenvolvimento sustentável. Foi por essa razão que a UNESCO lhe atribuiu em 2015 destaque com o Ano Internacional da Luz (Figura 1), oportunidade quase única para os cientistas e tecnólogos chamarem a atenção dos políticos e da sociedade em geral para as benfeitorias que dela podem decorrer para o bem comum.

E se as principais áreas de aplicação da Luz são de todos bem conhecidas e se podem organizar em torno da energia, iluminação, medicina e conhecimento do universo, é bom ter ainda presente que a **Fotónica** – ou electrónica da Luz – é um sector industrial pujante, imune às crises, diversificado, integrador de tecnologias e de conhecimento, gerador de emprego e que serve inúmeros mercados. Globalmente, a ubíqua fotónica representou em 2015 um volume de negócios anual superior a 500 mil milhões de EUR, cerca de 3,5 vezes superior ao PIB nacional (sem incluir os sistemas que integrem componentes ou subsistemas fotónicos) (Figura 2). Nascida independentemente da Electrónica, as duas áreas tendem a convergir na integração de tecnologias e na produção de sistemas. A fotónica do silício – bom detector mas mau emissor de luz – constitui



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015

Fig. 1 - Símbolo do Ano Internacional da Luz (2015).



Fig. 2 - Principais áreas de aplicação de componentes e sistemas fotónicos, em 2014.

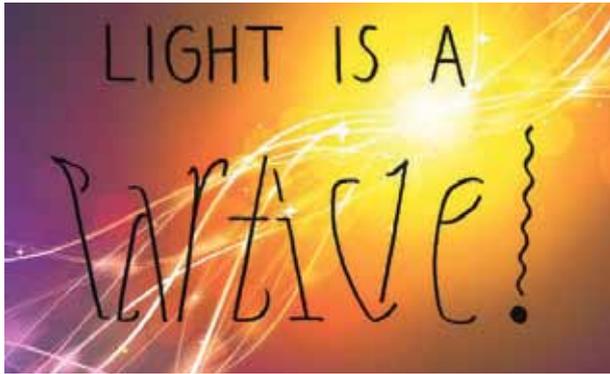


Fig. 3 - A Luz é ... onda (Wave) ou partícula (Particle)!

um alvo estratégico, dinamizando os casamentos entre materiais compatíveis mas com propriedades optoelectrónicas complementares, utilizando o comportamento das heterojunções, dos poços quânticos e dos materiais em formatos de menor dimensionalidade (1D ou 2D), como o grafeno.

2. Natureza

A Luz é representada por uma onda electromagnética e é também associada a um fluxo de partículas, os fótons. Nalgumas experiências invoca-se o paradigma ondulatório, noutras o paradigma corpuscular (bem conhecido através do efeito fotoeléctrico, por exemplo). Mais recentemente, surgiram indícios que nos põem na situação incómoda de lidar com ambos simultaneamente. As grandes dúvidas relativamente à forma de representar e/ou interpretar a natureza quântica da matéria não desapareceram da agenda da ciência (Figura 3).

Pragmaticamente, conhecem-se razoavelmente os modelos que nos permitem interpretar a experiência e fazer previsões, viabilizando-se sistemas de engenharia baseados em tecnologias robustas. Talvez as novas dimensionalidades associadas às folhas de grafeno (2D), aos condutores lineares (fios quânticos) ou aos desafios das implementações ópticas do Qubit, nos venham a confrontar com fenomenologia nova que nos obrigará a refrescar os paradigmas vigentes.

Que grandezas se utilizam para descrever a Luz? Certamente a distribuição espectral, a amplitude (de que decorre toda a radiometria), a polarização, a forma das superfícies de igual fase (a geometria do feixe) e a coerência (Figura 4). Quase todas admitem leituras – ou, no mínimo, interpretações - nos paradigmas ondulatório e corpuscular.

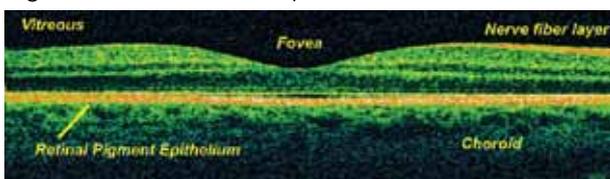


Fig. 4 - Tomografia de coerência óptica (ou OCT, de *Optical Coherence Tomography*). Um corte 2D na retina, beneficiando da coerência parcial da luz e de interferências, e com fortes semelhanças com a imagem ecográfica, com base em ultra-sons.

A Luz é relativamente fácil de descrever no vazio ou, em geral, em meios homogéneos, e quase sempre em meios lineares. Mas com lasers – que criam campos eléctricos superiores a 10^{11} V/m (a ordem de grandeza do campo eléctrico que actua o electrão no átomo de hidrogénio) nos volumes focais – a matéria deixa de responder linearmente. A relação linear simples $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$ (entre o campo eléctrico aplicado e a densidade de polarização induzida no meio, sendo χ a susceptibilidade dieléctrica) deixa de ser adequada e devem-se considerar termos de 2.^a, 3.^a, ..., ordens, de que decorrem fenómenos cada vez mais espantosos: $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E} + \chi^{(2)} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} + \chi^{(3)} \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} + \dots$. Esta equação é utilizada em conjunto com as equações de Maxwell e cabe ao cientista intuir qual a ordem bem como o tipo de objecto algébrico de que necessita para descrever adequadamente os fenómenos. Assim começou nos anos 60, pouco depois da invenção do laser, uma nova revolução científica e tecnológica, ainda hoje não esgotada.

Com a compreensão do comportamento não-linear da matéria houve mitos que caíram. Por exemplo, a frequência deixa de ser invariante, pode ser alterada quando um feixe intenso interage com a matéria (Figura 5). Tal como no som, surgem harmónicas, associadas à constituição de luz verde (ou ultravioleta com harmónicos de 3.^a ordem) a partir de radiação infravermelha. Feixes luminosos com diferentes frequências podem gerar outros feixes com frequências aditivas ou subtractivas, permitindo produzir radiação coerente em praticamente qualquer frequência do espectro. A luz passa a controlar a luz; não se trata de uma interacção directa fóton-fóton, pois o controlo exige a intervenção da matéria como mediadora. Estes fenómenos não lineares beneficiam da quase nula inércia dos electrões, o que se traduz em velocidades ou taxas dinâmicas espantosas que viabilizarão, porventura a médio prazo, a televisão holográfica, com todas as aplicações que dela podem decorrer: presença virtual em conferências, realidade alargada de enorme nível de realismo, etc.

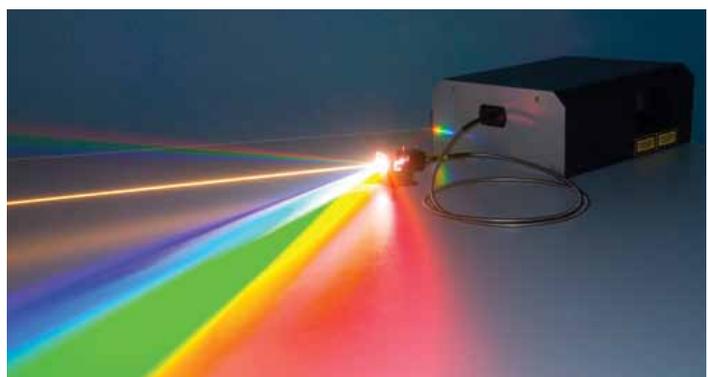


Fig. 5 - Dispersão típica de um feixe de um laser de Ti:Safira, (de femto-segundos), com geração de supercontínuo.

3. Aplicações

Na energia, o aquecimento de fluidos e a geração de electricidade com base no efeito fotovoltaico da radiação solar são de todos bem conhecidos. O Sol é, de facto, uma reserva infinita de energia, embora se trate de uma fonte descontínua, cuja irradiância à superfície da Terra varia do



Fig. 6 - Frigorífico solar, para distribuição de vacinas.

dia para a noite e com as condições atmosféricas. Apesar de tudo, as aplicações são inúmeras: os painéis fotovoltaicos ocupam áreas gigantescas em verdadeiras quintas solares, dezenas de milhares de metros quadrados na Estação Espacial Internacional, ou menos em virtualmente todos os satélites; telhas ou revestimentos de paredes incorporando painéis fotovoltaicos; estações de filtragem de água portáteis em regiões sem infra-estrutura de distribuição de electricidade, frigoríficos móveis para distribuição de vacinas (Figura 6)... Ninguém se pode admirar que a UNESCO, neste Ano Internacional, associe a fotónica à sustentabilidade e ao desenvolvimento! E, todavia, a conversão fotovoltaica tarda a ultrapassar a barreira dos 50 % de eficiência, por razões devidas à própria física dos materiais e dos processos (Figura 7). Deste modo, a investigação neste domínio continua intensa. É necessário aproveitar grande parte da radiação solar no domínio do infravermelho utilizando novos materiais (que não apenas o silício, que lhe é transparente), ou mesmo seqüências de materiais com diferentes valores

do hiato de energia (as chamadas heterojunções), ou obrigar os fótons a permanecer mais tempo nas estruturas semicondutoras para aumentar a probabilidade de criação de pares (e assim aumentar a corrente eléctrica), ou ainda, com materiais não-lineares, converter fótons infravermelhos em fótons visíveis de frequência superior, ou ainda...

Na iluminação, somos testemunha da brutal evolução dos sistemas. Nos últimos anos, passámos a comprar outras fontes luminosas, por exemplo baseadas em LED (Díodos Emissores de Luz), mas esta revolução silenciosa só foi possível com o controlo da tecnologia que viabilizou os LED azuis (um dos últimos prémios Nobel da Física, o de 2014). O azul é uma componente cromática fundamental para controlar o “branco” que, apesar das suas várias temperaturas de cor, se instituiu como referência de iluminação humanizada. Em casa, nos espaços públicos, nos automóveis, nos semáforos ou numa miríade de equipamentos, reduziu-se o consumo da electricidade utilizada na iluminação, reduziram-se as perdas pois geram-se feixes cuja direcionalidade é mais fácil de controlar; reduziu-se a poluição luminosa em termos radiométricos, embora tornando esta poluição mais rica nas componentes azuis e verdes, mais intensamente difundidas na atmosfera, e com consequências de que os zoólogos e os astrónomos só agora se começam a aperceber...

Nas comunicações ou TIC, as tecnologias da luz estão escondidas dos nossos olhos, mas beneficiamos do seu elevadíssimo desempenho. Ubíquas nas fontes laser e nos detectores nas extremidades das fibras ópticas; imperativas na amplificação do

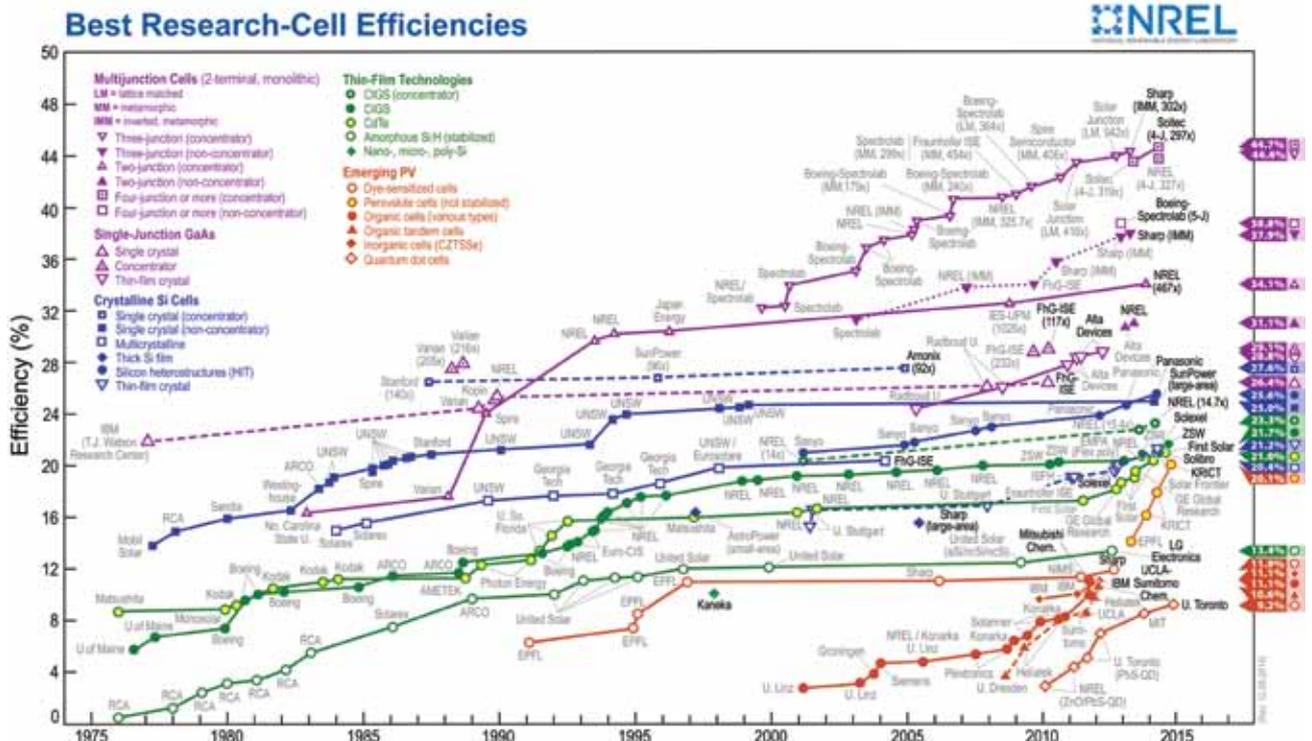


Fig. 7 - Evolução da eficiência das células fotovoltaicas ao longo do tempo.

sinal ou na constituição de canais ópticamente independentes que tornam possível os Tbit/s, através de multiplexagem por divisão de amplitude ou comprimento de onda; cada vez mais presentes em funções estritamente ópticas que têm lugar nos servidores que controlam a infra-estrutura de telecomunicações. Com eficácia já demonstrada, embora ainda restrita a aplicações específicas, a luz permite constituir canais ópticos ponto a ponto, a milhões de quilómetros de distância. O espaço exige-o na comunicação entre satélites ou no estabelecimento de uma internet planetária ou do sistema solar. Noutra escala, abundam já canais ópticos no interior de *chips* electrónicos, ligando secções distintas do mesmo circuito (agora verdadeiramente 3D); ou constituindo um *bus* óptico na ligação entre cartas independentes, substituindo ou simplificando os bem conhecidos barramentos, tão limitadores da velocidade e do desempenho de sistemas electrónicos e computacionais, aos quais se exigem hoje débitos binários que ontem seriam considerados ficção científica. Nas mesmas fibras ópticas da internet podem-se implementar sensores (de temperatura, pressão, curvatura, campos eléctrico ou magnético, e muitos mais), utilizando técnicas de micro ou nano-maquinação para afectar o índice de refração das fibras, de forma pontual ou periódica. Tais sensores podem-se implementar em estruturas, edifícios, pontes, peças de vestuário – por exemplo – para monitorizar em contínuo funções vitais. Ou simplesmente para criar novas sensações visuais ou mesmo artísticas.

No conhecimento do cosmos e da Terra no Universo, a Luz é o mediador por excelência. Existem instrumentos que operam em quase todo o espectro electromagnético, em bandas mais ou menos estreitas, aproveitando as janelas de transparência dos meios de comunicação; às vezes utiliza-se a polarização da radiação, outras vezes a frequência ou a amplitude; colectando energia electromagnética, beneficiando de arquitecturas e princípios de

funcionamento variados, e detectando-a com uma enorme variedade de sensores desenvolvidos por gerações de cientistas desde os tempos da 2.^a Guerra Mundial. É impossível imaginar como poderia ter evoluído a noção que o Homem tem do Universo sem recorrer às imagens ópticas, radar, interferométricas, aos instrumentos respectivos e às infra-estruturas terrestres (grandes telescópios) ou espaciais (satélites) que os alojam, e que motivam e dão coerência ao trabalho de milhares de cientistas, tecnólogos e engenheiros, e que são financiadas pelos estados para que estejam na primeira linha da investigação e de domínio das tecnologias e engenharias que viabilizam tais infra-estruturas, pelo seu impacto na vida da sociedade.

Com a mesma tecnologia que se utiliza para olhar para o cosmos, olha-se também para a Terra, e aprende-se como funcionam os seus sistemas (atmosfera, hidrosfera, geosfera) e como o homem os afecta, num exercício recheado de aplicações em meteorologia, cartografia, geodesia, recursos naturais, riscos. Tudo isso se banalizou tanto com o *Google Earth* (e produtos concorrentes), que se perdeu a noção do tempo e engenho necessários para garantir o controlo quase perfeito de todos os sistemas utilizados, aos quais se exige disponibilidade e operacionalidade quase totais.

Com tecnologias afins ou muito semelhantes se olha para dentro do corpo humano, em diferentes escalas, para diagnóstico, monitorização ou intervenção, utilizando radiações cujo comportamento em meios túrbidos (parcialmente absorvedores e, sobretudo, difusores) coloca dificuldades extremas para “ver através” ou fazer chegar energia a localizações muito bem definidas e sem irradiar excessivamente a vizinhança. Utilizando técnicas de óptica adaptativa (semelhantes às da astronomia) (Figura 8), elementos difractivos de tipo holográfico para compensar a difusão, pré-deformando a radiação mediadora, inventando novas microscopias (confocal, multi-fotónicas) para ultrapassar os limites impostos pela óptica electromagnética e tipicamente associados ao nome de Airy (matemático e astrónomo britânico do século XIX), invocando efeitos não-lineares dos materiais, pouco prováveis no percurso de feixes luminosos excepto em pequenas zonas do seu volume focal, o diagnóstico e intervenção pela imagem impôs-se como ferramenta clínica, criou ramos novos da indústria e, sobretudo, revolucionou o conhecimento que se tem do funcionamento das células, tecidos e órgãos, nos vários reinos da biosfera.

Em paralelo, a mesma biosfera que nos convidou a inovar e a perceber melhor a sua natureza, através da observação

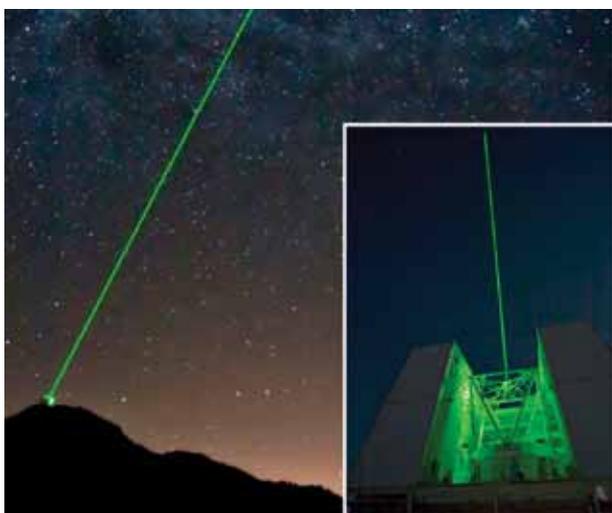


Fig. 8 - Óptica Adaptativa: lasers em telescópios no solo permitem criar estrelas sintéticas na atmosfera a cerca de 100 km.



Fig. 9 - Manto de invisibilidade de Harry Potter.

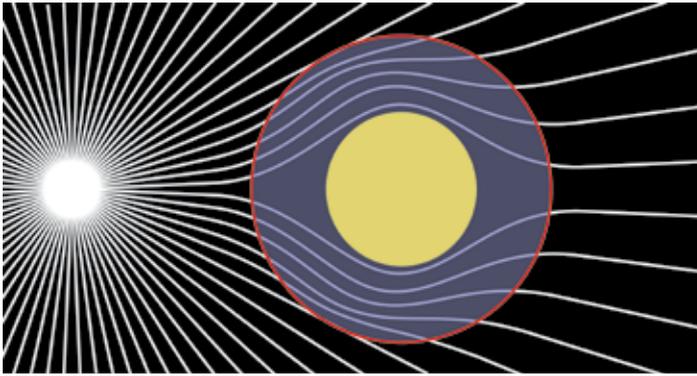


Fig. 10 - Como tornar um objecto invisível através de um revestimento que difracte a luz convenientemente.

de fenómenos e efeitos naturais em animais e plantas, inspirou a opto-biomimética, convidando o homem a criar tecnologias que imitam a realidade biológica, em filtros cromáticos ou espectrais, com base na difracção (vectorial) da luz, formas de acoplamento luminoso entre diferentes meios, ou sistemas visuais multicanal, para apenas citar alguns.

4. Ficção

Têm entrado no nosso imaginário inúmeros fenómenos luminosos, muitas vezes associados à ficção. Alimentam-nos a imaginação e, insidiosamente, diluem a fronteira entre o sonho e a realidade. Na perspectiva da ciência, e como Michio Kaku muito bem tipificou, há fantasias que em nada violam as leis da física e que, mais cedo ou mais tarde (às vezes já hoje), disponíveis as tecnologias, os materiais ou as capacidades de engenharia, verão a luz; é uma questão de tempo, a diferença entre um horizonte de 10 a 20 anos (com tecnologias já existentes embora insuficientes), ou um horizonte mais secular (com tecnologias hoje inimagináveis). Noutros casos, todavia, há violação clara das leis da física, tal como as conhecemos actualmente, e tais fenómenos estão no domínio da fantasia pura, da ficção mais ilusória.

A invisibilidade é um exemplo. Fantasia ou realidade? (Figura 9) Face à forma como actualmente descrevemos a interacção entre a radiação e a matéria, tornar um objecto invisível é revesti-lo com uma camada com propriedades ópticas muito específicas: a luz que o ilumina – e que por difusão e difracção o torna visível para um observador comum – deve ser guiada ou difractada de modo a contorná-lo, reemergindo do lado oposto com as mesmas propriedades direccionais (Figura 10). O observador não distinguiria a situação em que o objecto estivesse escondido, da situação em que recolhesse directamente a radiação da fonte luminosa. Será isto possível? Será isto viável para qualquer comprimento de onda e para qualquer geometria relativa entre a fonte, o objecto e o observador? A resposta à primeira pergunta é positiva; à segunda é negativa. Existem materiais de indi-



Fig. 11 - Metamateriais feitos para grandes comprimentos de onda.



Fig. 12 - Caracterização electromagnética de materiais, espaço (ϵ , μ).

ce de refracção negativa – os meta-materiais, por exemplo – que assegurariam que a difracção tivesse as propriedades necessárias para tornar um determinado objecto invisível, no anterior entendimento de invisibilidade. Os materiais nano-estruturados não são materiais naturais (Figura 11); são feitos pelo homem com base em materiais com diferentes valores da permissividade eléctrica e da permeabilidade magnética (Figura 12). Todavia, a forma como tais materiais guiam e difractam a luz depende criticamente do comprimento de onda, da geometria do objecto e das posições relativas da fonte e do observador. A “pele” que tornaria um objecto invisível num dado contexto, não serviria para outro contexto ou para outro objecto. A sua adaptabilidade (e note-se que já se fabricam materiais funcionais adaptativos) não seria impossível de imaginar, pois não violaria em princípio nenhuma lei da física, mas não imaginamos hoje, sequer, com que tecnologias a poderíamos implementar, garantindo ainda a invisibilidade do conjunto. A invisibilidade que o manto de Harry Potter lhe confere está portanto naquela zona difusa, suficientemente viável para nos manter a imaginação activa, suficientemente longínqua para nos fazer aguçar o engenho!

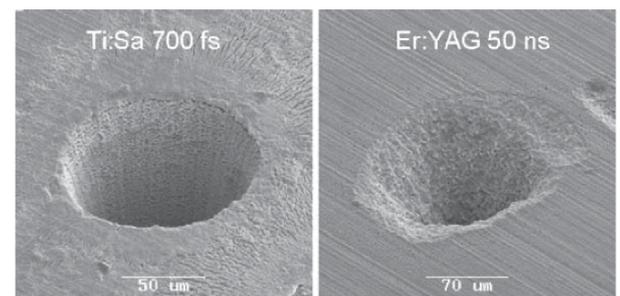


Fig. 13 - Compare-se a furação laser, no infravermelho, em dois regimes distintos (térmico, à direita).

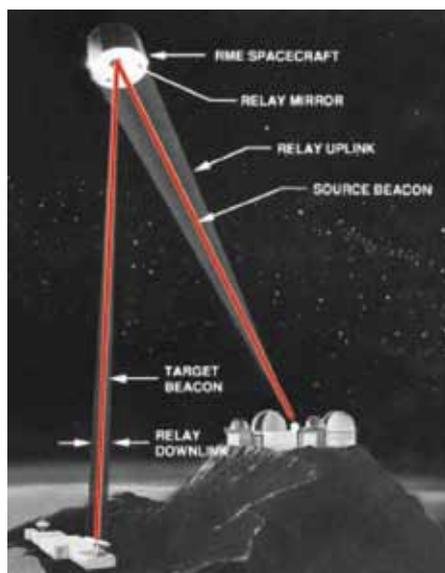


Fig. 14 - *Relay Mirror Experiment* (RME, 1990): um dos demonstradores da Iniciativa de Defesa Estratégica americana para fazer incidir um feixe laser em qualquer alvo, no espaço ou na terra, utilizando reflectores espaciais em órbita. No essencial, os conceitos e as tecnologias necessárias foram desenvolvidas.

Os sistemas de energia dirigida constituem outro bom exemplo. Há descrições antigas da utilização de espelhos para direccionar a energia solar e incendiar objectos longínquos. Mais próximo de nós, existem campos de concentradores solares (quintas solares) que reorientam a radiação solar para uma torre de aquecimento de um fluido (água, tipicamente) e geração de vapor para efeitos de produção de electricidade. A radiação electromagnética dirigida adquiriu uma visibilidade totalmente diferente com o laser, que já produz radiação bastante direccionada e que, com lentes ou espelhos adequados, permite atingir irradiâncias (W/m^2) elevadíssimas no volume focal, despoletando transformações de fase (sólido – líquido – gasoso, ou mesmo sublimação directa) ou - no caso de impulsos luminosos muito curtos e valores de campo eléctrico muito elevados - provocando a disrupção da matéria por ionização: os materiais não aquecem mas “rasgam-se”. A micro ou nano-maquinação laser (Figura 13) de materiais (metálicos, não metálicos, biológicos, ...) revolucionou completamente as técnicas de fabrico. Fazendo uso da resposta térmica dos materiais (para funcionamento contínuo ou impulsos com duração de nanossegundos), da sua ionização ou das respostas não-lineares (impulsos picossegundos e femtossegundos), a actuação disruptiva à distância, virtualmente à velocidade da luz, abriu outras portas da imaginação, bem alimentada pela ficção ou pelo cinema. Mas... como é afinal?

É verdade que a tecnologia permite embarcar lasers potentes em aviões e atingir mísseis a quilómetros de distância. Os objectos podem estar em linha de vista, ou serem utilizados espelhos em satélites para redireccionar o feixe para a localização do alvo. O guião da “guerra das estrelas” de Ronald Reagan foi

parcialmente executado (Figura 14). Mas ... os sistemas são extraordinariamente exigentes em energia, e muitas aplicações, mormente de natureza militar, confrontam-se com o peso, volume e relativa ineficácia das fontes de energia que devem ter a mobilidade táctica necessária. Por outro lado, alvos longínquos ou parcialmente protegidos obrigam o feixe luminoso a percorrer grandes distâncias no meio de propagação, seja ele a atmosfera ou meios biológicos túrbidos, em que alvos se encontrem. A sua não uniformidade gera difusão por difracção (*scattering*), a sua dinâmica natural (no caso da atmosfera associada ao movimento das diferentes massas de ar com propriedade ópticas distintas) causadora de turbulência, obrigam à configuração de sistemas complexos que podem beneficiar de óptica adaptativa, de sistemas de seguimento activos, de formas de posicionar fontes pontuais próximas do alvo para funcionarem como estrelas sintéticas, de pré-deformações da radiação laser para que, de alguma forma, a subsequente difusão reduza a anterior degradação – e tudo isto com cadências operacionais muito elevadas (no caso da atmosfera) sobretudo no caso de alvos móveis – ou com alvos extraordinariamente pouco cooperativos (no caso de materiais biológicos). Estamos pois confrontados com aplicações que não violam as leis da física, mas que exigem tecnologias cujo desempenho deve evoluir significativamente antes de se poderem considerar banais.

5. Conclusões

É uma petulância procurar condensar em poucas palavras as múltiplas dimensões da Luz. Ou explorar um glossário de óptica ou de fotónica, ignorando a ordem alfabética e contextualizando os inúmeros fenómenos, conceitos e teoremas. É um exercício impossível e as três dimensões que escolhi (natureza, aplicações e ficção) são tão arbitrarias e tão insuficientes como quaisquer outras. Mas é certamente uma narrativa que pode satisfazer a forma como alguns tendem a arrumar a informação.

A história da Luz começou numa data desconhecida. Há pouco menos de um milénio, o cientista árabe Alhazen edificou o que muitos consideram um primeiro marco do resultado da reflexão humana sobre a Luz, no seu *Livro de Óptica*. Desde então, a Luz passou a ser considerada como um tema de estudo da Ciência, em todas as suas vertentes, designadamente por força da sua relevância na visão. A partir de Maxwell a evolução foi fulminante. Ainda hoje o está a ser. A Luz provocou a disrupção do paradigma clássico no início do século XX e faz parte da arena conceptual da relatividade geral. É o mediador por excelência, ajuda-nos a interrogar os sistemas longínquos e força-nos continuamente a adaptar a teoria. Mantém-nos reféns de ambiguidades ainda hoje por resolver. Não sabemos o que é a Luz. Sabemos usá-la. Sabemos senti-la. Abusamos dela através da metáfora. Sofremos com a sua ausência. Tememos as trevas. Para o bem e para o mal, anima-nos a imaginação. Ininterruptamente, nalgumas décadas de forma frenética, a ciência devolve-nos a imaginação transformada em realidade. E não mais deixamos de querer mais.

Fontes das imagens

- Fig. 1 - <http://www.light2015.org/Home.html>
- Fig. 2 - Desconhecida
- Fig. 3 - www.fromquarkstoquasars.com
- Fig. 4 - http://www.wikiwand.com/nl/Optische_coherentietomografie
- Fig. 5 - <http://www.photonicsonline.com/doc/powerful-supercontinuum-sources-and-accessori-0001>
- Fig. 6 - Citado por EDN Network, <http://www.edn.com/electronics-news/4325545/Photovoltaic-Application>, 2008, desenvolvido pela companhia finlandesa NAPS Systems
- Fig. 7 - Diagrama gerado e mantido pelo National Renewable Energy Laboratory, <http://phys.org/news/2014-12-nrel-efficiency-solar-cell.html>
- Fig. 8 - Imagem de Thomas Stalcup, citada em <http://spie.org/x34285.xml>
- Fig. 9 - Warner Bros, citado por NME, <http://www.nme.com/filmandtv/news/new-york-scientists-reveal-harry-potter-inspired-c/360642>
- Fig. 10 - Adaptado de Bogdan Alex em <http://www.techpin.com/2008/08/page/11/>
- Fig. 11 - David R. Smith, Duke University, <http://people.ee.duke.edu/~drsmith/>
- Fig. 12 - Adaptado de Pendry, Optics Express (2003)
- Fig. 13 - <http://bme240.eng.uci.edu/students/10s/mwinkle1/applications.html>
- Fig. 14 - Desconhecida

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



José Manuel Rebordão, de 59 anos, é doutorado e agregado em Física, e investigador coordenador da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa desde 2009, onde actualmente exerce funções de subdirector, docente, investigador e presidente da Fundação da FCUL. É coordenador do 3.º ciclo em

Engenharia Física. Esteve ligado ao INETI desde 1979 até à sua extinção. A sua área científica é a óptica (analógica e digital), que tem aplicado em áreas tão diversas como a instrumentação, metrologia, espaço, defesa, segurança e astrofísica, através de contractos de serviços de I&D, quase todos com empresas ou com organizações e agências internacionais. Assegurou funções institucionais no contexto do Ministério da Economia ou do Ministério da Ciência no contexto de organizações internacionais de ciência e tecnologia.

Luz e património cultural

Francisco P. S. C. Gil

Centro de Física da Universidade de Coimbra (CFisUC)

A “luz”, num sentido lato, consiste na propagação de perturbações de campos eléctrico e magnético, ou seja em ondas electromagnéticas. A sua origem e a forma como interage com a matéria obedece a condições específicas suas e da matéria. Por isso, conseguindo analisar as características da “luz” que é produzida por uma fonte de “luz” e da que é absorvida, difundida, modificada numa palavra, pela matéria, pode conhecer-se as características da matéria a observar.

A conjugação entre técnicas de análise de materiais usando ou não “luz” (pode ser visível ou invisível como raios γ , raios x, ultra-violeta, infra-vermelho, micro-ondas ou ondas rádio), permite o conhecimento da sua constituição e suas propriedades físicas e químicas, assim como das suas potencialidades em termos de aplicações tecnológicas, por exemplo.

Uma das áreas de aplicação de técnicas de análise de materiais que tem vindo a crescer nas últimas décadas é o estudo do património cultural material, como por exemplo obras de arte em pintura, escultura, cerâmica, metais e vidros, e pinturas murais, etc.

A informação que se pode obter, cruzando os resultados das análises por várias técnicas dos materiais que compõem um objecto, permite, além de se saber que materiais foram aplicados e a sua origem, conhecer a sua contextualização histórica e evolução temporal (observando, por exemplo, repinturas, restauros, suportes, técnicas de aplicação dos materiais nos suportes, etc.), bem como a sua evolução em termos de estabilidade e possível degradação ou alteração, em função das condições ambientais. Estas informações podem também ajudar a planear acções de prevenção, preservação, conservação e restauro adequadas a cada caso.

Das técnicas analíticas mais usadas actualmente neste contexto, são de destacar as técnicas de microscopia óptica, espectroscopia de absorção no

infra-vermelho, espectroscopia de difusão Raman, espectroscopia de fluorescência de raios x, difracção de raios x, microscopia electrónica associada a espectroscopia de fluorescência de raios x, imagiologia, manipulação de imagens multi-espectrais e reflectometria no visível e infra-vermelho [1-12].

Para o estudo de cada caso, usar-se-ão as técnicas mais adequadas. Veja-se, por exemplo, que num caso de análise de materiais de origem mineral, grande parte deles apresentando estrutura cristalina, a técnica de difracção de raios x mostra-se muito poderosa. Contudo, para análise de vidros (de um vitral, por exemplo) essa técnica já não é a mais adequada, recorrendo-se a outras alternativas. Neste caso, para analisar os materiais que conferem a cor aos vidros, pode usar-se com grande proveito a técnica de fluorescência de raios x. Esta mesma técnica pode ser usada no estudo de documentos gráficos. No caso do estudo de pigmentos, tanto a espectroscopia Raman, como a espectroscopia de absorção no infra-vermelho, a difracção de raios x (só para pigmentos com estrutura cristalina) ou a fluorescência de raios x podem dar informação relevante para a sua identificação, assim como para a sua possível degradação ou forma de aplicação (no caso do estudo dos aglutinantes, não é útil o uso de difracção de raios x).

Como exemplo de aplicação, apresenta-se o caso dos túmulos em pedra de Ançã policromados da Rainha San-



Fig. 1a - Túmulo da Rainha Santa Isabel. Mosteiro de Santa Clara-a-Nova, Coimbra



Fig. 1b - Túmulo da neta da Rainha Santa Isabel. Mosteiro de Santa Clara-a-Nova, Coimbra

ta Isabel e de sua neta Isabel, executados provavelmente pelo mesmo autor ou oficina (mestre Pero), no século XIV, e colocados no mosteiro de Santa Clara-a-Nova em Coimbra (Figuras 1a e 1b). Enquanto o túmulo da rainha apresenta em alguns locais cinco camadas de pintura, o túmulo da neta apresenta apenas duas camadas. A camada mais interior é semelhante nos dois túmulos, com materiais comuns como azurite, branco de chumbo e vermelho de chumbo e com ouro, tornando a decoração mais rica. Na última camada de ambos os túmulos, foram detectados materiais muito pobres e de fraca qualidade. Como exemplo disso, enquanto o túmulo da neta já não tem dourado, o túmulo da rainha apresenta um dourado constituído por purpurina. Além desta análise, surgiu a necessidade e interesse em analisar um túmulo existente no mesmo local que é assumido como sendo o túmulo da duquesa de Coimbra, Isabel de Urgel, dos fins do século XV (Figura 1c). Segundo escritos do século XVII, as pinturas de todos estes túmulos seria 'recente' nas faces laterais, o que levou a tentar descobrir se a pintura mais interior dos três túmulos seria contemporânea. De facto, os materiais dessa camada em todos os túmulos são semelhantes. Contudo o estudo terá que prosseguir no sentido de apurar, entre outras coisas, se a composição do ouro aplicado em todos é semelhante [5].



Fig. 1c - Túmulo de Isabel de Urgel. Mosteiro de Santa Clara-a-Nova, Coimbra



Fig. 2a - Ressurreição de Cristo - mestres de Ferreirim. Lamego, Igreja de Santo António de Ferreirim.

Outro exemplo de estudo é a comparação entre obras dos chamados mestres de Ferreirim (Mosteiro de Ferreirim, Figura 2a) e obras atribuídas à oficina de João de Ruão, todas do século XVI (Museu Nacional de Machado de Castro, Figura 2b) [trabalho desenvolvido no âmbito do projecto POCI/HEC/55536/2004 – Esculturas de João de Ruão – classificação e caracterização através da análise de pigmentos]. Das primeiras obras, pinturas a óleo sobre madeira, verificou-se que os pigmentos usados eram comuns em termos de uso e de valor (azurite e vermelho de chumbo), enquanto que os pigmentos usados nas primeiras camadas pictóricas das segundas obras, esculturas em pedra de



Fig. 2b - Lactação de S. Bernardo - João de Ruão. Museu Nacional de Machado de Castro. MNMC849 | BIN.

Anã policromadas, eram pigmentos caros para a época, como azul ultramarino natural (componente azul do mineral lápis-lazúli) e vermelhão (do mineral cinábrio). Além disso, nas primeiras os dourados foram obtidos por técnicas de velatura (camada de amarelo de chumbo e estanho sobre vermelho de chumbo), enquanto nas segundas foi usado ouro. Estes resultados foram muito úteis para caracterizar obras contemporâneas de autores diferentes [2 e 3].

Por último, o estudo dos revestimentos das casas comuns de habitação do Centro Histórico de

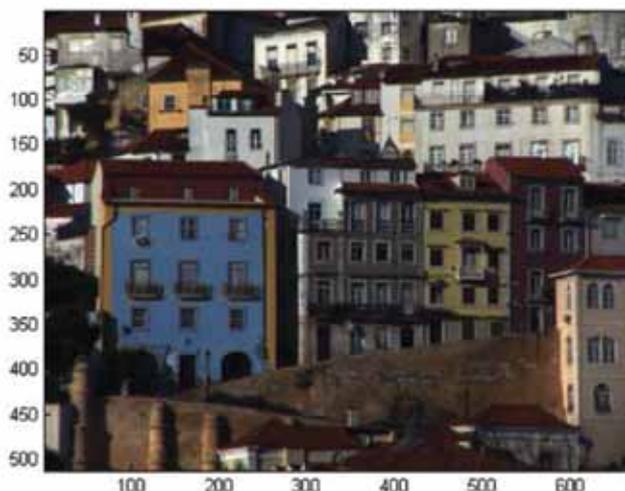


Fig. 3 - Substituição de cor da fachada de alguns edifícios do Centro Histórico de Coimbra e informação de textura da imagem, usando imagens multi-espectrais.

Coimbra¹ revelou a evolução temporal dos gostos e técnicas de revestimentos em termos dos materiais usados nas argamassas, barramentos e coloração. A propósito deste último ponto, o conhecimento dos materiais utilizados nas várias épocas de vida dos edifícios de habitação, permitiu visualizar o aspecto de cada edifício isoladamente, no seu conjunto de rua e no seu conjunto de cidade, usando técnicas de espectroscopia de reflectância no visível e de aquisição e manipulação de imagens multi-espectrais (trabalho desenvolvido em colaboração com o Prof. Dr. Paulo Fiadeiro da UBI). Este estudo permitiu, por exemplo visualizar o aspecto de revestimentos de épocas passadas, respeitando os verdadeiros materiais existentes, assim como a sua textura, não perdendo informação em termos espectrais (Figura 3). Permitiu também trocar a textura por uma outra existente no passado, mantendo a informação de cor [6, 7, 9, 10, 11 e 12].

Agradecimentos

Agradece-se à Confraria da Rainha Santa Isabel, ao Museu Nacional de Machado de Castro e ao Mosteiro de Ferreirim, o acesso às obras de arte estudadas.

¹ Trabalho desenvolvido no âmbito do projecto PTDC/AUR-URB/113635/2009 - FCOMP - 01 0124 - FEDER - 014163 - Os revestimentos e os acabamentos nos centros históricos entre tradição e modernidade - bases para um plano de acção e de salvaguarda do Centro Histórico de Coimbra.

Referências

1. I. Osticioli, N.F.C. Mendes, A. Nevin, Francisco P.S.C. Gil, M. Becucci, e E. Castellucci, "Analysis of natural and artificial ultramarine blue pigments using Laser Induced Breakdown and pulsed Raman Spectroscopy, statistical analysis and light microscopy", *Spectrochimica Acta Part A* 73(3) (2009), 525-531.
2. Maria-João Benquerença, N.F.C. Mendes, E. Castellucci, Vítor M.F. Gaspar, e Francisco P.S.C. Gil, "Micro-Raman Spectroscopy analysis of XVIth century portuguese Ferreirim masters oil paintings", *Journal of Raman Spectroscopy* 40(12) (2009), 2135-2143.
3. Isabel Matias, Eduardo Oliveira, Nuno Gonçalves, N. Mendes, Ramos Silva, Matos Beja e Francisco Gil, "João de Ruão sculptures - characterisation through pigment analysis", Newsletter 2, 2010. 11-14 *Sculpture, Polychromy and Architectural Decoration - ICOM Committee for Conservation Triennium 2008-2011*.
4. M. Ramos Silva, J.E.G. Oliveira, F.P.S.C. Gil, A. Matos Beja, e C.G. Alarcão, "Powder diffraction studies and Raman analysis of two XVIth century altarpieces", *24th European Crystallographic Meeting - ECM24*, Marrakesh, Morocco, 22-27 Ago. 2007.
5. Luís C.G.N. Freire, André F.V. Cortez, M. Fernanda P. Silva, Vítor M.F. Gaspar, M. Ramos Silva, A. Matos Beja, Francisco J.P.P. Macedo, e Francisco P.S.C. Gil, "XIVth century tombs studied by X-ray techniques", *European Conference on X-ray Spectrometry*, EXRS2010, 20-25 Jun. 2010, Figueira da Foz, Portugal.
6. Lidia Catarino, Tiago M.S. Duarte, Francisco P.S.C. Gil, J. R. Mendes da Silva, e Luís Freire, "Characterization of Coimbra's Historic Centre coatings and finishes", *3rd Historic Mortars Conference*, 11-14 September 2013, Glasgow, Scotland.
7. Tiago M.S. Duarte, Lidia Catarino, Francisco P.S.C. Gil, e J. R. Mendes da Silva, "Study of lime mortars specimens for the Coimbra's Historic Centre coatings rehabilitation", *3rd Historic Mortars Conference*, 11-14 September 2013, Glasgow, Scotland.
8. F. M. P. B. Ferreira, P. T. Fiadeiro, S. M. C. Nascimento, M. J. T. Pereira, e J. M. D. P. Bernardo, "Comparing Two Alternative Approaches for Hyperspectral Imaging of Art Paintings", *Proceedings of Non-destructive and Microanalytical Techniques in Art and Cultural Heritage - TECHNART 2007*, O13, (2007).
9. Luís Freire, Francisco Brardo, Francisco Gil, e Paulo Fiadeiro, "Digital Hyperspectral Imaging Applied to the Characterization of Coatings and Finishes in Historic Buildings", *5th International Congress on: "Science and technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin"*, 22-25 Nov. 2011, Istanbul, Turkey.
10. Pedro Providência, Luís Freire, Francisco Brardo, Lídia Catarino, José Aguiar, Paulo Fiadeiro, e Francisco Gil, "Colorimetric characterization of (historic) coverings based on the hyperspectral method", *5th International Congress on: "Science and technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin"*, 22- 25 Nov. 2011, Istanbul, Turkey.
11. Luís Freire, Francisco Brardo, Jorge Santos, Lídia Catarino, Paulo Fiadeiro, e Francisco Gil, "Characterization of historic buildings coverings based on spectral methods", *XXIII Reunión Nacional de Espectroscopia VII Congreso Ibérico de Espectroscopia - Córdoba 2012*, 17-20 Set. 2012.
12. Luís C. G. N. Freire, J. L. A. Santos, Francisco P. S. C. Gil, F. M. P. B. Ferreira, e P. T. Fiadeiro, "Color appearance reconstruction of old building paints in the historic centre of Coimbra using hyper-spectral images", *RIAO/OPTILAS 2013*, 22-26 Jul. 2013, FCUP, Porto, Portugal.

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



Francisco Paulo de Sá Campos Gil

é Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Coimbra (UC). É vice-coordenador do Mestrado em Património Cultural e Museologia da Faculdade de Letras da UC, em parceria com a Faculdade de Ciências e Tecnologia da UC. É Investigador Principal dos projectos POCI/HEC/55536/2004 – "Esculturas de João de Ruão – classificação e caracterização através da análise de pigmentos" e PTDC/AUR-URB/113635/2009 – FCOMP – 01 0124 – FEDER - 014163 – "Os revestimentos e os acabamentos nos centros históricos entre tradição e modernidade – bases para um plano de acção e de salvaguarda do Centro Histórico de Coimbra". Foi elemento da organização do colóquio *Visões da Luz*, 1-3 Outubro 2015, Instituto da Investigação Interdisciplinar, Universidade de Coimbra.

A Luz na pintura europeia medieval e moderna - Visões do mundo

Pedro Redol

Mosteiro de Santa Maria da Vitória, Largo Infante D. Henrique, 2440-109 Batalha

predol@mbatalha.dgpc.pt

Resumo

O tema da luz constitui um ponto de observação extremamente fecundo para o conhecimento da mundividência do Ocidente europeu, na transição do período medieval para a época moderna. Na expressão pictórica, confluem testemunhos de apropriação do real dominados por esta temática que são transversais à poesia, à filosofia e à vivência do quotidiano, ilustrando o estado embrionário do conhecimento científico e tecnológico, e a construção de um novo paradigma a partir de profundas e demoradas transformações mentais.

Abstract

The topic of light is quite a prolific viewpoint in the understanding of the Western Weltanschauung from the Middle Ages to the Renaissance. Evidence regarding the appropriation of the real as to this particular topic that also shows up in poetry, philosophy and daily life converges in painting. It illustrates the rudimentary state of scientific and technological knowledge and the setting up of a new paradigm relying on profound and slow cultural and mental change.

A palavra “luz” associada à arte medieval remete-nos imediatamente para os vitrais das grandes catedrais góticas francesas, em particular a de Chartres, que conservou a maior parte dos seus vitrais antigos, e para a dimensão imaterial da atmosfera interior destes edifícios. Apesar da distância temporal a que nos encontramos dos seus criadores e obreiros, sentimo-nos elevados. A Sainte-Chapelle (Figura 1), na Ilha de França, consagrada em 1248, único edifício subsistente do palácio do rei Luís IX (depois S. Luís), é o melhor exemplo da desmaterialização das paredes de uma igreja através da substituição dos seus muros por vitrais.



Fig. 1 - Interior da Sainte- Chapelle, Paris, 1246-8.
Fonte: <http://www.wga.hu>

Desconhecem-se as origens precisas dessa forma de pintura monumental, tão própria da Idade Média, que foi o vitral, distinta das demais disciplinas pictóricas pelo facto de “pintar” com a luz que atravessa o vidro. Do Mosteiro de Lorsch, não longe de Darmstadt, e da Abadia de Wissembourg, em plena Alsácia, provêm os fragmentos mais antigos de vitrais que se conhecem, datados entre 1050 e 1070 aproximadamente. Representam, com toda a probabilidade, o rosto de Cristo, testemunhando que os preceitos técnicos e formais registados por Teófilo no seu *De diversis artibus*, escrito durante a primeira metade do século XII, vigoravam havia já, pelo menos, cinquenta anos. Pensa-se que Teófilo tenha sido um monge beneditino do Mosteiro de Helmarshausen, situado um pouco mais a Norte, nos territórios germânicos, do que os lugares já referidos. De facto, é provável que a origem do vitral se situe nesta geografia do império otomano, em que, conforme mostra o tratado de Teófilo e a arte desse tempo, nomeadamente a dos metais, vêm à tona saberes herdados do mundo antigo, recebidos muito provavelmente através do império bizantino. Quanto

à forma plástica, são os exemplares mais antigos de vitral, incluindo os célebres profetas da Catedral de Augsburg, datados do início do século XII, testemunhos da mesma arte, apelidada de românica, que se pode apreciar no extremo oposto da Europa, por exemplo, nas monumentais pinturas murais da Catalunha. A modelação da forma obedece aos mesmos preceitos exactos que disciplinam a representação da luz nos rostos, pés, mãos e panejamentos das figuras, representadas contra fundos irrealis de forte cromatismo.

O carácter imanente da luz na pintura medieval, patente, até aos finais século XIV, em todas as disciplinas pictóricas, com particular relevo para a pintura retabular a têmpera e para a iluminura, através do uso do ouro ou de materiais que o imitavam, em fundos, auréolas de personagens sagradas e outros elementos, procede em última instância da arte bizantina mais antiga. As fontes desta influência, que tornarão presente também, num Ocidente destituído pelas invasões da sua herança clássica, a ideia do corpo humano legada pela civilização grega, encontram-se nos territórios de que Bizâncio se apossou mais a Oeste, sobretudo na costa oriental e norte italiana. Essa imanência é já evidente nos grandes mosaicos murais de San Vitale, em Ravena, ou de Sant'Apollinare, na localidade vizinha de Classe, datados de meados do século VI. Servindo-se de um recurso muito utilizado no revestimento de pavimentos, durante o período imperial romano, estas obras reflectem mudanças eloquentes na maneira de fazer e de pensar, não apenas devido ao facto de se aplicarem a paredes e abóbadas, mas também e sobretudo por fazerem uso de tesselas de vidro, eventualmente estratificadas para incluírem folha de ouro no seu seio. Em San Vitale, a divina imperatriz Teodora com o seu séquito, procede à *Oblatio Augusti et Augustae*, oferenda de vasos litúrgicos, em ambiente de ressonâncias romanas, no que diz respeito a alguns apontamentos arquitectónicos e decorativos – o nicho, o toldo, a porta, o reposteiro e a fonte –, mas numa atmosfera completamente abstracta: um vibrante fundo verde e dourado. Em Sant'Apollinare, a divinização da imperatriz dá lugar à representação de um acontecimento propriamente divino: a Transfiguração de Jesus (Figura 2). A composição, adaptada à abóbada da abside mostra, ao centro, a Cruz, ladeada, em cima, sobre um fundo de ouro, pelas figuras dos profetas Moisés e Elias, e, mais abaixo, sobre fundo verde, por três ovelhas

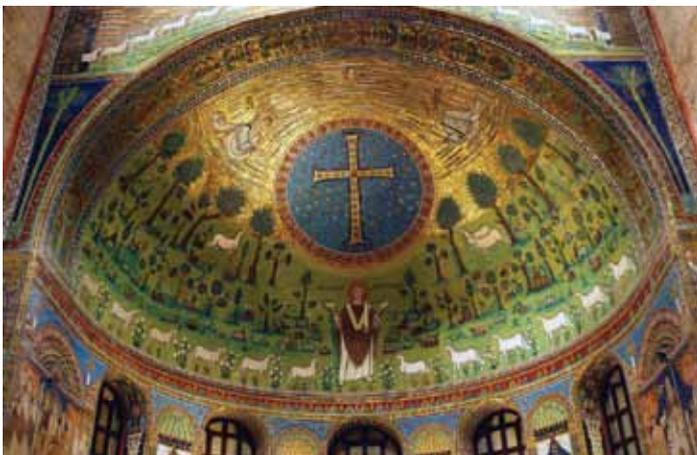


Fig. 2 - A Transfiguração, basilica de Sant'Apollinare in Classe (Ravena), meados do século VI. Fonte: <http://www.wga.hu>

que simbolizam os apóstolos que presenciaram o milagre – Pedro, Tiago e João. Em baixo, ao centro, vê-se Santo Apolinário, primeiro bispo de Ravena e mártir da Igreja, ladeado pelo seu rebanho. No topo, divisa-se a mão de Deus, cuja presença, segundo o relato bíblico, se manifestou pela voz.

A escolha do tema da Transfiguração é significativa por duas ordens de razões:

- Por um lado, pela manifestação da divindade de Cristo sob a forma de luz, conforme relata o Evangelho de S. Mateus (17:2): “[Jesus] transfigurou-Se diante deles [Pedro, Tiago e João]: o Seu rosto resplandeceu como o Sol e as Suas vestes tornaram-se brancas como a luz.”;

- Por outro lado, por atestar a consubstancialidade de Cristo a Deus Pai, posta em causa pelos seguidores de Ário, a partir de cerca 319, doutrina logo reprimida, ainda que sem consequências definitivas, pelo Concílio de Niceia, em 325. Nesta ocasião definiu-se que o Filho era *homoousion* do Pai, isto é, que era da mesma *ousia*, palavra grega que se costuma traduzir modernamente por “essência” e que corresponde à substância segunda de Aristóteles.

Devemos aqui recordar que a cristianização do Império Romano deu ampla circulação às ideias hebraicas, segundo as quais Deus é universal, todos lhe devendo obediência nos termos da Lei de Moisés, sob pena de pecarem. Daqui procede uma revolução metafísica e ética que teve repercussões até ao presente. O Arianismo persistiu, tendo sido objecto de discussão em vários concílios, até ao de Constantinopla, em 381, em que se assume a consubstancialidade entre Pai e Filho, e surge o conceito de Trindade. O segundo Concílio de Éfeso condenará o monofisismo, doutrina que nega a dupla natureza – divina e humana – de Cristo, passando a prevalecer a primeira. Apenas no Concílio de Calcedónia, reunido em 451, se estabelecerão definitivamente os limites da ortodoxia.

É na Antiguidade tardia que se inicia um processo histórico em que a Igreja universal procurará conferir precisão à doutrina cristã através da filosofia. A identificação da divindade com o Sol radica, por um lado, nas religiões orientais (por exemplo, no deus Ra egípcio ou no Bel semítico) e, por outro lado, no pensamento grego dos séculos V e IV antes de Cristo, em particular em Platão e nos seguidores da Academia de Atenas, cujo expoente mais importante foi Plotino, que viveu já no século III da nossa era. Colega de Orígenes e discípulo de Amónio Sacas, pode dizer-se que foi o último filósofo pagão e o fundador do neoplatonismo. Para Plotino, o Uno é a base da realidade e medida de todo o valor, estando para além do ser e do bem. Dele derivam, em cascata, o Intelecto, a Alma, a Natureza e a Matéria. Na feliz formulação de Sir Anthony Kenny, para este

filósofo, “o corpo está na alma porque dela depende para a sua organização e existência.” [1]

A tradição neoplatônica e mística cristã afirmar-se-á, além de Santo Agostinho, no Pseudo-Dionísio Areopagita, autor que se identificou erroneamente com Dionísio, ateniense do Areópago convertido por S. Paulo e primeiro bispo de Atenas. Porém, a sua obra não pode ser anterior aos séculos V ou VI. Dionísio será identificado igualmente com Dinis, bispo de Paris e mártir de França do século III, cujas relíquias se guardam na abadia de seu nome e panteão dos reis francos, desde Charles Martel (690-741), nas imediações de Paris. Esta tripla sobreposição não será de somenos na afirmação gótica de uma metafísica da luz.

No seu *De Coelesti Hierarchia*, o Pseudo-Dionísio preconiza que cada criatura participa da luz divina e inciada – o amor de Deus –, recebendo-a e transmitindo-a de acordo com a sua capacidade, melhor dizendo, com a posição que Deus lhe concedeu na escala dos seres.

Por último mas não menos importante, o papel desempenhado pela luz no sagrado procede também dos chamados povos bárbaros que invadem o Continente e as Ilhas Britânicas a partir do século II. Entre os mesmos, eram reconhecidos poderes taumátúrgicos ao ouro e às pedras preciosas. Acabando por se converter paulatinamente ao Cristianismo, estes povos introduziram contributos culturais determinantes para a Europa em formação. Um bom testemunho dessa fusão de valores e crenças é a coroa votiva do rei visigodo Recesvinto, datada do século VII, que fazia parte do tesouro enterrado em Guarrazar, perto de Toledo, recolhido no Museu Arqueológico de Madrid. A coroa, feita de ouro, safiras, esmeraldas e pérolas, foi concebida para estar suspensa sobre um altar.

Cerca de cinco séculos mais tarde, Suger, abade de Saint-Denis e beneditino na via cluniacense, operará uma reforma na sua abadia, a partir de 1130, que está na origem do então chamado *opus francigenum*, que hoje apelidamos de arte gótica. Os meandros da renovação arquitectónica que tornará a luz no tema central das artes até ao final do século XIII são explicados pelo seu fautor no *Liber de rebus in administratione sua gestis* e no *Libellus Alter de Consecratione Ecclesiae Sancti Dionysii*. Conforme, há muito, entendeu Erwin Panofsky, a fonte da sua teologia anagógica que, tornada pedra e vidro, permite a ascese no espaço litúrgico, procede, sem dúvida, do Pseudo-Dionísio, de cuja *Teologia Mística* se conservava uma cópia na livraria abacial, oferecida ao rei Pepino o Breve, em 758, e traduzida do grego para o latim por João Escoto Erígena, na primeira metade do século IX. Nas próprias palavras de Suger, é legítimo “que cada um siga a sua própria opinião. Por mim, declaro ter-me parecido

sobretudo justo que tudo o que há de precioso devesse servir antes de mais à celebração da Santa Eucaristia.” [2]

O vaso litúrgico em forma de águia, feito a partir de uma peça de pórfiro, possivelmente egípcia, a que se acrescentaram a cabeça e os membros do animal, em prata dourada, e que se encontra em exposição no Museu do Louvre, é apenas um dos sinais que nos chegaram das escolhas de Suger.

Ainda nas palavras do abade “quando penetrado pelo encantamento da casa de Deus, a sedução das gemas multicores me leva a reflectir, transpondo o que é material para o que é imaterial, sobre a diversidade das virtudes sagradas, então parece-me que me vejo a mim mesmo residir como em realidade em qualquer estranha região do universo, que não existe anteriormente nem no lodo da terra nem na pureza do céu, e que, pela graça de Deus, posso ser transportado daqui para o mundo mais alto de maneira anagógica.” [2]

Em Saint-Denis, deu-se a revolução: a nova fachada da basílica adquire o *facies* que se tornará corrente nas catedrais francesas que se lhe sucedem e o deambulatório é demolido para dar lugar a um conjunto de amplas e luminosas capelas, cujos muros se rasgam em vitrais, permitindo tornar o culto simultâneo numa poderosa invocação.

Enquanto o abade concede à opulência, outras vozes se levantam no seio da Igreja, nomeadamente a de S. Bernardo e dos cistercienses que, em 1150, determinam que, para as suas abadias, os vitrais sejam “de vidro branco, sem cruces nem representações” [2], dentro do mesmo espírito de despojamento e humildade em que haviam já anteriormente regulamentado para a arquitectura. Em boa verdade, porém, este é apenas o princípio de uma divergência que, com outros protagonistas, atravessará a história das ordens religiosas na Idade Média.

A segunda metade do século XII e a primeira do XIII vêm erguer-se, a alturas cada vez mais inverosímeis, as catedrais das prósperas cidades francesas. No seu interior, os vitrais serão o mais poderoso dos instrumentos de ascese. Se a proliferação de obras não chegasse, outros testemunhos se encarregariam de confirmar o caminho aberto por Suger. À volta de 1200, Pierre de Roissy, chanceler do cabido de Chartres afirma que “os vitrais que estão na igreja e através dos quais se transmite a claridade do sol significam as Sagradas Escrituras, que nos protegem do mal e em tudo nos iluminam” e Durand, bispo de Mende, em finais do século XIII diz que “os vitrais são as escrituras que espalham a claridade do sol verdadeiro, quer dizer de Deus, na igreja, iluminando os coros de fiéis.” [3]

Nas catedrais, florescerá não apenas o patrocínio da burguesia e das corporações, mas ainda o ensino que, aliás, em breve, se autonomizará em universidades sobre as quais a Igreja não vai deixar de querer exercer controlo. É este o tempo das disputas escolásticas segundo as regras do *Organon*, nome pelo qual ficou conhecido o conjunto de obras de Aristóteles relacionadas com a lógica. Apesar da importância assumida pelas ideias neoplatónicas, ao longo de todo o século XII, os pensadores identificarão o belo de preferência com as relações numéricas e proporcionais

entre as partes de um corpo ou de um objecto, ainda obsessivamente perseguidas nos *Carnets* do arquitecto Villard d'Honnecourt. O século seguinte deparará com a difícil tarefa de conciliar essa estética da quantidade com o princípio eminentemente qualitativo da luz. As soluções encontradas radicam, como seria de esperar, quer no pensamento neoplatónico, quer no entendimento do ser segundo Aristóteles. Assim, por exemplo, na primeira linha, Roberto Grossatesta considerará a luz como a máxima das proporções, correspondente a Deus. Na segunda, São Boaventura define a luz como forma substancial dos corpos, distinguindo *lux*, o fluxo luminoso, de *lumen*, capacidade de propagação em meios transparentes, e de *splendor*, reflexão e cor. De igual modo, S. Tomás de Aquino entenderá a luz como forma substancial do sol.

Do mundo árabe, chegam ao conhecimento da Cristandade, nomeadamente através das fronteiras meridionais da Península Ibérica, não apenas partes desconhecidas da obra de Aristóteles, muitas das quais viriam a ser proibidas pela Igreja (em particular as de física), como ainda as investigações daquele que se considera ser o pai da óptica, Ibn al-Haytham, mais conhecido no Ocidente como Alhazen, que viveu entre os séculos X e XI. Uma tradução latina do seu *Kitab al-Manazir (Livro de Óptica)*, realizada em finais do século XII ou no início do século XIII, foi lida por diversos intelectuais do Ocidente medieval, nomeadamente Roger Bacon, Roberto Grossatesta e Vitelião. Nessa obra, preconiza a convergência dos raios de luz para o olho humano e estuda a anatomia do mesmo, reconhecendo no nervo óptico a sua ligação ao cérebro.

No princípio do século XIII, colocam-se novos desafios às ordens religiosas em face do crescimento urbano e dos desvios da ortodoxia, desafios que a vocação das ordens monásticas instituídas, em particular Cluny e Cister, não estava em condições de enfrentar. Surgem assim as ordens chamadas mendicantes, primeiro com Francisco de Assis e depois com Domingos de Gusmão, cujos conventos se instalaram nas franjas das cidades, repudiando qualquer tipo de riqueza ou propriedade e vivendo de esmolas. O seu lema é a pobreza e a sua arma, a palavra. A pregação, sobretudo a franciscana, fala da humanidade de Cristo e do amor de Deus por todas as criaturas.

A arte gótica prolongar-se-á, tanto na Península Ibérica como no Sacro Império Romano Germânico, até bem entrada o século XVI, enquanto, na Península Itálica, onde nunca se perdera a memória da tradição figurativa da Antiguidade, a pintura encontra, ela própria, a partir das primeiras décadas do século XIV, uma nova humanidade, na representação de episódios da vida de Jesus e de Sua Mãe. Nos retábulos a têmpera de Duccio di Buoninsegna, as figuras, dotadas de um certo hieratismo e recortadas contra fundos de folha de ouro, trazem à memória, ainda com muita nitidez, os ícones gregos. Porém, as composições enriquecem-se na sua narrativa e alguns ensaios de vistas geométricas de edifícios e objectos vão sendo feitos. Não há dúvida de que um interesse mais aguçado pelo mundo visível e pela representação do espaço em que os homens se movem, tornado visível pela luz, começa então a despontar.



Fig. 3 - Giotto di Bondone, *A Natividade*, Capela Scrovegni, Pádua, 1305-6. Fonte: <http://www.wga.hu>

Pode dizer-se, sem rodeios, que o principal obreiro da imagem visual da mensagem de S. Francisco foi Giotto di Bondone, de que são bom testemunho, entre muitas outras obras, realizadas sobretudo em igrejas e capelas de Pádua (Figura 3) e Florença, as pinturas das basílicas superior e inferior de Assis. Curiosamente é também aqui que, pela mão de outro artista, aparecem os mais antigos vitrais italianos conhecidos, tributários da nova arte e completamente estranhos à tradição gótica. A partir de então, as investigações, durante muito tempo puramente empíricas, sobre a pirâmide visual referenciada ao observador não mais pararão, alcançando em breve as regiões transalpinas. Num vitral do Mosteiro de Königsfelden, situado na actual Suíça e datado de aproximadamente 1330, surge uma das primeiras tentativas conhecidas de representação pictórica em perspectiva, no caso vertente, do túmulo em que Cristo é depositado.

Mais a norte, nos Antigos Países Baixos, muito particularmente no Condado da Flandres, a paixão pela representação do real dará lugar a um caminho original de descoberta com repercussões em toda a Europa, incluindo a Itália. Não tendo inventado a pintura a óleo, ao contrário do que narra a tradição, os irmãos Van Eyck encontraram nesta técnica todas as virtualidades necessárias à representação minuciosa de um real eivado de piedade e simbolismo, em que, como não podia deixar de ser, o domínio da representação da luz é um problema central. O ambiente, a um tempo burguês e profundamente devoto, em que aparece a sua obra, à volta de 1420, é o da cidade de Bruges, no auge da actividade como porto comercial marítimo internacional.

A partir de 1425, Jan Van Eyck será o pintor privado de Filipe o Bom, Duque da Borgonha. Nessas



Fig. 4 - Jan van Eyck, *A Virgem do Chanceler Rolin*, Musée du Louvre, 1434-5. Fonte: <http://www.wga.hu>

funções, receberá também encomendas de outras personalidades ilustres, nomeadamente do chefe do governo ducal, o chanceler Rolin, que lhe encomendou uma ousada pintura em que se fez representar face a face com a Virgem Maria (Figura 4). No intimismo de uma capela particular que se abre sobre a paisagem através de uma *loggia*, Nossa Senhora com o Menino no regaço aparece ao chanceler como uma visão interior, que o mesmo não encara, dirigindo o olhar mais certamente para um altar na outra extremidade da dependência. O realismo da representação da fisionomia, da indumentária e dos adereços é impressionante. Ao que se julga, o livro de horas está aberto no ofício de matinas, celebrando ao raiar da aurora, de acordo com a autorização que o chanceler impetrou do Papa, a pretexto dos seus muitos afazeres diários. Na convergência das linhas desenhadas pelos ladrilhos do pavimento, é intuído um ponto de fuga algures na paisagem distante. Porém a perspectiva é construída ainda empiricamente, sobretudo através do escalonamento dos valores luminosos e cromáticos em planos sucessivos, um conjunto de recursos a que se convencionou chamar perspectiva aérea ou atmosférica. Aparece aqui, pela primeira vez, a solução de uma janela aberta sobre a paisagem que fará longa carreira na pintura europeia, tal como a pintura de paisagem enquanto género autónomo. Representada ao raiar do dia, a paisagem concorda com o texto que o chanceler recita, em que também o rio, a cidade e a montanha são enunciados.

O primeiro testemunho pictórico da aplicação sistemática da perspectiva linear é a *Trindade* (Figura 5) que Masaccio pintou na igreja dominicana de Santa Maria Novella, em Florença, entre 1425 e 1428, de acordo com a contemporânea descoberta, por Brunelleschi, das leis correspondentes. A representação

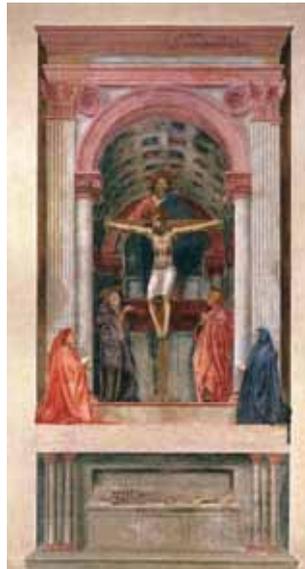


Fig. 5 (a) - Masaccio, *A Trindade*, igreja de Santa Maria Novella, Florença, 1425-8. Fonte: <http://www.wga.hu>

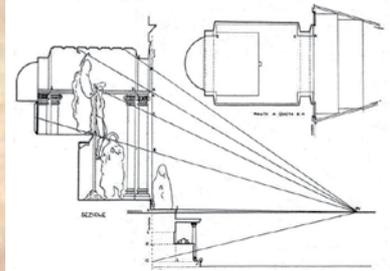


Fig. 5 (b) - Representação tridimensional, em planta e corte, da pintura apresentada na Fig. 5 (a), de acordo com as leis da perspectiva.

de uma realidade supranatural era colocada ao alcance dos mortais, referenciando-a ao próprio espectador, cujo ponto de vista o tornava participante directo na observação da cena representada. Talvez se possa falar com menos propriedade de laicização, neste momento de ruptura da mundividência ocidental, que a pintura tão bem ilustra, do que de sacralização do indivíduo. A mudança de paradigma em todas as disciplinas da pintura, monumental ou de cavalete, acabará por levar a que o vitral, cujas realizações procuram, a partir de meados do século XV, corresponder aos ideais da pintura em suportes opacos, perca a razão de ser que viu nascer esta arte e acabe por se extinguir paulatinamente ao longo do século XVI para ser reabilitada apenas no século XIX, a par dos movimentos revivalistas.

Ao observar o retrato do rei D. Manuel I num vitral do Mosteiro da Batalha (Figura 6), na pose habitual dos doadores de retábulos, acompanhado de seus filhos e, digamos assim, protegido por S. Domingos, inclinamo-nos mais a considerar o legado flamengo do que o italiano. De facto, os princípios de uma nova cultura humanista levaram tempo a enraizar em toda a Península Ibérica, persistindo a simpatia por recursos artísticos e fórmulas ainda fortemente devidores dos últimos desenvolvimentos da Idade Média. É essa a razão que justifica o florescimento da arte do vitral tanto em Portugal como na vizinha Espanha durante a primeira



Fig. 6 - Francisco Henriques (atr.), *D. Manuel I e seus filhos acompanhados por S. Domingos*, Mosteiro da Batalha, c. 1514. Fotografia: José Manuel / DGPC.

metade do século XVI. Na capela-mor da Batalha, que possui um autêntico retábulo de vidro, trabalhou um artista que se julga ter nascido na Flandres e que, tal como era comum na sua época, pintou tanto retábulos como vitrais. Era ele Francisco Henriques, o mais ilustre pintor da corte de D. Manuel. Devem-se-lhe momentos ímpares na história da pintura europeia sobre vidro, não apenas pelo virtuosismo que atestam, como é o caso do rosto de S. João Evangelista pertencente ao vitral que representa o Pentecostes, mas também por fazer ainda uso dos materiais descritos, no essencial, pelo monge Teófilo quatro séculos antes.

A cientificização da arte é um dos caminhos percorridos pelos pintores do Renascimento para reclamar a elevação do estatuto social, arrancando o seu ofício às chamadas Artes Mecânicas e equiparando-o às Artes Liberais. Desde longa data, tinham os mestres construtores, em particular os arquitectos de catedrais, gozando de uma certa correspondência a esse estatuto pelos conhecimentos matemáticos que a sua profissão exigia. O uso da perspectiva geométrica na pintura, racionalizada, aliás, pelo arquitecto Filippo Brunelleschi, deveria vir a desempenhar idêntico papel.

Uma vez que a perspectiva se baseava em princípios ópticos, é mais do que natural que a ambição de representação, por assim dizer, científica tivesse levado alguns artistas, pelo menos, a usar equipamento de apoio aos seus trabalhos. Albrecht Dürer divulgou em gravura uma máquina de desenhar baseada num sistema de coordenadas que permitia transpor pontos de objectos mais difíceis de desenhar para a superfície pictórica. Apenas oito anos mais tarde, Hans Holbein, no quadro *Os Embaixadores* (Figura 7), representa em escorço, com grande fidegnidade, não apenas objectos curvos e esféricos como ainda, por exemplo, a superfície do globo terrestre, a escrita musical no livro aberto ou o padrão do tapete que cobre a estante. Uma representação pictórica nestes termos é praticamente impossível sem o uso de equipamento óptico, mais provavelmente uma lente espelhada, usada individualmente para cada



Fig. 7 - Hans Holbein, O Jovem, *Os Embaixadores*, National Gallery, Londres, 1533. Fonte: <http://www.wga.hu>

objecto, o que explicaria os pontos de fuga situados a diferentes alturas. Em todo o caso, o interesse do pintor pela óptica evidencia-se na caveira deformada, certamente por inclinação de uma superfície de projecção, que aparece sobre o pavimento, entre as duas personagens.

Mais de cem anos depois, Jan Vermeer utilizará – admite-se hoje correntemente – a câmara escura. O sobredimensionamento dos objectos situados em primeiro plano, a desfocagem dos que ficam em planos recuados e o efeito de auréola que se vê nas partes mais iluminadas dos mesmos são alguns vestígios dessa utilização (Figura 8). Uma tal constatação apaixonou curiosos e investigadores a ponto de se fazerem propostas de reconstituição do processo, recriando as cenas e pintando-as uma vez mais. O interesse pela tecnologia óptica na pintura



Fig. 8 - Jan Vermeer, *A Leiteira*, Rijksmuseum, Amesterdão, c. 1658. Fonte: <http://www.wga.hu>

europeia só cessaria com o advento da fotografia, altura em que a pintura teve que voltar a encontrar o seu terreno próprio.

Concluimos, assim, um itinerário por várias obras de arte, desde os mais antigos vitrais até aos primeiros exemplos de utilização da perspectiva geométrica e da tecnologia óptica pelos pintores, num arco temporal que abarca toda a Idade Média e uma parte do período moderno. Dessa forma, acompanhamos o processo cultural que decorreu entre a vivência e a racionalização da luz como imanência divina, por um lado, e o entendimento da luz como dado objectivo, cientificamente considerado na representação do real, por outro lado. Este processo mostra que a emergência das descobertas científicas nele implicadas não resulta de uma simples retoma do legado da Antiguidade greco-romana, mas antes das necessidades de representação associadas à apropriação do real moldada pelo Cristianismo a partir da Antiguidade tardia, incorporando discretamente

descobertas provenientes do mundo árabe que, por sua vez, manteve viva a tradição científica aristotélica do Liceu e depois, do Museu de Alexandria. A Idade Média foi o primeiro palco de confrontação, debate e procura de conciliação entre as visões platónica e aristotélica do mundo, que desembocariam na especialização do saber e na emergência da ciência moderna.

Referências

1. A. Kenny, *História Concisa da Filosofia Ocidental*, Temas e Debates, Lisboa (1999).
2. G. Duby, *O Tempo das Catedrais. A arte e a Sociedade, 980-1420*, Editorial Estampa, Lisboa (2008).
3. V. Nieto Alcaide, *La Luz, Símbolo y Sistema Visual (El Espacio y la Luz en el Arte Gótico y del Renacimiento)*, Catedra, Madrid (1993).

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



Pedro Redol é licenciado em História da Arte e mestre em Arte, Património e Restauro. Conservador do Mosteiro da Batalha desde 1987, interrompeu estas funções para exercer as de diretor do Convento de Cristo, do Museu Nacional de Machado de Castro e do próprio Mosteiro da Batalha. É professor convidado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e presidente do Comité Português do Corpus Vitrearum. Publicou diversos artigos e livros sobre história do vitral, da pintura portuguesa antiga e da arquitectura, gestão de monumentos e paisagens, e conservação do património artístico.

A natureza da luz segundo os matemáticos D. Francisco de Melo, Pe. Inácio Vieira e Pe. Inácio Monteiro

Luís M. Bernardo

Departamento de Física e Astronomia, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto

1. Introdução.

A natureza da luz foi sempre um assunto muito debatido desde o tempo dos filósofos gregos até aos nossos dias. As várias concepções sobre a luz, que foram sendo estabelecidas ao longo dos séculos, originaram diversas teorias que os defensores tentaram clarificar e consolidar e os detractores procuraram desacreditar.

No passado, o estudo da luz era feito em três disciplinas: Óptica, Catóptrica e Dióptrica. Até ao princípio do século XIX, todas elas recorriam à geometria e integravam por isso as matemáticas aplicadas. Reconhecia-se porém que a Óptica, em particular, tratava assuntos filosóficos e médicos e que o tema da natureza da luz pertencia à Filosofia.



Do livro *Oculus Artificialis Teledioptricus Sive Telescopium* (1685), por Johann Zahn

Os matemáticos não deixaram porém de abordar e discutir o referido tema, uma vez que a sua formação académica eclética lhes dava algumas competências na Filosofia. Foi o caso dos matemáticos portugueses D. Francisco de Melo (c. 1490-1536), Pe. Inácio Vieira (1676/8-1739) e Pe. Inácio Monteiro (1724-1812). Os seus tratados ópticos cobrem o período de 1515 a 1756, uma época em que se assistiu ao declínio da escolástica e ao aparecimento e consolidação da ciência moderna.

2. D. Francisco de Melo

D. Francisco de Melo foi um fidalgo de ilustre linhagem, que teve a confiança dos reis D. João II e D. Manuel I e revelou, desde muito cedo, uma especial predilecção para as ciências, em particular, para as matemáticas. Com o apoio financeiro de D. Manuel I, foi estudar para a Universidade de Paris, entre 1514 e 1520, onde se “deu com todo o ardor aos estudos da Filosofia, e sobretudo das Mathematicas.” Depois de ter obtido o grau de Mestre de Artes, licenciou-se em Teologia e regressou a Portugal em 1521. Em breve ganhou a estima da corte e dos letrados portugueses pela eloquência e pelos conhecimentos que demonstrava tanto da língua portuguesa como da latina, mas onde realmente brilhava era nas matemáticas [1]. É autor de um manuscrito latino, recentemente traduzido para português [2], que contém comentários às obras do pseudo Arquimedes e de Euclides (*Óptica* e *Catóptrica* ou, numa tradução mais literal, *Perspectiva* e *Especulária*).

D. Francisco de Melo seguia a concepção platónica da luz e da visão, que envolvia mecanismos de carácter activo e passivo. As palavras de Platão sobre a luz, apresentadas no seu livro *Timeu*, não são porém muito claras. D. Francisco de Melo transcreve-as: “Quando a luz do dia se junta ao fluxo do

olhar, então duas [luzes] semelhantes encontram-se e combinam-se na espécie de um só corpo onde convergem os raios projetados dos olhos e onde o fogo do fluxo interior que emana [dos olhos] se repercute por oposição da imagem sensível.” [3] Segundo D. Francisco de Melo, Calcídio — o filósofo do século IV tradutor e comentador do *Timeu* — retirou daquela frase a seguinte interpretação [4]:

É evidente que a visão se faz sempre que a luz do calor interior que flui pelos olhos sem impedimento atinge um objecto visível (a que chama imagem sensível) e que, aí ganhando forma e cor de acordo com a qualidade da matéria [em questão], se transforma, a partir da luz [que era], em sensação visual que, repercutida ao encontrar a imagem sensível, e tendo regressado até à entrada dos olhos, se estende para os meandros do espírito.

A presença da luz exterior — que Aristóteles associou à transparência efectiva do meio potencialmente transparente, que medeia o espaço entre o olho e o objecto visível — era essencial para que tanto os raios visuais saídos dos olhos (teoria extramissiva) como as espécies saídas dos corpos (teoria intramissiva) pudessem prosseguir os seus percursos até à “potência” visiva [5]. Na parte do manuscrito intitulada *Corolário à Perspectiva de Euclides*, D. Francisco de Melo afirma [6]:

A maneira de ver concretiza-se sempre que os raios [visuais] ao progredir por eflúvio interno dos olhos, formam uma unidade com a luz, que é aparentada com eles, avançam até ao objecto visível, e regressam aos olhos depois de terem recebido cor e terem sido repellidos pelo contato com ele.

Reconhece que há fortes argumentos em favor da teoria intramissiva da visão, mas dá maior credibilidade à extramissiva e, assim, conclui que os raios visuais saem dos olhos, passam “através do ar iluminado até à coisa visível, regressando aos olhos, nos quais produzem a imagem da coisa visível.” [7] Dentro desta concepção de visão, havia, portanto, dois tipos de luz: a luz que tornava efectivamente transparente o meio potencialmente transparente, a concepção aristotélica, e a luz emanada pelos olhos que se julgava ser resultante ou poder ser identificada com os espíritos vitais.

A teoria extramissiva da visão, seguida por D. Francisco de Melo, foi bastante popular na Europa quinhentista, tendo sido igualmente adoptada por outro português, o médico judeu Filipe Montalto (1567-1616), na sua *Optica*, publicada em 1606 e reeditada em 1613.

3. Pe. Inácio Vieira

O padre jesuíta Inácio Vieira foi professor de matemática no Colégio de Santo Antão, onde deu vários cursos de que nos chegaram alguns manuscritos, entre os quais os tratados de *Optica* (1714), *Ca-*

toptrica (1716) e *Dioptrica* (1717). Nestes tratados, o autor apresenta conteúdos programáticos que eram idênticos aos que se ensinavam nos colégios jesuítas, na segunda metade do século XVII e nas primeiras décadas do século XVIII, e que constituíam as teorias mais populares e dominantes nessa época na cultura europeia.

A questão da natureza da luz é tratada extensivamente pelo Pe. Inácio Vieira na 1.^a *Subsecção*, intitulada “Que couza seja Lume,” da 1.^a *Secção* do *Capítulo 2.º* da sua *Dioptrica* [8]. Numa perspectiva histórica, apresenta várias teorias desde a atomista e platónica à peripatética e cartesiana. Sobre a concepção peripatética de Aristóteles, afirma que “o lume [luz exterior] he hũ acto, ou efficasia, ou huã sarta modificação do perspicuo: a saber he modificação do diafano por cuja cauza de tal sorte se move a potencia viziva proximè, que a alma sente, e ve não o tal diafano, mas o principio porque se modifica, e se qualifica o tal diafano.” [9] Reconhecia que, com esta definição e outras, propostas pelos comentadores de Aristóteles, “ainda fica a natureza da lus muito escura, donde nascerão varias oppinioeñs sobre a mesma natureza tendo cada huã seos patronos, e não de pouca notta, eu direi, o que sentem os autores citados deixando livre a escolha da oppiniaõ.” [10] Segundo a proposta cartesiana, a luz era uma onda de pressão resultante de certas vibrações dos corpos luminosos (lúcidos): “o lucido he principio da tal vibraçaõ, e a lus como diafano he o motu da tal vibraçaõ, produzido pello lucido.” [11] Ignora a teoria newtoniana, já conhecida desde 1672 e divulgada no livro *Opticks* (1704) publicado por Newton.

Indeciso ou simplesmente tolerante — já que afirma não se afastar “de todo da escola peripatética” [12] — o Pe. Inácio Vieira deixava aos seus ouvintes ou leitores a liberdade de escolher as teorias da luz que mais lhes agradassem.

4. Pe. Inácio Monteiro

Um outro filósofo e matemático português, o padre jesuíta Inácio Monteiro (1724 -1812) [13], dedicou à Óptica, Catóptrica e Dióptrica 124 páginas do 2.º volume do seu *Compendio dos Elementos Mathematicos necessarios para o estudo das Artes* (1756), um manual destinado aos estudantes do Colégio das Artes de Coimbra.

Inácio Monteiro definia a luz como “aquelle corpo, qualidade ou movimento, que faz illustres, e visiveis os corpos, e sem a qual os não podemos ver.” [14] Reconhecia as limitações desta definição ao afirmar: “com esta definição explico somente o que significa a palavra luz; porque definir physicamente a natureza do seu significado, he dificuldade, que nenhum homem tem vencido.” Resumiu de seguida as ideias que corriam no seu tempo sobre a natureza da luz [15]:

O antigo Peripatetico [Aristóteles], partidario jurado das qualidades occultas, nos segura debaixo da sua palavra, que a luz he hum accidente, ou qualidade, sem nos dar outra ideia, ou explicação sensível da sua natureza physica. O Cartesiano [Descartes] recorre para o movimento vibratorio, ou particular Niso [gravitação], e Conato [impulso], que tem a materia de hum luminozo, para se mover, apartando-se

do seu centro, e imprimindo força na materia circunvizinha, e esta successivamente em toda a que está disposta entre o mesmo luminoso, e os nossos olhos; os quaes vem a sentir o golpe desta materia, da qual nasce o sentimento, ou percepção, que chamamos vista. Esta engenhosa hypotese explica mecanica, e intelligivelmente muitos effeitos da luz; porem as observaçoens de Mr. Romer, e Bradley sobre o seu movimento; e outras grandes difficuldades tem confundido os mais apaixonados Cartesianos; e nem todo o engenho de Malebranche poz em seguro a opinião do seu amado Descartes, sem as grandes emendas do P. Castel, o qual socorrendo os seus nacionais, mostra aver nesta opiniaõ bastante fundo de verdade.

Os Newtonianos pretendem, que a luz consiste em huma tenuissima materia, e effluvios de diversa natureza entre si mesmos, que continuamente estão sahindo do Sol, e com movimento velocissimo nos vem ferir os olhos; fazendo-nos deste modo perceber os objectos, dos quaes vem rebatidos por meio da reflexão.

O Pe. Inácio Monteiro fala já da nova teoria newtoniana da luz, à qual inicialmente aderiu mas posteriormente abandonou, acabando por não dar crédito a nenhuma das teorias sobre a luz. Apesar do seu cepticismo, o Pe. Inácio Vieira estava convencido que a luz constava de matéria e movimento e não seria apenas uma qualidade como propunha a teoria peripatética.

5. Conclusão

Nesta curta comunicação, foram expressas as opiniões de três matemáticos portugueses sobre a natureza da luz. Mais do que opiniões são expressões de ideias contemporâneas, então conhecidas ou dominantes. D. Francisco de Melo expõe uma concepção ligada ao mecanismo da visão platónico-aristotélica, segundo a qual a luz com origem ocular interage com a luz exterior e o objecto visivo. O Pe. Inácio Vieira teve uma abordagem muito condicionada pelas ideias dos autores jesuítas do século XVII, na qual se nota alguma preferência pela teoria peripatética em confronto com a cartesiana e a omissão total da teoria newtoniana. O Pe. Inácio Monteiro introduziu na discussão a teoria newtoniana da luz, da qual chegou a ser adepto, mas dúvidas posteriores levaram-no a tomar uma posição céptica. Pode afirmar-se que estes três matemáticos portugueses estavam integrados na cultura europeia das suas épocas, expondo as ideias conhecidas sobre a natureza da luz e optando por posições doutrinárias de algum conservadorismo.

Referências

1. António Ribeiro dos Santos, *Memoria da Vida, e Escritos de D. Francisco de Mello*, Memórias de Literatura Portuguesa, Vol. VII, Academia Real de Sciencias de Lisboa, Officina da mesma Academia, Lisboa, 1806, pp. 237-249.
2. Francisco de Melo, *Obras Matemáticas*, edição crítica e tradução de Bernardo Mota e Henrique Leitão, Centro de Estudos Clássicos, Biblioteca Nacional de Portugal, Lisboa, 2014.
3. *Idem*, p. 69.
4. *Idem*, *Ibidem*.
5. *Idem*, p. 71.
6. *Idem*, p. 59.
7. *Idem*, p. 67.
8. Inacio Vieira, *Tratado da Dioptrica*, 1717, manuscrito BNP COD. 5165, §15-40.
9. *Idem*, §35.
10. *Idem*, §17.
11. *Idem*, §29.
12. *Idem*, §39.
13. Luís Miguel Bernardo, *Histórias da Luz e das Cores*, Vol. 1, Editora da Universidade do Porto, 2005, pp. 532-535.
14. Ignacio Monteiro, *Compendio dos Elementos de Mathematica Necessarios para o Estudo das Artes*, Vol. 2, Real Collegio das Artes, Coimbra, 1756, p. 5.
15. *Idem*, pp. 5-6.

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



Luís Miguel Bernardo

é professor catedrático aposentado do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Licenciado em Engenharia Electrotécnica na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, obteve o mestrado e o doutoramento em Física na Universidade Estatal de Virgínia (Virginia Tech) nos E. U. A. Realizou nos últimos 40 anos investigação científica em processamento óptico, holografia, óptica não-linear e ultra-rápida e aplicações, tendo produzido mais de 150 comunicações e publicações científicas. Fazem parte dos seus interesses a história da ciência e a divulgação científica, sendo autor de dois livros: *Histórias da Luz e das Cores* (3 volumes, 2005-2010) e *Cultura Científica em Portugal: uma perspectiva histórica* (2013). Foi durante dez anos director do Museu de Ciência da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Da Luz na natureza à Luz aplicada: visão de um químico

Carlos Serpa

Universidade de Coimbra

Profissão: Fotoquímico.

Por vezes, apresento-me dizendo a minha profissão: “Carlos Serpa, Fotoquímico; Muito prazer.” De alguma forma a frase é dita como um desafio ao meu interlocutor, pois imagino serem diversas as interpretações dadas à natureza da minha profissão: o que será um Fotoquímico? Algo ligado à fotografia, aos fotões, à luz... Sim, a Luz está no cerne da minha vida profissional, porque está no cerne da nossa Vida. Fotões (ou luz) sempre estiveram presentes, desde o começo do universo, nos processos que deram origem à vida. O melhor e sempre maravilhoso exemplo é uma “simples” reação possível de baixo da luz do sol (em presença de clorofila) e em que os produtos são comida ($C_6H_{12}O_6$) e respiração (O_2).



A transformação pelas plantas de dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) em glucose ($C_6H_{12}O_6$) e em oxigénio (O_2) ainda não foi reproduzida em laboratório com eficiência suficiente para a utilizarmos de forma útil. Mas é um exemplo de inspiração na natureza que, muitas vezes, guia o trabalho de um Fotoquímico. E existem muitos fenómenos na natureza que podem inspirar um Fotoquímico. Veja-se, por exemplo, a proteína rodopsina, pertencente ao conjunto de moléculas que nos permitem ver (Fig. 1). A luz absorvida por esta molécula é transformada num sinal eletroquímico e no processo uma “dança” concertada de eletrões leva a uma alteração da conformação da molécula. É nesta interação da luz com moléculas que se centra o trabalho de um Fotoquímico.

Sem o sabermos, muitos de nós começamos a

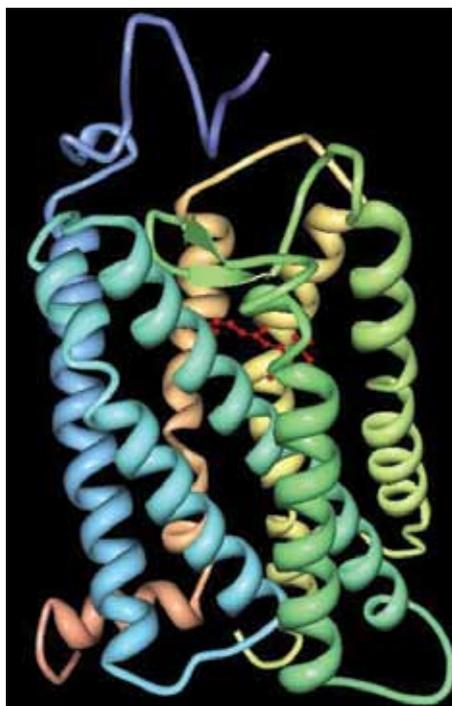


Fig. 1 - Estrutura cristalográfica da rodopsina bovina [1].

nossa vida com uma experiência Fotoquímica! A bilirrubina é uma molécula formada no processo de quebra de células vermelhas do nosso sangue, cuja acumulação provoca icterícia, revelada por uma cor amarela na pele. Um fígado ainda não completamente operacional (como muitas vezes acontece ao nascermos) não consegue transformar a bilirrubina na sua forma solúvel em água, permitindo a sua excreção. Felizmente a forma de bilirrubina insolúvel pode ser transformada numa forma solúvel pela simples exposição a uma luz de cor azul. Por isso, cerca de 60 % dos recém-nascidos passam algumas das primeiras horas da sua vida como sujeitos de uma “experiência Fotoquímica”. Mas tal continua ao longo de toda a vida: a molécula que denominamos Vitamina D, e sem a qual não conseguimos viver, é sintetizada na nossa pele a partir do colesterol apenas na



Fig. 2 - Criança recém-nascida em fototerapia para tratamento do excesso de bilirrubina.

presença de luz ultravioleta, proveniente essencialmente do sol.

Uma aplicação médica mais sofisticada da Fotoquímica é a Terapia Fotodinâmica. Nesta terapia, usamos luz para converter oxigênio em espécies letais para células cancerígenas. Isto é, o mesmo oxigênio que é fundamental à vida no seu estado de menor energia, pode ser uma espécie tóxica (ou precursor de espécies tóxicas) num estado de maior energia! Uma molécula desenvolvida para entrar preferencialmente em células cancerígenas é irradiada com um feixe de luz (muitas vezes um laser) e formam-se moléculas mais energéticas, na medida em que a energia dos fótons foi absorvida; dizemos que a molécula transitou para um estado excitado. A fotoquímica particular destas moléculas excitadas permite a reação com o oxigênio existente nas células, desencadeando as reações que dão origem a espécies de oxigênio excitado tóxicas e à morte celular.

A interação da Luz com moléculas e materiais está na origem de novos métodos de transformar a energia da luz solar em energia utilizável, nomeadamente em eletricidade.

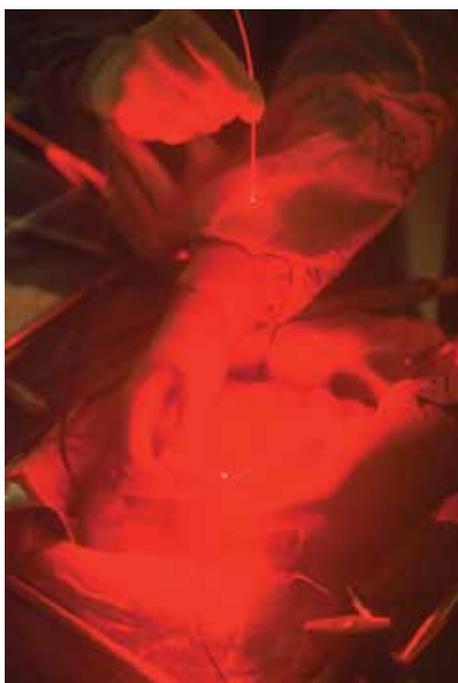


Fig. 3 - Ilustração de cirurgia oncológica utilizando terapia fotodinâmica associada à molécula fotofrina.



Fig. 4 - Michael Grätzel com uma célula solar com corantes, cuja tecnologia recebeu o seu nome (foto: EPFL).

As células baseadas em silício evoluíram da sua forma monocristalina para formas amorfas e policristalinas, permitindo o uso doméstico e industrial. Em células solares com corantes (Grätzel) e em células solares orgânicas, a absorção da luz solar dá origem a moléculas com estados excitados com grande tendência de perder eletrões. Um vez vencido o desafio de direcionar esses eletrões no sentido correto, transformamos a Luz numa corrente de eletrões. De forma a absorver a luz do sol, por vezes, usa-se moléculas idênticas às utilizadas na fotossíntese, em mais uma tentativa dos Fotoquímicos em mimetizar a natureza na sua interação com a Luz.

Na indústria dos plásticos, o processo de polimerização, em que uma quantidade elevada de moléculas pequenas se junta para dar origem a uma longuíssima molécula, necessita de uma ajuda extra. Essa ajuda pode ser dada por moléculas irradiadas por luz e conduzidas assim a um estado excitado, pois contêm exatamente a energia extra para iniciar todo o processo. Processo similar é usado nos consultórios médicos dentários, onde luz ultravioleta é usada para endurecer resinas dentárias.

Acreditará ainda que a Luz e a Fotoquímica estão presentes até na roupa que tem vestida? É muito provável que a sua roupa tenha sido lavada com detergentes que contêm branqueadores óticos, moléculas que absorvem a luz ultravioleta (que não é vista pelos nossos olhos) e emitem uma luz azu-

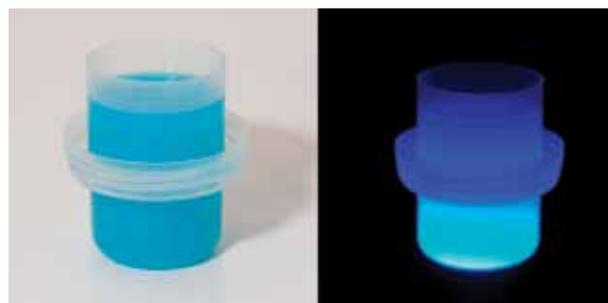


Fig. 5 - Fluorescência em detergente para a roupa exposto a luz ultravioleta.

lada, podendo então dizer-se: “branco mais branco não há”. Também a nota que poderá ter no bolso terá certamente uma marca de segurança feita com compostos fluorescentes. Quando colocada sob uma luz ultravioleta, revelará um desenho colorido.

Luz, câmara, ação!

No nosso laboratório de Fotoquímica, tudo se inicia com a Luz. Em cada experiência, repetimos a frase de um realizador de cinema: Luz, câmara, ação. Com a *Luz* (que muitas vezes é a luz intensa e de uma só cor de um laser), iniciamos o processo que queremos estudar. Preparamos a *Câmara* com que vamos olhar para o processo induzido pela Luz e seguimos a *Ação!* A Luz pode também ser encarada como ferramenta para estudar fenómenos que não têm necessariamente a ver com a luz. Recentemente temos usado moléculas que são fortemente ácidas apenas quando no respetivo estado excitado; com um impulso de luz laser rapidamente podemos tornar ácida uma solução. Moléculas que emitem luz podem ser muito úteis enquanto sondas. Mesmo dentro de um animal, podemos ver para onde vai determinada molécula se a ela ligarmos uma molécula fluorescente. E também a velocidade com que a fluorescência desaparece é muito informativa acerca do ambiente onde essa molécula se insere.

Fazer luz.

Mas enquanto químico, não estou apenas interessado em utilizar a Luz, também estou interessado em “fazer luz”. Durante muito tempo, obtivemos luz fundamentalmente a partir da energia térmica, nas lâmpadas incandescentes, num processo com eficiências menores que 10 %. A eficiência foi aumentada para o dobro com a transformação de energia elétrica em excitação de átomos (de mercúrio) numa lâmpada fluorescente. Ao contrário das lâmpadas incandescentes, que emitam todas as cores do arco-íris, numa luz que se apresenta branca aos nossos olhos, a luz fluorescente obtida pela emissão de átomos de mercúrio corresponde às cores específicas dos níveis energéticos dos átomos de mercúrio. Trata-se de luz obtida quando os eletrões excitados regressam ao seu estado fundamental. A razão para a nossa percepção da luz de lâmpadas fluorescentes não ser colorida deve-se à presença de uma cobertura de fósforo, que converte a luz emitida num espectro mais contínuo. Mais recentemente, conseguiu-se elevar para 30 % a eficiência de conversão de eletricidade em luz com díodos emissores de luz (LED). Com o arranjo em camadas de materiais convenientes, nomeadamente de semicondutores, cuja diferença de energia entre dois estados (denominados de condução e de valência) conseguimos modelar de forma a ser igual à energia de luz visível. É a emissão de luz de junções destes materiais, cada qual com a sua cor, que permite a iluminação LED com “luz branca”. Para além das formas mais convencionais de produzir luz, uma



Fig. 6 - *Malacosteus niger* (à direita), um peixe de águas profundas que utiliza a bioluminescência para confundir e capturar as suas presas.

terceira forma, que podemos chamar de luz líquida, produz luz a partir de reações químicas. A luminescência química é responsável por algumas das mais belas imagens das profundezas dos oceanos, pois espécies animais usam a respetiva capacidade de fazer luz como forma de comunicação. As reações químicas que produzem luminescência têm aplicações algo frívolas, como divertidos bastões coloridos, mas também mais sérias, como na Química Forense, onde quantidades mínimas de ferro são detetadas numa reação entre o reagente luminol e a água oxigenada, produzindo uma luminescência azul, e permitindo identificar a presença de sangue.

Laser: Uma outra forma de fazer luz.

Em 1917, Albert Einstein postulou a possibilidade de um feixe de luz (radiação) ao passar por um dado meio poder ganhar energia induzindo a emissão de luz por átomos (ou moléculas) no estado excitado, luz essa que deveria ser da mesma cor dos fótons do feixe. Mas esta emissão “estimulada” teria de competir com o processo mais comum de absorção da luz pelos átomos no estado fundamental. Existindo usualmente bastantes mais átomos no estado fundamental, a absorção ganha versus a emissão estimulada. Mas em 1954, uma equipa liderada por Charles Townes conseguiu direcionar um feixe de moléculas de amónia no estado excitado para uma pequena caixa retangular espelhada, obtendo uma inversão de população, na medida em que assim a maioria das moléculas de amónia na caixa estava no estado excitado. As dimensões específicas da caixa permitiram um efeito de ressonância e tinha nascido o maser (*microwave amplification by stimulated emission of radiation*), pois a luz emitida tinha um comprimento de onda na gama dos micro-ondas. Os materiais (sólidos, como por exemplo o rubi) e a forma de obter a inversão de população (por intermédio de uma lâmpada intensa) são distintos no laser de luz visível que Theodore Maiman fez pela primeira vez pulsar em 1960 e que viria a ser o primeiro numa série altamente prolifera de tipos de laser. Os avanços em cores disponíveis, intensidades e a miniaturização permitiram a sua utilização em diversos campos e o nascimento de uma indústria. Theodore Maiman aparentemente escreveu pela primeira vez no seu caderno de laboratório o acrónimo que

viria a transformar-se na palavra *laser* em Novembro de 1957.

Lasers aplicados à medicina.

Desde os anos 60 do século XX até aos nossos dias, o laser tornou-se omnipresente. Utilizamos lasers no nosso dia-a-dia em leitores de códigos de barras ou na leitura de dados musicais, ou em técnicas mais sofisticadas de deteção de imagens de eventos muito rápidos ou em máquinas de impressão 3D com tecnologia substractiva com lasers de precisão controlados por computador. Também na indústria, a utilização de lasers de alta energia nos processos de corte de alta precisão e soldadura de metais se tornou usual. Já a utilização de lasers em medicina é hoje comum, nomeadamente na cirurgia dos olhos. Em cirurgia, o bisturi pode agora ser um feixe intenso de luz laser, permitindo o corte e a separação de tecidos com o mínimo de sangramento. Mesmo para utilizações em estética, os impulsos de luz intensos e os lasers tornaram-se habituais. Recentemente, com a utilização de lasers e de novos materiais conseguimos desenvolver uma metodologia inovadora para destabilizar momentaneamente a estrutura da pele e permitir a passagem eficiente de medicamentos e cosméticos, através de ultrassons de alta frequência.

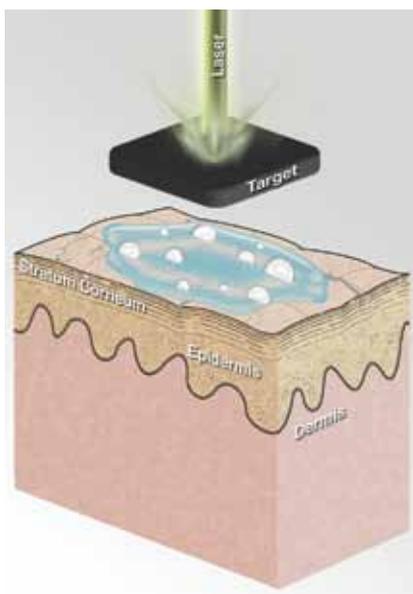


Fig. 7 - Na piezoporção um impulso de laser rápido permite a produção de ultrassons de alta frequência que interagem com a pele.

Luz, presente e futuro.

A Luz estará cada vez mais presente no futuro da nossa civilização. Prevê-se não só o contínuo avanço nas já referidas aplicações em Biologia e Medicina, ou nas energias alternativas, mas também novas aplicações nas Ciências do Espaço ou no controlo molecular de máquinas nanométricas por intermédio da luz. Um dos desafios mais importantes no âmbito das fontes energéticas será a descoberta de um combustível alternativo. O hidrogénio é uma forte possibilidade, mas a sua obtenção a partir da eletrólise da água é energeticamente desfavorável. Apenas a Luz do sol poderá fornecer a energia necessária. Para os (Foto) Químicos, prever o que pode acontecer numa célula ou num órgão através da compreensão de átomos e moléculas continuará a ser um objetivo. Novas fontes de luz laser,

cada vez mais rápidas, permitirão a visualização da matéria a quatro dimensões. A evolução de moléculas no espaço em tempo real, com a microscopia eletrónica ultrarrápida a evoluir de um mero conjunto de fotografias, para um filme completo.



PS: Já depois de finalizar este pequeno texto e como que a provar a completa entrada do laser nas nossas vidas, deparei-me nas ruas de Coimbra com o anúncio de um número do circo *Circolândia* denominado “o laser humano”. Demonstra a presença da luz e do laser num ramo que não tinha referido: o entretenimento. Deixo a fotografia a ilustrar este artigo.

Referências

1. <https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodopsin>



Carlos Serpa, doutorado em Fotoquímica pela Universidade de Coimbra e pós-doutorado no Caltech (EUA), é atualmente investigador na Universidade de Coimbra e Diretor Executivo do Coimbra Laser Lab. Os seus interesses de investigação

centram-se na (Foto)Química de materiais para aplicações em saúde e energia, no estudo da permeação de membranas biológicas com ondas fotoacústicas, e no enrolamento de proteínas e peptídeos. É sócio fundador e Diretor Executivo da LaserLeap Technologies, empresa impulsionada pela utilização inovadora de lasers e criada com base em tecnologia patenteada.

O processo de formação de imagens na PET: *follow the light!*

Nuno C. Ferreira

Faculdade de Medicina, Universidade de Coimbra

A PET, Tomografia de Emissão com Positrões, é uma técnica de Imagiologia Molecular que nos permite localizar e quantificar ínfimas concentrações de moléculas marcadas com isótopos radioativos emissores de positrões. São exemplos destes radioisótopos o carbono-11, o azoto-13, o oxigénio-15 ou o flúor-18, que têm períodos de semidesintegração muito curtos, de poucos minutos a cerca de duas horas. Cada núcleo destes átomos decai por emissão de um positrão que, após um curto trajeto, se aniquila com um eletrão do meio emitindo dois fótons em sentidos opostos (Figura 1). Se estes dois fótons forem detetados simultaneamente (ou melhor, dentro de uma janela temporal tão curta quanto possível), definem uma linha ao longo da qual se assume que se deu a emissão do positrão e onde se supõe que se encontrava a molécula de radiotraçador. Uma câmara de PET é assim na sua essência um sistema de câmara deteção de “luz” - se aceitarmos chamar “luz” (com aspas) a esta radiação invisível resultante da aniquilação do positrão (normalmente o termo é usado para designar apenas a componente visível do espectro eletromagnético).

Pretende-se que as imagens representem a concentração de radiotraçador em cada elemento de volume do corpo, sendo para tal tipicamente necessário detetar-se muitos milhões de pares de fótons em coincidência no tempo. Veremos aqui que o processo de formação de imagens em PET corresponde de certo modo a ir seguindo o trajeto percorrido pela “luz” a partir dos pontos onde ela foi detetada.

A ideia que está na base das técnicas de imagem de Medicina Nuclear onde se inclui a PET é muito simples: se conseguirmos tornar o corpo uma fonte de “luz”, basta tirarmos-lhe uma “fotografia” (que significa escrever com luz, fótons). Para vermos o interior do corpo é preciso que a “luz” seja penetrante, pelo que não se pode utilizar radiação eletromagnética na gama do visível, à qual o corpo seria opaco: utilizamos assim radiação gama, de elevada energia e muito penetrante. Por outro lado, se em vez de tirarmos uma única fotografia tirarmos centenas de fotografias de diferentes ângulos em redor do paciente (cada uma delas correspondendo a uma projeção do objeto segundo esse ângulo), é possível reconstruir o volume do paciente. Cada elemento desse volume designa-se por “voxel”, por analogia com pixel, e o seu valor pode ser expresso em unidades de concentração de radiotraçador. O volume do paciente pode ser seccionado da forma que se desejar, obtendo-se um grande conjunto de imagens que serão interpretadas por especialistas. A PET é assim uma Tomografia¹ de Emissão, onde as imagens em secção se obtêm a partir da “luz” emitida diretamente pelo corpo. De resto, o mesmo acontece com outra técnica tomográfica da Medicina Nuclear, a SPECT ou Tomografia de Emissão com Fóton Simples, assim designada porque cada decaimento de radioisótopo emite apenas um fóton gama.

O trajeto da luz invisível que resulta dos decaimentos dos núcleos inicia-se assim no interior do corpo, no momento da aniquilação do positrão com o eletrão. Os dois fótons são emitidos em sentidos opostos, cada um com uma energia

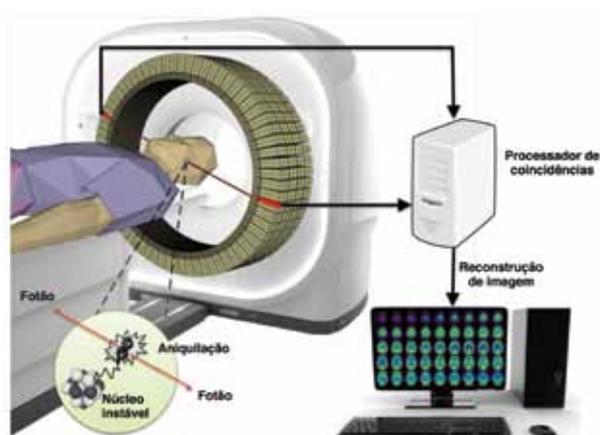


Fig. 1 - Ilustração do princípio de Tomografia de Emissão de Positrões.

¹ Do grego *tomos*, que significa corte.

igual à energia de repouso do elétron (511 keV). No seu trajeto, atravessam os tecidos podendo interagir com eles: interagem com maior probabilidade por efeito Compton, resultando na mudança de direção do fóton com perda de alguma da sua energia, e/ou por efeito fotoelétrico, conduzindo à perda do fóton e à não detecção do par de fótons. Se o local de aniquilação se deu próximo da superfície do corpo, a probabilidade dos fótons interagirem nos tecidos é menor, havendo uma maior probabilidade do evento ser detetado. Ainda assim, apenas uma pequena percentagem dos pares de fótons emitidos serão detetados, porque o anel de detectores tipicamente ocupa uma pequena região do espaço em torno do paciente. Se o ponto de emissão dos dois fótons for no centro de um paciente obeso, a probabilidade de ambos escaparem do corpo sem interagir pode ser da ordem de apenas 0,01. A probabilidade de interação é maior em tecidos com 1 % uma grande densidade de elétrons, como acontece nos ossos; a situação oposta ocorre na regiões dos pulmões, por exemplo.

Os pares de fótons que escapam do corpo do paciente sem interagir e que se dirigem para os detectores têm em princípio uma elevada probabilidade de ser detetados. Os detectores tipicamente estão organizados em blocos de detecção numa geometria em anel em torno do paciente. Cada bloco tem vários pequenos cristais, densos, finos e compridos, acoplados a fotodetectores (Figura 2). Quando um fóton gama interage no cristal deposita nele alguma ou toda a sua energia, literalmente fazendo-se luz: gera-se uma cintilação constituída por uma grande quantidade de fótons de baixa energia, geralmente na gama da luz visível e do ultravioleta. A luz da cintilação é então convertida para impulsos elétricos pelos fotodetectores, só depois se podendo estimar a energia, o instante de ocorrência e a localização no sistema de detecção. Regra geral, o erro na estimativa de energia é menor se a cintilação for forte, emitindo muitos fótons. Se a cintilação for muito rápida, consegue-se determinar mais corretamente o instante em que o fóton foi detetado, eventualmente permitindo melhorar a relação sinal/ruído da imagem final, como acontece nas câmaras TOF-PET (PET com informação de tempo de voo, *Time Of Flight*). Será também desejável que a deposição de energia no cristal seja feita de uma só vez, por efeito fotoelétrico, para reduzir os erros de estimativa. No entanto, ocorre frequentemente efeito Compton nos detectores, podendo levar a que hajam múltiplas interações da radiação gama nos cristais do sistema de detecção, o que dificulta a estimação correta da informação de energia, posição e instante de detecção de cada fóton.

Uma câmara PET é, no fundo, uma máquina desenhada para medir um grande número de projeções do corpo que se encontra no campo de visão. Se pensarmos que o sistema de detecção de uma câmara PET tem tipicamente vários milhares de pequenos cristais, então podem definir-se muitos milhões de linhas ligando cada par de cristais, onde em cada uma se pretende contar eventos designados por coincidências verdadeiras, que representam pares de fótons gama que não interagiram antes de chegar aos detectores e que contêm por isso informação correta para formar a imagem final. Estas linhas podem organizar-se em centenas

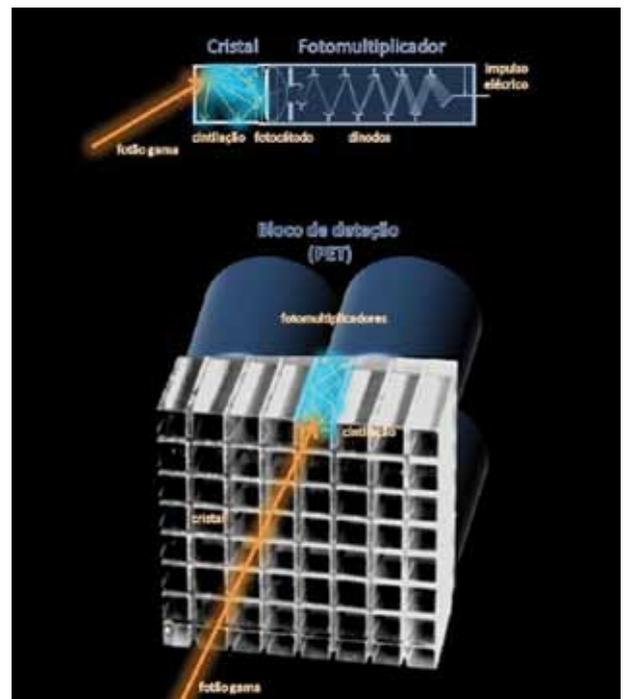


Fig. 2 - Representação esquemática da detecção de radiação proveniente do paciente. Em baixo: exemplo de um bloco de detecção usado numa câmara PET. Em cima: conversão da luz da cintilação em impulso elétrico num fotomultiplicador: os fótons da cintilação que chegam ao fotocatodo do fotomultiplicador ejetam elétrons que são acelerados por díodos a potenciais elétricos crescentes. Em cada nível de díodos o número de elétrons aumenta, amplificando o sinal elétrico.

de projeções segundo ângulos que podem ir de 0 a 180 graus e onde cada projeção é formada por muitas dezenas de linhas paralelas ("linhas de projeção" - Figura 3) situadas a diferentes distâncias do centro do campo de visão.

Tendo seguido nos parágrafos anteriores o trajeto dos fótons desde a sua criação à sua detecção, produzindo um grande número de projeções do corpo, façamos agora o caminho inverso, reproduzindo um passo importante que acontece em todos os algoritmos de reconstrução de imagem: a retroprojeção (Figura 3). Ela corresponde a seguir o caminho dos fótons como se se voltasse atrás no tempo, começando nos pontos de detecção e desenhando as linhas que unem os dois cristais que detetaram cada par de fótons. Como o local de onde foram emitidos os fótons é desconhecido, desenha-se toda a linha e a partir da acumulação de todas as linhas definidas por todos os pares de fótons detetados vai-se formando uma imagem. Esta será a imagem obtida por retroprojeção simples, a qual não teria grande qualidade, mas permitiria de uma forma simples obter uma imagem da distribuição de radiotraçador. Os algoritmos de reconstrução analítica ainda hoje muito utilizados utilizam o mesmo processo de retroprojeção para obter imagens de PET, apenas previamente aplicando uma filtração nas projeções medidas, o que melhora a qualidade da imagem final.

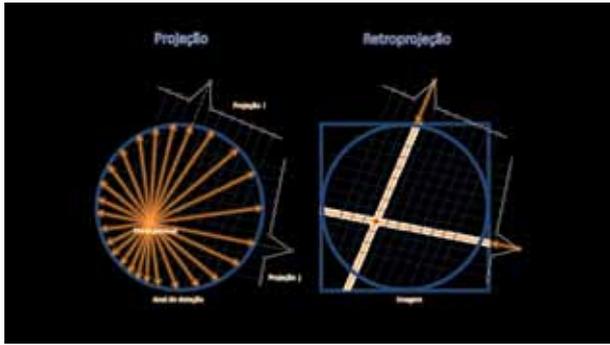


Fig. 3 - Exemplo de duas projeções que poderiam ser medidas numa câmara PET com uma fonte pontual no campo de visão. A retroprojeção consiste em distribuir uniformemente pela linha de projeção o valor medido nessa linha, acumulando-se o resultado de todas as linhas e formando uma imagem. Com muita dezenas ou centenas de projeções de todos os ângulos, forma-se uma imagem semelhante ao objeto mas esborratada, sem grande qualidade. Com algoritmos especializados obtêm-se imagens bastante mais fidedignas da distribuição de radio traçador no campo de visão.

Nos algoritmos de reconstrução iterativa, os mais usados atualmente, exacerba-se este processo de seguir o trajeto da luz desde a sua emissão à sua deteção e depois em sentido contrário: a cada iteração do algoritmo, é realizada uma projeção e uma retroprojeção. O princípio é o seguinte: como não sabemos inicialmente qual como é o objeto que está no campo de visão da câmara, admite-se que é um corpo uniforme, com igual concentração de radio traçador em todos os pontos. Chamemos a esta distribuição a imagem na iteração zero. Admitindo que seria essa a distribuição de radio traçador no campo de visão da câmara, pode-se calcular quais seriam as projeções que se esperaríamos obter. Comparando essas com as que foram realmente medidas pela câmara (muitas vezes essa comparação é feita através de uma simples operação, como uma diferença ou uma divisão), determinam-se fatores que devem multiplicar cada linha de projeção de modo a se poder estimar uma melhor imagem. Retroprojetam-se esses fatores atualizando-se assim a imagem de estimativa, chegando-se à imagem da iteração seguinte. O processo repete-se iteração após iteração sempre do mesmo modo: projeta-se a imagem estimada na iteração anterior, comparam-se as projeções obtidas com as projeções medidas, obtêm-se fatores de correção que se retroprojetam e que atualizam a imagem estimada. A cada iteração, segue-se assim o trajeto da luz invisível, de trás para diante, desde a emissão à deteção (projeção) e depois em sentido contrário (retroprojeção) como se andássemos para a frente e para trás no tempo, até se convergir para uma imagem tão correta quanto possível.

Na prática, tudo é um pouco mais complicado: a luz invisível emitida pelo radioisótopo é ionizante e por isso só podem ser administradas doses muito pequenas de radio traçador; as projeções do objeto são por isso imperfeitas, pois o baixo número de

coincidências contadas não corresponde exactamente ao total da actividade de traçador que se encontra ao longo da linha de projeção; variados efeitos físicos competem para dificultar a tarefa: desde a atenuação da radiação à dispersão por efeito Compton, passando pela geometria e eficiência variável dos detetores, efeitos físicos e técnicos que limitam a resolução espacial e o desempenho da técnica, tudo tem de ser adequadamente tido em conta para que não se cometam erros muito significativos que tendem a ser ampliados a cada iteração do algoritmo. Essa é de resto uma razão porque não se pode iterar indefinidamente: a partir de um certo número de iterações, o ruído na imagem tipicamente piora em vez de melhorar. Apesar de tudo isto, conseguem obter-se excelentes imagens que permitem melhor diagnosticar, estudar e tratar variadíssimas doenças, em particular nas áreas da neurologia, cardiologia e oncologia, para além de melhor compreender o funcionamento dos sistemas biológicos e a ação dos medicamentos e terapias.



Nuno C. Ferreira é Professor Auxiliar na Faculdade de Medicina da Universidade de Coimbra e investiga temas na área da imagem de Tomografia de Emissão com Positrões no ICNAS (Instituto de Ciências Nucleares Aplicadas à Saúde) e IBILI (Instituto de Imagem Biomédica e Ciências da Vida). Leciona disciplinas nas áreas da Biofísica, Bioestatística e Análise e Processamento de Imagens Médicas.

Os mistérios da luz de Lisboa

Ana M. Eiró, Carlos da Camara,
Maria José R. Gomes e Miguel C. Brito

Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências

A luz de Lisboa tem sido celebrada por poetas e escritores, pintores e outros artistas, captada pelos mais reputados fotógrafos e cineastas. Lisboaetas ou não, todos sabem que há alguma magia nesta luz. Mas, o que torna esta luz tão especial?

A luz, radiação eletromagnética que vem do Sol, que se reflete, refrata e dispersa das mais diversas formas, é a única fonte de luz natural que possuímos. Pequena parte da radiação eletromagnética que recebemos (Figura 1), a única fração que os nossos olhos conseguem ver de uma forma direta, a luz visível é, embora aparentemente branca, constituída por várias cores que podemos observar em inúmeros fenómenos atmosféricos como, por exemplo, no arco-íris. Contudo, se a luz que vemos branca é a mesma na fonte, a forma como em cada ponto do globo e em cada hora do dia ela é captada pode ser diferente. No nascer ou no por do sol, a maior dispersão das cores azuis e verdes quando a luz atravessa uma camada de atmosfera mais espessa torna a luz mais avermelhada, assinalando bem que esta luz é feita de muitas cores que se combinam.

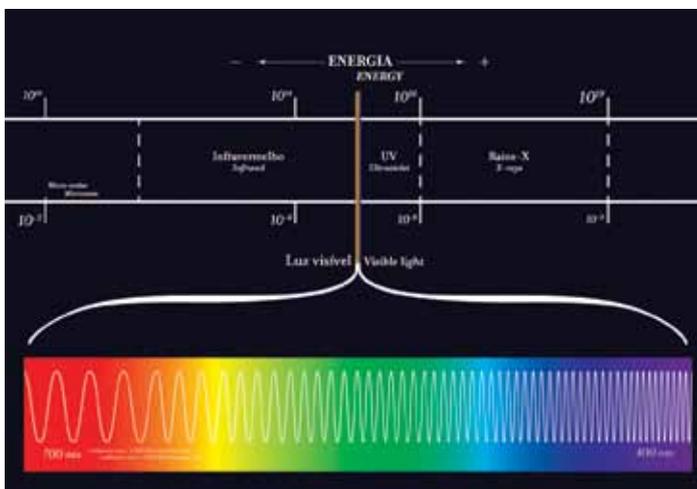


Fig. 1 - Espectro de radiação eletromagnética mostrando a zona da luz visível em destaque.



O encanto da luz de Lisboa é o resultado da combinação subtil de uma multiplicidade de efeitos que envolvem desde a natureza da radiação solar, a composição do ar e a circulação atmosférica, até à exposição da cidade, voltada para sul e para o Tejo, e à própria topografia e volumetria dos seus edifícios e materiais de construção.

Com efeito, se a quantidade de radiação que banha Lisboa diretamente se liga à sua latitude, a sul da Europa, já a ocorrência de um número de horas de Sol mais elevado e de uma nebulosidade mais baixa do que, por exemplo, em Paris, Londres ou Berlim se fica a dever a uma combinação de fatores meteorológicos. E é também a fatores meteorológicos que se devem os dias de nortada sobre o Tejo, acompanhados de uma atmosfera mais límpida.

A latitude de um lugar é um dos fatores mais importantes na determinação das horas de sol descoberto, como é evidenciado na Figura 2, onde se comparam as médias diárias do número de horas de sol descoberto ao longo do ano em cinco cidades da Europa, valores obtidos a partir de registos de vinte anos, entre 1990 e 2010. É bem evidente que

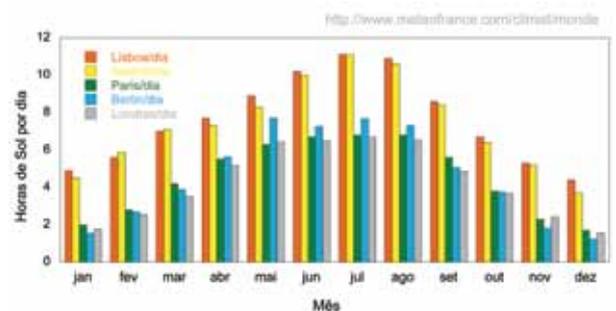


Fig. 2 - Valores médios do número de horas de sol descoberto por dia ao longo do ano, em cinco cidades da Europa: Lisboa, Madrid, Paris, Berlim e Londres [1].

Lisboa e Madrid, respectivamente com 38° e 40° de latitude norte, possuem muito mais horas de sol por dia, que Berlim (52° N), Paris (48° N) ou Londres (51° N). Contudo, a latitude não é o único fator, uma vez que o sol descoberto depende fortemente das condições meteorológicas, em particular da nebulosidade, a causa principal de termos em Berlim, mais a norte, nos meses de verão, mais horas de sol do que em Londres ou em Paris.

Os valores totais anuais obtidos a partir destes registos podem ser comparados. Temos assim um total de 2786 horas de sol descoberto em Lisboa, 2691 horas em Madrid, a que se segue Berlim, com 1692 horas, Paris com 1662 horas e, finalmente, Londres com 1573 horas de sol descoberto. Estes valores estão enquadrados por outros nas várias regiões da Europa, como se mostra no mapa da Figura 3.

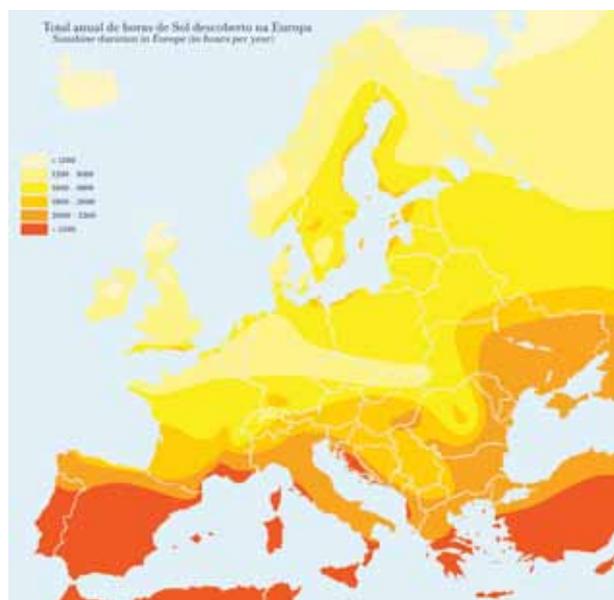


Fig. 3 - Total anual das horas de sol descoberto na Europa [2].

Se a quantidade de horas de sol é determinante para a luz que temos na cidade, a qualidade de radiação que incide sobre Lisboa liga-se também diretamente à sua situação geográfica, localizada na costa atlântica com um rio a sul correndo de nascente para poente. Mas são sobretudo fatores meteorológicos que vão estar intrinsecamente associados à qualidade da luz de Lisboa.

Os grandes reguladores do clima em Portugal Continental são os centros de altas e baixas pressões que se situam sobre o Atlântico Norte – o anticiclone subtropical dos Açores (A) e a zona de depressão subpolar da Islândia (B) – que, não sendo centros permanentes nem estacionários, sofrem mudanças consideráveis de ano para ano e ao longo das estações do ano, determinando a circulação atmosférica neste local. Isto contribuiu para a variabilidade do clima na região euro-atlântica, muito em particular no território português.



As linhas brancas - isóbaras - unem pontos de igual pressão. As setas representam a direção dos ventos à superfície.

No verão os ventos dominantes são de Nordeste e de Norte.
In the summer the dominant winds blow from NE and N.

Fig. 4 - Representação dos centros de altas e baixas pressões sobre o Atlântico Norte nos meses de Verão. As linhas brancas - isóbaras - unem pontos de igual pressão. As setas representam a direção dos ventos à superfície.

Estes grandes centros de ação determinam direção dos ventos dominantes em larga escala, que sopram paralelamente às isóbaras devido ao movimento de rotação da Terra e que variam muito ao longo do ano. Em Lisboa os ventos sopram todo o ano, mas no inverno os ventos dominantes são de oeste e de sudoeste, enquanto no verão os ventos dominantes são de nordeste e de norte. Os ventos de norte estão associados a massas de ar com características polares que limpam o ar e proporcionam condições de uma atmosfera muito transparente, originando dias muito luminosos e com excepcional visibilidade.

De influência também determinante na qualidade da luz, são os materiais de construção utilizados na cidade. Lisboa é construída com materiais claros, que refletem e dispersam a luz, tornando-a mais intensa aos nossos olhos. O casario é pintado de rosas, amarelos e ocres, cores quentes sobre um chão onde a calçada portuguesa tem grande predominância, fazendo parecer que a luz também vem do chão. Estas reflexões e dispersões tornam-se ainda mais importantes face à localização do rio a sul que, correndo de nascente para poente, reforça com reflexões no seu espelho de água todo o ambiente de luz da cidade.

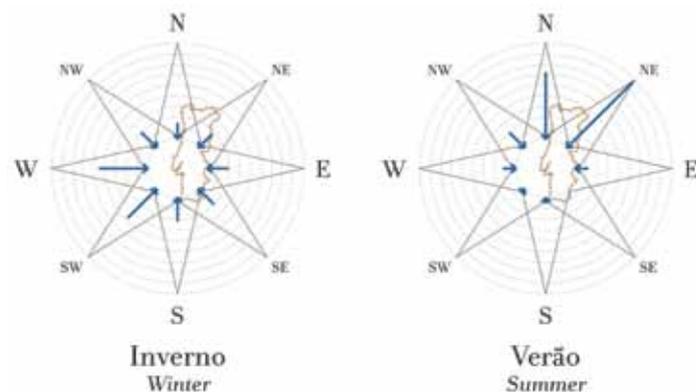


Fig. 5 - Diagrama assinalando as direções dos ventos predominantes no inverno e no verão. O tamanho das setas é proporcional à ocorrência de vento nos diferentes rumos.

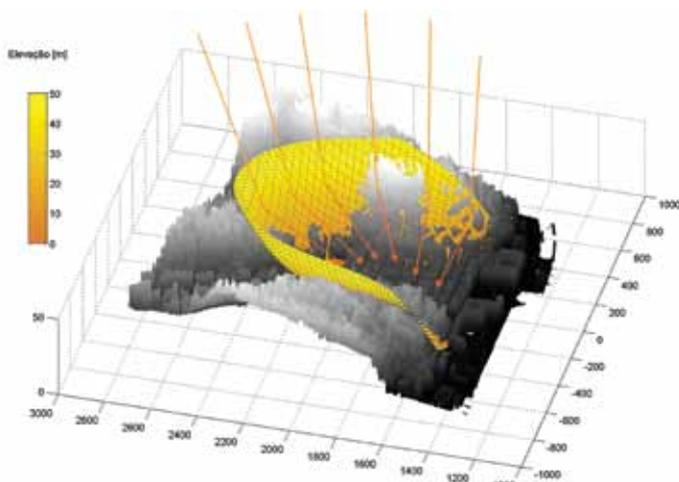


Fig. 6 - Representação da topografia e do edificado da baixa pombalina, sobreposta com uma superfície em forma de concha gerada a partir de uma parametrização polinomial ajustada. Simula-se a direção dos raios solares e a sua concentração.

Mas a cidade das sete colinas esconde ainda outros efeitos, pois estas colinas de Lisboa funcionam como um anfiteatro de luz virado para o rio que concentra a radiação solar. A partir dos dados da topografia e do edificado da Baixa Pombalina (modelo digital de elevação), fez-se um ajuste polinomial por uma equação de terceiro grau que permitiu gerar uma superfície em forma de concha, o modelo simplificado que se adapta à forma desta zona da cidade e que se representa na Figura 5. Simulamos assim a forma como a cidade recolhe a luz refletida pelas colinas, concentrando-as nos vales.

Um efeito semelhante observa-se nos sistemas de concentração de radiação solar para aquecer água ou produzir eletricidade. E no cinema, para modelar as sombras no rosto dos atores.

A razão do encanto da luz de Lisboa não é assim fácil de determinar, sobretudo não há seguramente uma razão única. Com muitas horas de sol e quase sempre com vento, criam-se condições que favorecem a concentração e a reflexão da luz do Sol nas águas do Tejo e a sua dispersão nas colinas e nos edifícios da cidade.

Mas é só através do sentir que conseguimos entender a magia desta luz!

Referências

1. <http://meteofrance.com/climat/monde>.
2. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Europe_sunshine_hours_map.png

Imagem de entrada: Nuno Cera, Terra (Tejo #1), 2008



Ana M. Eiró é Professora Catedrática de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Tem larga experiência em divulgação de ciência, tendo comissariado várias exposições científicas, na Fundação Calouste Gulbenkian (*À Luz de Einstein* em 2005, *Potências de Dez* em 2002) e noutras instituições. Foi diretora do Museu de Ciência da Universidade de Lisboa de 2006 a 2010 e coordenadora dos Museus da Politécnica de 2007 a 2010.



Carlos da Camara é Professor Associado do Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, onde leciona disciplinas nas áreas da Termodinâmica, Radiação e Deteção Remota. É Investigador do Instituto Dom Luiz, dedicando-se às áreas da Climatologia, Risco de Incêndios Florestais e Emissividade e Temperatura da superfície do solo. Foi Vice-presidente do Instituto de Meteorologia de 2003 a 2004.



Maria José R. Gomes é Professora Auxiliar Convitada do Departamento de Física da FCUL, investigadora do CENTRA-IST e colaboradora do Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Itália, onde foi *Marie Curie Fellow* de 2001 a 07. Fez o doutoramento no Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa. Atualmente é responsável pela participação portuguesa na colaboração internacional MARE-HOLMES para a determinação direta da massa do neutrino. Entre vários projetos de divulgação, destaca o MEDEA (SPF-REN).



Miguel C. Brito é professor Auxiliar da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa no Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, e investigador no Laboratório Associado Instituto Dom Luiz. Doutorou-se na Universidade de Oxford (Reino Unido), as suas principais áreas de interesse são análise do recurso solar, em particular em meio urbano, electrificação solar remota e tecnologias de silício cristalino para aplicação fotovoltaica. É responsável pelo Campus Solar – Ensaios de Sistemas Solares, no campus da faculdade.

Iluminação, Tecnologia e Sociedade

Paulo Simeão Carvalho^{1,2}, Adriano Sampaio e Sousa³

¹ Instituto de Física dos Materiais da Universidade do Porto (IFIMUP)

² Departamento de Física e Astronomia, Unidade de Ensino das Ciências, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

³ Professor aposentado do Ensino Secundário, Porto

psimeao@fc.up.pt; sampaio.sousa@netcabo.pt

1. Um pouco de História

Desde os primórdios da civilização, a luz desempenha um papel essencial na vida dos povos. O Sol e as restantes estrelas do firmamento constituem as primeiras fontes de luz natural, permitindo que o Homem e os animais disfrutem integralmente do sentido da visão. De noite, a Lua também desempenha uma função vital, refletindo os raios solares e iluminando a face escurecida da Terra.

A descoberta do fogo veio possibilitar a iluminação de espaços onde a luz natural não penetrava (por exemplo, o interior de cavernas) e melhorar a iluminação noturna, para além de propiciar o aquecimento e a cozedura dos alimentos, promovendo assim um aumento da qualidade de vida do Homem primitivo. Este facilmente percebeu que o uso de fontes artificiais de luz lhe dava uma maior autonomia em relação ao ciclo solar e às condições atmosféricas, permitindo-lhe regular o grau de iluminação de acordo com as suas necessidades.

Entretanto, a criação de aglomerados habitacionais cada vez maiores, fruto da necessidade de sobrevivência e partilha de recursos, levou ao advento de povoações e, mais tarde, de vilas e cidades. O uso do fogo como sistema de iluminação natural desses aglomerados populacionais tornava-se perigoso e instável, dependendo fortemente das condições atmosféricas. Assim, tornou-se imperioso encontrar outras formas de produção de luz mais seguras e fiáveis.

Em finais do século XVIII, surgiram em Inglaterra as primeiras experiências de iluminação a gás. Em 1784, J.P. Mincklers obteve luz pela primeira vez a partir de gás mineral e em 1792, W. Murdoch construiu uma pequena instalação para iluminar uma casa. Londres teve o privilégio de ser a primeira cidade a ter algumas das suas ruas iluminadas



Fig. 1 - Transeuntes apreciam a nova iluminação a gás. Londres, 1809 (cortesia de Wikimedia Commons).

a gás, já no início do século XIX (Figura 1); isso implicou o desenvolvimento da indústria do gás, sendo este obtido por destilação da hulha [1].

Neste final do século XVIII e início do século XIX, a Europa era palco de várias descobertas relacionadas com a corrente elétrica e suas aplicações tecnológicas. Daí ter sido pensada uma alternativa à iluminação a gás, baseada no uso da eletricidade. Efetivamente, é conhecido que os relâmpagos produzidos durante as trovoadas emitem uma luz intensa. Esta forma natural de emissão de luz inspirou Humphry Davy em 1801 a provocar uma descarga elétrica de alta tensão no seio de um gás, sendo assim considerado o precursor do arco elétrico (também conhecido por “arco voltaico”) [2].

A lâmpada de arco de carbono foi o primeiro tipo de lâmpada elétrica a ser usado de forma generalizada. Nestas lâmpadas, existem dois elétrodos de carbono a uma certa distância no seio de um gás, no interior de uma ampola de

vidro. Para uma diferença de potencial elevada entre esses eletrodos, dá-se uma descarga elétrica através do gás, que é ionizado e se transforma num plasma. Neste processo liberta-se uma grande quantidade de energia radiante visível, com forte incidência nas frequências mais altas.

Embora as lâmpadas de arco elétrico fossem uma fonte de luz por excelência, havia alguns problemas típicos, nomeadamente custos elevados de manutenção, emissão excessiva de radiação UV (ultravioleta), ruído incomodativo e luz tremeluzente, interferência nas frequências de rádio, aquecimento exagerado (tornando-se focos potenciais de incêndios) e poluição por monóxido de carbono. Este tipo de lâmpada está hoje obsoleto, exceto em situações particulares onde é necessária uma fonte muito intensa de radiação UV; no entanto, a lâmpada fluorescente comum pode ser considerada como descendente desta tecnologia, já que se baseia numa descarga elétrica através de vapor de mercúrio a baixa pressão.

Por todas as desvantagens referidas, era necessário encontrar uma alternativa. Sendo conhecido desde 1841 o efeito de Joule, Thomas Edison empreendeu em 1878 um projeto para construção de uma lâmpada de incandescência. Somente após cerca de um ano de investigação, na qual se testaram mais de 6000 materiais diferentes, foram obtidos resultados realmente satisfatórios.

Na sua versão final, a lâmpada de Edison consistia numa ampola de vidro, no interior da qual era feito vácuo e que continha duas hastes de platina ligadas por um filamento de bambu carbonizado. Atualmente estas lâmpadas têm gás inerte no seu interior e usam um filamento de tungsténio.

2. Fontes de luz atuais

O avanço tecnológico da sociedade, em especial no século XX, e o rápido crescimento económico dos chamados países emergentes, tiveram como consequência um aumento substancial no consumo da energia ao nível de todo o planeta e seu reflexo na quantidade de recursos naturais disponíveis. Esta situação fez disparar o custo da energia, em particular da energia elétrica.

A lâmpada de incandescência, embora sendo uma fonte de luz com características cromáticas próximas das da luz solar, apresenta uma baixa eficiência energética devido à grande percentagem de energia dissipada por efeito de Joule (aquecimento da lâmpada). Em consequência, foi fundamental encontrar formas alternativas de produção de luz a partir da energia elétrica, com rendimento mais elevado; estão nesta categoria as lâmpadas fluorescentes e as lâmpadas de LED (Díodo Emissor de Luz).

As lâmpadas tubulares fluorescentes recuperaram a tecnologia das descargas no arco elétrico do início do século XIX. Consistem na ionização de vapor de mercúrio provocada por uma descarga elétrica de alta tensão. A radiação emitida tem uma cor esverdeada-azulada e predominância na região dos UV. Na década de 1930, o revestimento interior do tubo com materiais fluorescentes permitiu construir uma lâmpada com um espectro de emissão mais alargado; esses materiais absorvem a radiação UV e reemitem radiações visíveis.

O LED é um díodo de material semiconductor que apresenta eletroluminescência (fenómeno descoberto em 1907 por Henry Joseph Round), ou seja, emite luz quando recebe energia elétrica. O primeiro LED emitindo radiação visível foi desenvolvido em 1962 por Nick Holonyak. A luz emitida por um LED não é monocromática, embora a banda de emissão de radiação seja relativamente estreita. Assim, a sua cor depende do material de que é constituído. Nas lâmpadas LED atuais, utilizam-se díodos que emitem sobretudo no azul e UV; para conseguir um espectro mais alargado, tal como nas lâmpadas fluorescentes, o LED é revestido por uma camada de material fluorescente. O resultado é uma emissão luminosa de espectro quase contínuo e baixo consumo.

3. Características das principais fontes de luz

Atualmente existem no mercado vários tipos de lâmpadas de uso doméstico, que podem ser categorizadas em três tipos principais. A Tabela 1 apresenta de forma resumida as suas características mais importantes [3-5].

Existem outros tipos de lâmpadas de uso muito especializado, que não são aqui referidas. Todavia, vale a pena falar das lâmpadas de sódio, por serem muito comuns na iluminação das ruas e parques das cidades; esta é a fonte de luz mais eficiente, em particular a lâmpada de sódio de baixa pressão. Tem um tempo de vida relativamente elevado (cerca de 20 000 horas), uma temperatura de cor de 1800 K e produz uma luz laranja/amarelada quase monocromática.

4. Espectro luminoso e fisiologia da visão

A necessidade de economizar energia tem contribuído para a massificação das lâmpadas de baixo consumo energético, sem ter necessariamente em conta os possíveis impactos ao nível da fisiologia humana. Por razões genéticas, o olho humano está

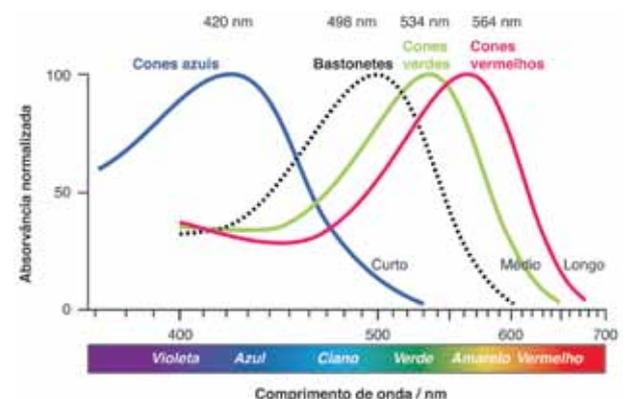


Fig. 2 - Resposta "padrão" dos cones e bastonetes à energia radiante (adaptado de Wikimedia Commons)



Características	Lâmpada de incandescência	Lâmpada de fluorescência	Lâmpada de LED
Tempo de vida/horas	750 - 1000	8000 - 10 000	25 000 - 100 000
Temperatura de cor/K	2400 - 3400	2700 - 5000	2700 - 6000
Cor	Branco amarelado	Branco com tonalidades variáveis	Branco com tonalidades variáveis
Tipo de espectro	Contínuo	Descontínuo (riscas do mercúrio e do fósforo)	Contínuo (emissão do semicondutor e do fósforo)
Conteúdo tóxico	Não	Mercúrio	Não

Correspondência entre fluxo luminoso e potência elétrica

lumens	watts	watts	watts
450	40	9 - 13	4 - 5
800	60	13 - 15	6 - 8
1100	75	18 - 25	9 - 13
1600	100	23 - 30	16 - 20
2600	150	30 - 55	25 - 28

Tabela 1 - Características das principais lâmpadas de uso doméstico

adaptado à radiação solar, ou seja, as suas células fotorreceptoras (cerca de 60 milhões de cones e 120 milhões de bastonetes) são sensíveis aos comprimentos de onda da radiação aproximadamente entre 380 nm e 650 nm. Há apenas um único tipo de bastonetes, pelo que estes não permitem distinguir as cores, embora sejam sensíveis a intensidades luminosas muito reduzidas. Por outro lado, existem três tipos de cones (R – vermelho; G – verde; B – azul), sensíveis a diferentes faixas de comprimentos de onda. Atendendo a que o olho humano apresenta diferenças significativas, de indivíduo para indivíduo, foi necessário estabelecer um padrão de resposta *standard* à energia radiante. O espectro de resposta de cada um destes fotorreceptores pode ser observado na Figura 2.

É conhecido que, quando um determinado tipo de cone é saturado pela exposição prolongada à cor a

que é mais sensível, a visão é afetada, surgindo alterações de cor, ilusões óticas e fadiga. Assim, a utilização de luz artificial com um espectro muito diferente do espectro da luz solar pode vir a resultar em desconforto e eventuais consequências a longo prazo.

Não é habitual as empresas que comercializam as lâmpadas para consumo doméstico fornecerem informações acerca do respetivo espectro luminoso. Este pode ser obtido, por exemplo, através de um espectroscópio, com recurso a um prisma ou a uma rede de difração. Na Figura 3 apresentam-se gráficos da intensidade luminosa (em unidades arbitrarias) em função do comprimento de onda (em nm), correspondentes aos espectros da radiação solar e dos três tipos de lâmpadas referidos na Tabela 1. Para a sua obtenção, foi utilizado um RSpec-Explorer da Field Tested Systems e respetivo programa informático.

Pode-se observar que os espectros emitidos pelo Sol e pela

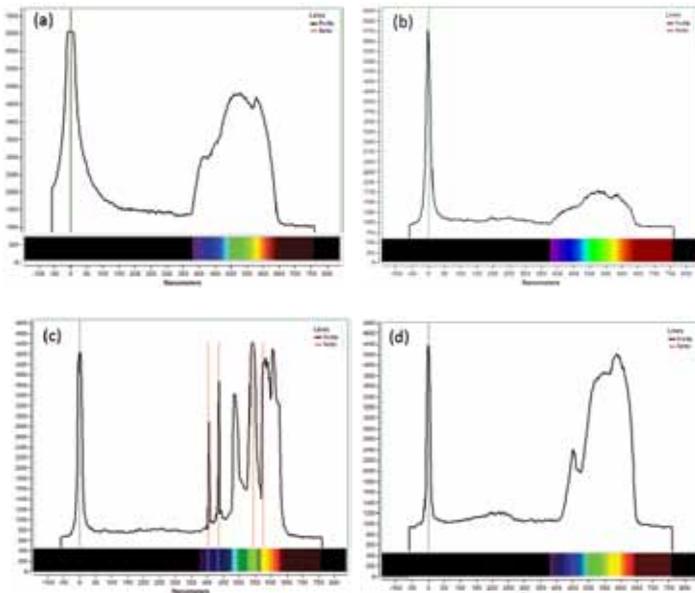


Fig. 3 - Espectros de emissão de várias fontes de luz: (a) Sol; (b) lâmpada de incandescência; (c) lâmpada de fluorescência; (d) lâmpada de LED.

lâmpada de incandescência são qualitativamente muito semelhantes e contínuos. O espectro de radiação da lâmpada de LED é também contínuo, mas apresenta uma emissão mais pronunciada na região do azul devido à emissão original do material semiconductor, como referido anteriormente.

Quanto à lâmpada de fluorescência, o seu espectro não é contínuo: estão ausentes várias regiões intermédias de comprimentos de onda; de notar a existência de riscas espectrais bem definidas, identificáveis com o espectro de emissão do mercúrio, representado por linhas verticais vermelhas, na figura.

5. Em jeito de conclusão...

A luz tem um papel cada vez mais importante na sociedade atual. A produção de luz e sua utilização para a iluminação de casas e cidades, é um campo de investigação dinâmico e em crescimento, permitindo ao Homem melhorar a eficiência energética e a sua qualidade de vida.

A escolha de fontes artificiais de iluminação deve ter em conta o tipo de local a que se destinam, as atividades desenvolvidas nesses locais e, finalmente, o consumo energético. Por exemplo, em locais onde as pessoas permanecem durante longos intervalos de tempo e/ou em que se desenvolvem atividades exigentes para a visão (leitura, estudo, trabalho minucioso, etc), é preferível privilegiar fontes de luz com emissão espectral o mais próxima possível da luz solar.

Seria, assim, conveniente que estes aspetos fossem mais conhecidos do público em geral e em particular dos jovens. A escola pode desempenhar um papel fundamental, incorporando nos currículos a temática da luz e da fotónica e sua importância para a sociedade.

Referências

1. A. E. Estrella, M. Cordeiro, *Introdução à História da Iluminação a Gás*, Serviços Gráficos da UTAD, Vila Real, 2007.
2. H. Ayrton, *The Electric Arc*, "The Electrician" Printing and Publishing Company, Limited, London, 1902.
3. S. Perkowitz, *Empire of Light: A History of Discovery in Science and Art*, Joseph Henry Press, Washington, D.C., 1998.
4. Design Recycle Inc., *Comparison Chart LED Lights vs. Incandescent Light Bulbs vs. CFLs*, 2010. (<http://www.designrecycleinc.com/led%20comp%20chart.html>, acedido a 25 de setembro de 2015)
5. Edison Tech Center, *The Miracle of Electricity and Engineering*, 2010. (<http://www.edison-techcenter.org/incandescent.html>, acedido a 25 de setembro de 2015).



Paulo Simeão Carvalho

é professor auxiliar do Departamento de Física e Astronomia da FCUP. Os seus interesses são na área dos cristais líquidos, na didática da física e na formação inicial e contínua de professores.



Adriano Sampaio e Sousa

é professor aposentado do ensino secundário. Durante uma década foi assistente convidado do Departamento de Física e Astronomia da FCUP. Os seus interesses estão relacionados com a didática da física e a formação de professores.



CASIO fx-CG20

A calculadora ideal para as aulas de:
Ciências / Física / Química
Biologia / Geografia
e Matemática



- Muito intuitiva e fácil de operar
- Muitas aplicações gratuitas que permitem o estudo de fenómenos físicos e rápida compreensão por parte dos alunos
- Ligação ao laboratório portátil (C-Lab) que permite realizar experiências em qualquer lado com diversos sensores disponíveis
- Ligação a PC via USB incluída e ligação direta a projetor de vídeo Casio



Tabela Periódica



Laboratório portátil
 C-Lab (ligação direta ao PC
 e às calculadoras CASIO)

CASIO Portugal

Parque Expo - Rua do Polo Sul • N.º 2 • 4.º A - 1990-273 Lisboa (Portugal)
 Tel.: 218 939 170 • Fax: 218 939 179 • casioportugal@casio.pt • www.casio.pt

Díodos emissores de luz e iluminação

Katharina Lorenz¹, José Gonçalves Marques¹, Teresa Monteiro²

¹ Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Campus Tecnológico e Nuclear, Estrada Nacional 10, 2695-066 Bobadela LRS Portugal

² Departamento de Física e I3N, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

lorenz@ctn.tecnico.ulisboa.pt

Resumo

Os díodos emissores de luz (LED, acrónimo de *Light Emitting Diode*) são fontes de luz baseados em materiais semicondutores, que apresentam uma elevada eficiência, longo tempo de vida e elevada robustez. O desenvolvimento, nos últimos 20 anos, de LED azuis muito eficientes, abriu a possibilidade de utilizar estes dispositivos na geração da designada luz branca, os “LED brancos”, que já começaram a entrar nas nossas casas e que vão certamente revolucionar as tecnologias de iluminação nos próximos anos. Este artigo dá uma breve introdução ao desenvolvimento e funcionamentos dos LED e à sua utilização para a iluminação em geral.

Introdução

A iluminação tem estado intimamente ligada ao desenvolvimento humano e à industrialização, desde a invenção do fogo até ao desenvolvimento da lâmpada elétrica de filamento incandescente por Thomas Edison. Quando a Terra é vista do espaço, o brilho à noite é máximo nas zonas urbanizadas, que não coincidem sempre com as zonas mais habitadas, como se pode constatar na fotografia da NASA mostrada na Fig. 1. Um dos objetivos da iniciativa “Ano Internacional da Luz”¹ é, precisamente, a sensibilização para o facto de, ainda hoje, vastas regiões habitadas do mundo não disporem de eletri-



Fig. 1 - A Terra à noite, vista do espaço. (© NASA [1])

¹ *International Year of Light and Light-based Technologies (IYL 2015)*: Iniciativa de um vasto grupo de sociedades científicas promovida pela UNESCO - <http://www.light2015.org/>

cidade e, conseqüentemente, de iluminação. A iluminação de residências, empresas e espaços públicos corresponde a cerca de 15 % do consumo atual de eletricidade na Europa [2]. O desenvolvimento de dispositivos emissores de luz mais eficientes é assim uma prioridade elevada na investigação em física de materiais e premente para as indústrias do setor. Os díodos emissores de luz (LED, acrónimo de *Light Emitting Diode*) baseados em nitreto de gálio (GaN) e, em particular, na sua liga ternária de nitreto de gálio com índio, InGaN, mostraram já o seu extraordinário potencial neste domínio, sendo efetivamente as fontes de luz visível mais eficientes no mercado. O grande impacto social, ambiental e económico destes dispositivos foi reconhecido pelo Comité do Prémio Nobel da Física, que atribuiu este prémio em 2014 aos investigadores Isamu Akasaki, Hiroshi Amano e Shuji Nakamura pela invenção de LED azuis eficientes, que possibilitou o desenvolvimento atual na geração de luz branca para a iluminação, baseada em materiais inorgânicos de estado sólido [3].

Como funciona um LED?

Os LED são dispositivos optoelectrónicos que transformam energia eléctrica em luz. O processo é contrário ao mecanismo físico de uma célula solar que permite a conversão de luz solar em energia eléctrica. No caso de um LED, por injeção eléctrica, observa-se recombinação ótica. De uma forma simplificada, a estrutura de um LED pode ser discutida com base nos mecanismos de um díodo normal, nomeadamente considerando uma junção p-n de semiconductor, sujeita a uma tensão direta. Um semiconductor cristalino possui um conjunto de propriedades baseadas nos eletrões de valência dos átomos que o constituem, entre as quais a modificação dos níveis de energia atómicos dos átomos individuais em bandas de energia bem definidas (devido à presença de N átomos na rede), designadas por “banda de valência” e “banda de condução” e que possuem estados de energia que podem ser ocupados por eletrões. Estas bandas estão separadas entre si por uma região proibida de energias para eletrões, E_g , correspondendo ao hiato

energético do semiconductor (do inglês *bandgap energy*) e que varia de material para material, podendo ser entendido como uma impressão digital de um dado semiconductor. Estes materiais, quando intencionalmente dopados com elementos externos aos átomos constituintes da rede, de maior ou menor valência que estes, são ditos tipo-n ou tipo-p, uma vez que os primeiros doam facilmente eletrões para a banda de condução e os segundos geram défice de eletrões da banda de valência (lacunas). Numa junção p-n de um semiconductor em equilíbrio, regiões tipo-n e tipo-p estão em contacto através da junção, a designada junção metalúrgica, e a assimetria na densidade de portadores resulta na difusão de portadores através da junção, criando uma zona de depleção de carga que, por seu lado, induz um campo eléctrico nas proximidades da junção metalúrgica. Quando uma tensão direta é aplicada através da junção p-n, junção fora do equilíbrio, são injetados eletrões e buracos através da região de depleção. Estes portadores minoritários em excesso podem recombinar-se radiativamente com os portadores maioritários, dando lugar à emissão de luz (fotões), ou seja, à observação de eletroluminescência. A recombinação pode ser de natureza intrínseca, ou seja, entre as bandas de condução e valência (normalmente observada nos designados semicondutores de hiato energético direto) ou extrínseca (envolvendo impurezas externas no material). Este procedimento está na base da operação dos LED. Deste modo, e na maior parte dos casos, o hiato de energia do semiconductor determina a cor dos LED.

Uma breve história do LED

A emissão de luz por um material sólido quando excitado por uma fonte eléctrica foi observada pela primeira vez no início do século XX [4]. O fenómeno foi designado eletroluminescência, reconhecendo que o processo que levava à emissão de luz era fundamentalmente diferente do processo de incandescência. A eletroluminescência ocorre à temperatura ambiente, enquanto uma lâmpada incandescente emite luz quando o seu filamento é aquecido a muito alta temperatura (tipicamente acima de 750 °C) até começar a brilhar. O primeiro caso de eletroluminescência foi observado num semiconductor com largo hiato de energia, o carboneto de silício (SiC), que se verificou emitir luz azul. Contudo, este é um semiconductor com hiato energético indireto, logo muito ineficiente para processos de emissão de luz. Apesar de ter sido o primeiro material utilizado para o fabrico de LED, nun-

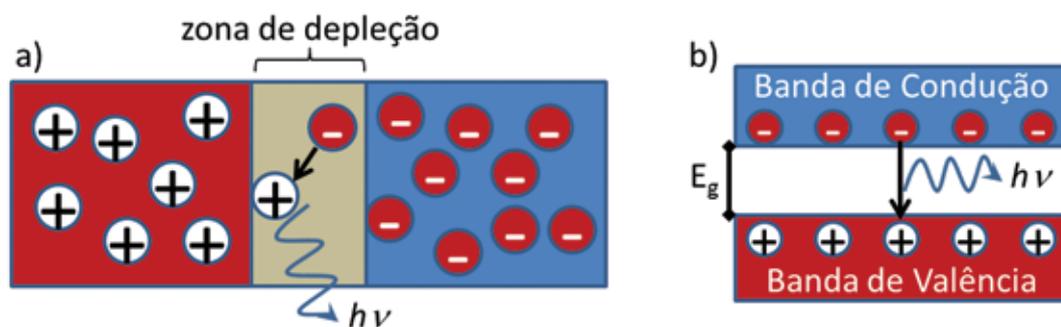


Fig. 2 - a) Esquema de um díodo que consiste numa junção p-n de semiconductor. Na zona de depleção, eletrões da banda de condução recombinam-se radiativamente com lacunas da banda de valência, emitindo um fóton. b) Diagrama simplificado da estrutura de bandas eletrónicas de um semiconductor. A energia do fóton emitido na recombinação banda a banda corresponde ao hiato de energia E_g do semiconductor.

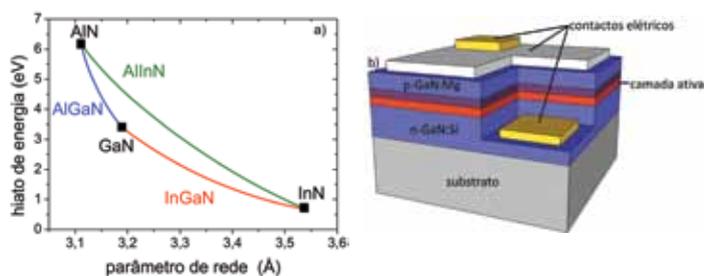


Fig. 3 - a) Hiato energético dos semicondutores III-N GaN, InN e AlN e dos seus compostos ternários em função do parâmetro de rede. É possível variar o hiato energético destes semicondutores adaptando a composição das ligas, sintonizando a cor de emissão dos LED. b) Esquema de um LED baseado em semicondutores III-N. A estrutura consiste em camadas crescidas por epitaxia num substrato, geralmente Al_2O_3 cristalino. As camadas tipo n e p são realizadas por dopagem de GaN com Si e Mg, respetivamente. A luz do LED surge da camada ativa que consiste num ou mais poços quânticos de InGaIn. A composição e espessura (~1-5 nm) destas camadas ultrafinas de InGaIn determinam a cor emitida do LED. O contacto elétrico do lado-p é geralmente realizado por uma camada condutora transparente à luz seguido por um contacto metálico pequeno.

ca conseguiu atingir as eficiências dos semicondutores III-V² desenvolvidos na segunda metade do século XX.

O desenvolvimento de LED e lasers eficientes na gama espectral do infravermelho e vermelho à base de ligas de AlGaInAs e AlGaInP possibilitou uma vasta gama de aplicações como, por exemplo, comandos à distância, lâmpadas de sinalização, bem como leitores e escritores de DVD. No fim dos anos 60 surgiram no mercado LED verdes à base de GaP:N, sendo que nestes a recombinação radiativa possui uma natureza extrínseca (deve-se à impureza de azoto na rede do fosfeto de gálio, GaP) [4]. Para complementar a emissão nas três cores primárias e, a partir da mistura destas cores, conseguir todas as cores no espectro visível, por exemplo, para um ecrã à base de LED, só faltava o LED azul.

Nos anos 70 começou uma primeira vaga de investigação nos semicondutores III-V, em que o elemento do grupo V é o azoto e, em particular, no nitreto de gálio, GaN. No entanto, apesar de uma década de trabalho intenso, pouco progresso foi conseguido, sobretudo devido à dificuldade em crescer filmes de GaN de boa qualidade bem como em encontrar um dopante eficiente de tipo-p neste material [4]. Poucos continuaram a apostar no GaN até ao início dos anos 90, altura em que Akasaki, Amano e Nakamura encontraram soluções para estes problemas fundamentais, iniciando uma nova vaga de investigação em nitretos que se mantém à atualidade. O desenvolvimento de LED e lasers azuis à base de nitretos semicondutores possibilitou, por exemplo, o novo formato de disco Blu-ray, capaz de armazenar cerca de 5 vezes mais informação que um disco DVD, bem como os designados “LED brancos” à base de materiais inorgânicos, atualmente utilizados em iluminação.

Os semicondutores III-N (GaN, InN e AlN, assim como os compostos ternários e quaternários de AlInGaIn) são semicondutores com hiato direto possibilitando aplicações optoelectrónicas eficientes. Através da sua composição é

possível controlar o valor do hiato energético, desde 0,7 eV para o InN, até 6 eV para o AlN (ver Fig. 3(a)). Apesar de ser teoricamente possível obter emissão numa gama espectral muito vasta, do infravermelho até ao ultravioleta, até agora só os LED azuis atingiram uma eficiência comparável com a dos vermelhos. Na Fig. 3(b) mostra-se um esquema de um LED azul típico, composto por camadas epitaxiais de GaN, tipos n e p, que formam o díodo de junção, bem como pela designada “camada ativa”, que consiste em uma ou mais camadas ultrafinas de InGaIn separadas por GaN (poços quânticos simples ou múltiplos, QW ou MQW). É nestas camadas de InGaIn, nos poços quânticos, que os eletrões e buracos preferencialmente se recombinam radiativamente, emitindo luz azul.

Os “LED brancos” para a iluminação

Branco é uma cor acromática (uma cor sem cor) que consiste na sobreposição de todas as frequências do espectro visível. O termo “LED branco” utilizado no dia-a-dia é uma escolha infeliz, uma vez que não existe nenhum LED que emita luz branca. Um LED emite luz de uma cor bem definida que depende do hiato de energia do semicondutor em que é baseado.

Existem duas soluções tecnológicas para transformar a luz monocromática dos LED em luz branca (Fig. 4). A solução utilizada na maioria dos designados “LED brancos” disponíveis no mercado consiste em acoplar um LED azul de InGaIn/GaN a uma camada de um material luminescente (vulgarmente designado por *phosphor*). Este material luminescente que reveste o LED azul absorve parte da radiação do mesmo e emite luz amarela. A mistura das bandas de emissão azul e amarela é interpretada como luz branca pelo olho humano (Fig. 4(a)). Como material luminescente são normalmente utilizadas matrizes óxidas dopadas com lantanídeos. No entanto, o processo de absorção e conversão de luz de alta frequência para luz de baixa frequência está sujeito a perdas, as quais limitam a eficiência deste tipo de LED. Uma tecnologia potencialmente mais eficiente combina três LED a emitir no vermelho, verde e azul (RGB), cuja mistura também resulta em luz branca (Fig. 4(b)). Contudo, enquanto os LED azuis e vermelhos apresentam uma eficiência quântica

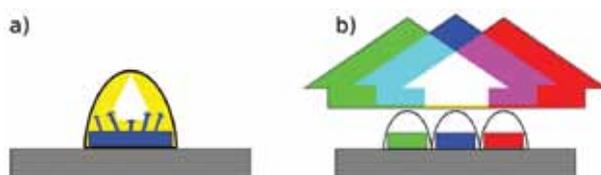


Fig. 4 - Representação esquemática das duas estratégias para produzir “luz branca” utilizando LED: a) Aproximação que considera um LED azul revestido por um material luminescente que emite na gama amarela. b) Aproximação que utiliza três LED que emitem no vermelho, verde e azul (RGB). A sobreposição das bandas de luminescência é percebida como branco ao olho humano [5]. (© WILEY)

² Semicondutores III-V são compostos feitos de elementos dos grupos III (Al, Ga, In) e V (N, P, As) da tabela periódica dos elementos.

acima dos 90 % (isto é, mais de 90 % da energia elétrica é efetivamente transformada em luz), a eficiência dos LED verdes é reduzida, uma questão que é conhecida como o problema do hiato verde (ou *green gap*). O desenvolvimento de LED verdes mais eficientes é assim um dos temas mais abordados pela investigação atual na área dos semicondutores, assim como a procura de emissão de luz branca em amostras monolíticas baseadas em GaN [6, 7].

A introdução de lâmpadas LED no mercado coincidiu praticamente com a entrada em vigor de novas regras na União Europeia sobre a marcação de lâmpadas (Regulamento n.º 874/2012, de 12 de julho). Com efeito, as lâmpadas incandescentes eram apenas caracterizadas pela sua potência e não pelo seu fluxo luminoso. Com a introdução das lâmpadas CFL (*Compact Fluorescent Lamp*), passaram a ser indicadas a potência da nova lâmpada e a de uma lâmpada incandescente emitindo a mesma quantidade de luz, para ilustrar a redução de consumo. Atualmente, é indicado o fluxo luminoso em lúmen (lm) e a potência da lâmpada. Como referência, uma lâmpada incandescente de 75 W emitia 1100 lm, correspondendo a cerca de 15 lm/W; para lâmpadas de baixa potência este valor era menor, tipicamente 12 lm/W. As melhores lâmpadas LED disponíveis comercialmente estão tipicamente no intervalo 100 a 120 lm/W, tendo-se já conseguido protótipos com 300 lm/W [2].

Nas lâmpadas LED disponíveis comercialmente, os LED estão geralmente dispostos de forma linear, quadrangular ou circular. Na Fig. 5, mostra-se uma lâmpada com casquilho E14 (casquilho dito de Edison, em homenagem ao seu inventor, com 14 mm de diâmetro) completa e depois de removido o difusor de luz, expondo dez LED dispostos de forma circular. Esta lâmpada de 400 lm tem um consumo de apenas 5,5 W a 220 V, correspondendo a 73 lm/W, ou seja, cerca de cinco vezes mais luz que uma lâmpada incandescente. Neste modelo, os dez LED estão montados em série e o conjunto é alimentado com 150 V, em corrente contínua. Esta tensão é obtida a partir dos 220 V em corrente alterna num pequeno circuito montado entre o casquilho convencional e os LED. Para a eficiência global da lâmpada LED, contribui assim não só o modelo de LED utilizado, mas também o conversor de corrente alterna para corrente contínua.

Conclusão

A utilização de “LED brancos” centrou-se até recentemente em aplicações de nicho, como a retroiluminação de *écrans* em monitores, televisões e telemóveis, nos faróis de automóveis ou ainda em semáforos, onde o pequeno tamanho e a robustez, em combinação com uma intensidade elevada, apresentam vantagens óbvias comparativamente a outras fontes de luz. A queda dos preços na



Fig. 5 - Lâmpada com casquilho E14 completa e depois de removido o difusor de luz, expondo dez LED dispostos de forma circular.

produção de LED nos últimos anos, o aumento significativo da sua emissão de luz por watt, em conjunto com os preços elevados de eletricidade e um aumento da consciência do público e dos governos perante problemas de sustentabilidade energética, prepararam o caminho para uma utilização de LED na iluminação geral em grande escala. Cerca de 135 anos depois da invenção da lâmpada incandescente por Thomas Edison, estamos perante uma nova revolução na iluminação. Nos próximos 20 anos, os LED substituirão a maior parte das lâmpadas convencionais, abrirão o caminho para uma poupança significativa de eletricidade e trarão soluções de iluminação acessíveis a regiões menos desenvolvidas do mundo. Podem assim contribuir para uma gestão energética mais sustentável e uma distribuição de recursos mais justa no futuro. Esperemos que seja um futuro iluminado.

Referências

1. <http://visibleearth.nasa.gov/view.php?id=79765> (acedido em 04-11-2015).
2. G. Zissis, P. Bertoldi, European Commission JRC Science and Policy Report "2014 Update on the Status of LED market", doi: 10.2790/756893.
3. "The Nobel Prize in Physics 2014". Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 7 Nov 2015. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/
4. E. Fred Schubert, "Light Emitting Diodes", 2ª edição, Cambridge University Press, 2006, ISBN 978-0-521-86538. <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>
5. K. P. O'Donnell, M. Auf der Maur, A. Di Carlo, K. Lorenz, "It's not easy being green: Strategies for all-nitrides, all-colour solid state lighting", Phys. Status Solidi RRL 6, 49-52 (2012).
6. N. Ben Sedrine, T. C. Esteves, J. Rodrigues, L. Rino, M. R. Correia, M. C. Sequeira, A. J. Neves, E. Alves, M. Bockowski, P. R. Edwards, K.P. O'Donnell, K. Lorenz and T. Monteiro, "Photoluminescence studies of a perceived white light emission from a monolithic InGaN/GaN quantum well structure", Scientific Reports 5, 13739 (2015).
7. M.A. Sousa, T.C. Esteves, N. Ben Sedrine, J. Rodrigues, M.B. Lourenço, A. Redondo-Cubero, E. Alves, K.P. O'Donnell, M. Bockowski, C. Wetzel, M.R. Correia, K. Lorenz, T. Monteiro, "Influence of nitrogen implantation and thermal annealing on the optical properties of green emitting InGaN/GaN multiple quantum wells", Scientific Reports 5, 09703 (2015).



Katharina Lorenz doutorou-se em Física na Universidade de Bona, Alemanha, em 2002. Nesta altura iniciou o trabalho nos semicondutores III-N com um estudo sobre a dopagem de GaN por implantação iónica. Presentemente é Investigadora Auxiliar no Instituto Superior Técnico e membro do Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear deste instituto. A sua área de especialização é a aplicação de técnicas nucleares na caracterização e modificação de materiais funcionais. Em particular, estuda heteroestruturas e nanoestruturas de semicondutores para aplicações na eletrónica e optoelectrónica.



José Gonçalves Marques doutorou-se em Física (Física Nuclear) na Universidade de Lisboa, em 1996. Presentemente é Investigador Principal com Agregação no Instituto Superior Técnico e membro do Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares deste Instituto. É ainda Vice-Presidente do Instituto Superior Técnico, sendo responsável pela gestão do Campus Tecnológico e Nuclear. Os seus interesses atuais de investigação são o estudo e caracterização de defeitos criados por radiação em materiais, em particular em nitreto de gálio.



Teresa Monteiro doutorou-se em Física (Matéria Condensada) na Universidade de Aveiro, em 1993. Na atualidade, é Professora Associada com Agregação da Universidade de Aveiro, docente do Departamento de Física e membro do Laboratório Associado I3N. O seu domínio de especialização é a caracterização óptica de materiais de largo hiato (em volume, filmes finos e nanoestruturas) de interesse para optoelectrónica e bio-aplicações. Os seus primeiros trabalhos em nitretos do grupo III datam de 1996.

Comunicar à velocidade da Luz

Paulo André

Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Instituto Superior Técnico
- Universidade de Lisboa e Instituto de Telecomunicações

Desde os primórdios da humanidade que a comunicação se assumiu como um desígnio. O registo do primeiro sistema de comunicações a longa distância remonta a 1000 a.C., na China, onde sinais de fumo foram utilizados para a transmissão de mensagens codificadas. Pelo seu carácter visual, podemos considerar este como o primeiro sistema de comunicações, baseado em sinais ópticos, ou seja, o primeiro sistema de comunicações ópticas.

A primeira rede de comunicações envolvendo sinais visuais, os semáforos de Chappes, foi implementada muitos séculos depois, em 1791. Esta rede abrangeu uma vasta área do império napoleónico, desde Veneza até ao norte de Espanha, à Bélgica e à Holanda, tendo como ponto central agregador a capital do império, Paris.

Em 1840, ocorre um marco histórico dos sistemas de comunicação com a invenção do telégrafo por Samuel Morse, permitindo o aumento da capacidade de envio de informação. Quase em simultâneo, Daniel Colladon e Jacques Babinet demonstraram, em Londres e Paris, a guiagem de sinais ópticos através de fios de água. Estas demonstrações motivaram, em 1870, John Tyndall para o estudo da guiagem de sinais ópticos através da reflexão interna total.

Em 1866, regista-se a entrada em funcionamento do primeiro cabo transatlântico de comunicações telegráficas, com capacidade para transmitir oito palavras por minuto, a um custo de aproximadamente 100 EUR por palavra (a preços atuais).

Alexander Graham Bell, conhecido como inventor do telefone em 1876, teve outro contributo, bem menos conhecido, para o desenvolvimento das comunicações ópticas, com a apresentação em 1880 do "Fotofone" (Figura 1). Tratava-se de um telefone

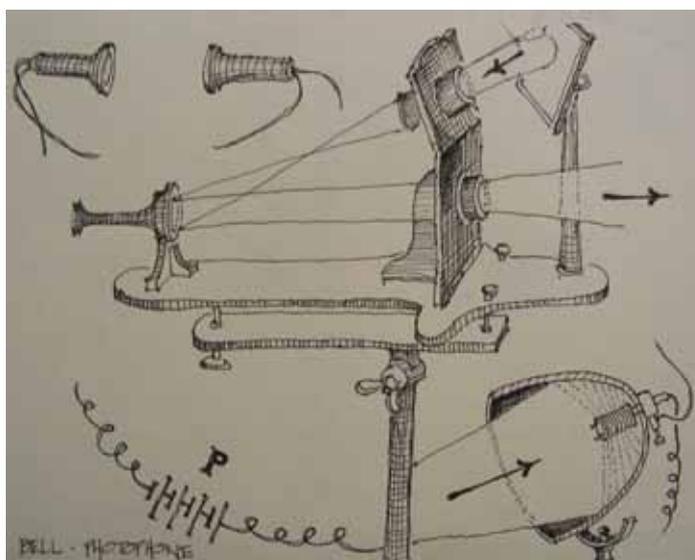


Fig. 1 - Ilustração do fotofone.¹

que recorria à luz solar para transmitir a voz. Apesar do carácter inovador, rapidamente se percebeu que o desempenho deste sistema estava condicionado às condições atmosféricas, necessitando de um meio protegido para assegurar a propagação dos sinais ópticos a longas distâncias.

Na primeira metade do século XX, o foco do desenvolvimento em comunicações centrou-se nos sistemas sem fios, ou seja, rádio. De realçar a atribuição, em 1909, do prémio Nobel da Física a Guglielmo Marconi e Karl Ferdinand Braun por "*recognition of their contributions to the development of wireless telegraphy*".

Em 1958, é reportado o conceito do laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou seja, Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação) e os primeiros protótipos são demonstrados experimentalmente

¹ Imagem retirada de: <http://mfleisig.wordpress.com/2011/02/09/photophone-bagpipes/>

em 1960. Estas fontes de luz foram identificadas como ideais para utilização em fibras ópticas. Em 1961, Elias Snitzer publicou um artigo com a descrição teórica e experimental (utilizando um laser) da propagação de sinais em fibras ópticas monomodo. Nessa época, o uso das fibras ópticas estava limitado a aplicações médicas, como sistemas de iluminação e captação de imagens em endoscópios. Esta era a aplicação lógica para guias de onda que apresentavam elevados valores de atenuação (logo com comprimentos curtos de transmissão de informação).

Em meados da década de 60 do século XX, Charles Kao fomentou a ideia de que a atenuação das fibras ópticas poderia ser reduzida para valores inferiores a 20 dB/km, utilizando sílica com um elevado grau de pureza, o que possibilitaria a sua utilização para comunicações a longa distância. Este trabalho impulsionou o desenvolvimento das comunicações ópticas e permitiu uma completa alteração do paradigma existente. Pelo seu contributo, Charles Kao recebeu o Nobel da Física em 2009, por *“groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication”*. Curiosamente, esta atribuição ocorreu 100 anos após Marconi ter recebido o mesmo prémio.

A proposta de Kao para a redução da atenuação das fibras foi implementado industrialmente, em 1970, por Robert D. Maurer, Donald Keck e Peter C. Schultz para a empresa Corning Glass Works (ainda hoje o maior produtor mundial de fibras ópticas). Rapidamente surgiram sistemas comerciais de comunicações ópticas, sendo que a primeira ligação, a 6 Mbit/s, foi implementada em 1975 em Long Beach, Califórnia.

Nas ligações por fibra óptica, a distância máxima de cobertura está dependente da atenuação que a fibra impõe ao sinal ótico. Em 1986, este constrangimento foi ultrapassado, com o desenvolvimento de amplificadores ópticos baseados

em fibras dopadas com érbio, por David N. Payne, Emmanuel Desurvire e Randy Giles. O primeiro cabo telefónico transatlântico baseado em fibras e amplificadores ópticos, designado como TAT-8, entrou em operação em 1988.

A partir desse ponto, o crescimento da cobertura geográfica e do desempenho dos sistemas de comunicações ópticas foi fulgurante (Figura 2). Ao longo das duas últimas décadas, o recurso a diversas técnicas de modulação e de multiplexagem permitiram aumentar a capacidade de transporte de informação, sendo possível encontrar sistemas com uma capacidade superior a 100 Pbit/(s km).

Os desafios atuais prendem-se com a redução do consumo energético e do custo do equipamento, bem como com o aumento da abrangência geográfica das redes, providenciando ligação óptica até casa do utilizador.

Para os utilizadores de plataformas tecnológicas que requeiram o uso de sistemas de comunicação (computadores, telemóveis, TV, etc.), nem sempre é perceptível que esse recurso só é possível graças a uma rede que funciona com sinais ópticos. Existe, assim, uma clara ligação causa-efeito entre a massificação do uso da internet e o desenvolvimento das redes de comunicação baseadas em fibras ópticas, tendo estas impulsionado o desenvolvimento da era digital em que vivemos.

Seria impensável para Charles Kao, em 1965, prever as repercussões que o seu trabalho teria 50 anos depois. Não restam hoje dúvidas que, em termos de comunicações, espera-nos um futuro cheio de luz, tal como constatou Kao na sua palestra da cerimónia de atribuição do prémio Nobel em 2009: *“Sand from centuries past: send future voices fast”*.

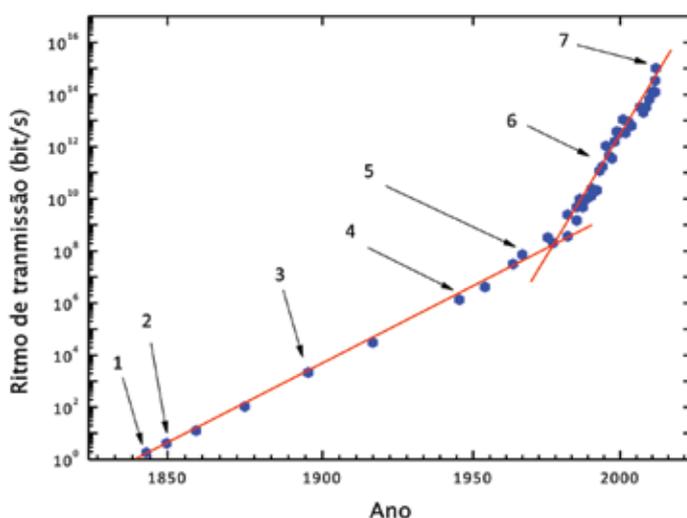


Fig. 2 - Evolução do ritmo de transmissão dos sistemas de comunicação. 1 - Primeiro telégrafo; 2 - Telégrafo com código de Morse; 3 - Telefone; 4 - Cabo coaxial; 5 - Satélite; 6 - Fibra óptica com multiplexagem espectral; 7 - Fibra óptica com multiplexagem espacial. Observam-se duas tendências de crescimento, descritas pelas retas: i) antes da utilização dos sistemas óticos (<1975), com uma taxa anual de crescimento do ritmo de transmissão de ~ 1 Mbit/s e ii) com sistemas óticos (d. 1975), com uma taxa anual de crescimento do ritmo de transmissão de ~1 Tbit/s.



Paulo Sérgio de Brito André nasceu em 1971; licenciou-se em Engenharia Física e Doutorou-se em Física, na Universidade de Aveiro, respetivamente, em 1996 e 2002. Em 2011, realizou as provas de Agregação em Física, na Universidade de Aveiro. Atualmente, é Professor Associado no Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa e Investigador integrado no Instituto de Telecomunicações. Os seus interesses atuais de investigação incluem o estudo, desenho, produção e implementação de componentes fotónicos para utilização em sensoriamento, comunicações ópticas e aplicações energéticas.

Radiação e energia solar

Clarisse Magarreiro, Sara Freitas, Miguel Centeno Brito

Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Quase toda a luz que ilumina o nosso planeta vem direta ou indiretamente do nosso sol. A luz do dia e a iluminação natural são radiações eletromagnéticas na região do visível que chega do Sol. A iluminação artificial, gerada em lâmpadas ou LED, é alimentada por energia que vem ou veio (num passado muito longínquo no caso dos combustíveis fósseis) da nossa estrela¹.

A radiação solar é fonte de vida porque, graças a ela, crescem as plantas que produzem oxigénio e nos dão alimento, que nos fornecem energia para vivermos. Mas a radiação solar também pode ser aproveitada para produzir eletricidade e alimentar o mundo em que vivemos. Uma das formas de o fazer é através da conversão fotovoltaica em que um dispositivo, chamado célula solar, converte a energia solar em energia elétrica. Trata-se de um processo fiável, limpo e sustentável, porque inesgotável e não poluidor, e com um recurso abundante e bem distribuído pelo planeta.

Para avaliarmos o potencial da energia solar fotovoltaica numa determinada região ou cidade, ou para projetar sistemas fotovoltaicos, interessa caracterizar a radiação solar que chega a cada sítio e em cada instante.

O cálculo da irradiância horária num local de um planeta sem atmosfera seria um problema “bem comportado” dependendo só da latitude, do dia e da hora e de algum conhecimento de trigonometria esférica. Mas na Terra, temos atmosfera. É portanto preciso levar em consideração os diferentes processos que aí ocorrem, em particular a dispersão

e a absorção da luz nos gases e partículas atmosféricas, afetando de forma diferente os diferentes comprimentos de onda da radiação solar incidente.

Um dos principais efeitos da atmosfera é alterar o ângulo de incidência de uma fração dos raios solares. Isso significa que, para um observador na superfície terrestre, a radiação solar divide-se em três componentes principais, com características diferentes:

- a radiação direta (que projeta sombras) vem diretamente da direção do disco solar;
- a radiação difusa (que inclui a radiação solar de todas as direções do céu, com a exceção do disco solar), e
- a radiação refletida (que resulta da reflexão da radiação solar na superfície, dependendo portanto das propriedades ópticas da superfície), também denominada albedo (Figura 1).

$$\text{Irradiância Global} = \sum_{\text{dias}} \sum_{\text{horas}} \text{Direta} + \text{Difusa} + \text{Refletida}$$

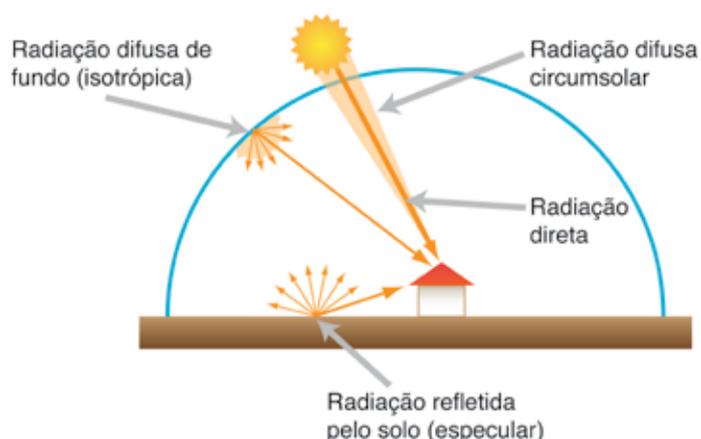


Fig. 1 - Representação esquemática das componentes constituintes da radiação global incidente numa superfície.

¹ Pelo seu pequeno impacto em termos globais, estamos a ignorar outras fontes de energia não-solares como a energia nuclear, energia geotérmica de profundidade e a energia das marés cujas fontes são radioativa ou gravítica, respetivamente.

Como os efeitos dos processos atmosféricos de absorção e dispersão da luz solar dependem de condições meteorológicas difíceis de prever com rigor, na prática, é necessário desenvolver modelos de radiação solar empíricos, baseados em medidas experimentais.

As grandezas relevantes mais simples e menos onerosas de medir são a irradiância global horizontal e as horas-de-sol (definido como o período em que a irradiância é maior que 120 W/m^2). A medida das componentes direta e difusa exige instrumentos mais sofisticados pelo que as redes de medida, a nível nacional ou regional, são muito menos abundantes e fiáveis. Assim sendo, estudam-se correlações entre as radiações difusa e global e outros parâmetros atmosféricos como a turbidez ou a quantidade de nuvens, de forma a conseguir fazer boas estimativas da radiação global sem recurso a equipamentos muito caros.

Os resultados são apresentados na Figura 2. Podemos estimar a radiação global (neste caso ao longo de um ano) para cada localização considerada. Conhecida a radiação, pode-se determinar a inclinação e orientações que otimizam a exposição solar e prever quanta eletricidade um sistema fotovoltaico produziria naquele sítio.

Esta figura mostra claramente que os países do sul da Europa apresentam condições privilegiadas para o aproveitamento da energia solar, com potenciais fotovoltaicos cerca de +30 % do existente em países como a Alemanha ou o Reino Unido, onde o mercado fotovoltaico está muito mais desenvolvido. Mas isso já é assunto de geopolítica e economia e não de radiação solar...

Dado que grande parte da energia, nomeadamente eletricidade, é consumida nas grandes cidades, será preferencialmente no meio urbano que os sistemas de conversão

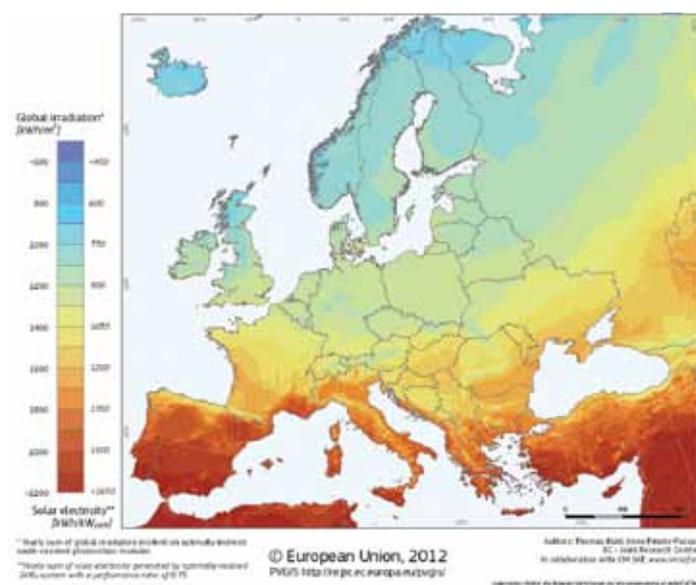


Fig. 2 - Potencial anual de radiação global² e respetivo potencial de eletricidade a gerar para a Europa. Fonte: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

² Radiação Global - Somatório anual de radiação global incidente em módulos fotovoltaicos orientados a sul com ângulo de inclinação ótimo; eletricidade Solar - Somatório anual de eletricidade gerada por um sistema em ângulo de inclinação ótimo de 1 kW_p e eficiência de 0,75.

de radiação solar em energia deverão localizar-se: a produção estará próxima do local de consumo. O ambiente construído, no entanto, nem sempre apresenta características propícias à instalação de painéis ou coletores solares. Enquanto que, em áreas não-urbanas, a disponibilidade de radiação solar está relacionada somente com as condições meteorológicas, nas cidades, fatores como área de telhados limitada e obstruções à incidência de radiação também limitam o potencial da energia solar. Assim sendo, as instalações solares em meio urbano devem ser planeadas e avaliadas com especial cuidado, existindo para esse fim diversas abordagens mais ou menos complexas.

Primeiro há que estimar a irradiância direta. Assim, uma vez que o movimento aparente do Sol no céu é bem conhecido, é possível saber qual a respetiva posição em qualquer momento do ano e determinar se, do ponto de vista de uma dada superfície, o Sol está ou não obstruído e, portanto, se esta recebe radiação direta ou se está sombreada. Caso não haja sombreamento, o valor da irradiância direta obtém-se recorrendo a dados medidos em estações meteorológicas ou em séries sintéticas de radiação para a área em questão (tipicamente relativas ao plano horizontal, pelo que é necessário transpor através de geometria simples o valor na horizontal para a inclinação e orientação pretendida) ou a modelos de cálculo baseados na transmissão e dispersão dos raios solares através da atmosfera terrestre.

Já o cálculo da componente difusa é mais complicado. Muitos dos métodos de cálculo empíricos dividem esta componente em duas: uma de fundo – proveniente de todo o céu visível após interação com a atmosfera – e uma circum-solar - proveniente da auréola solar, que se altera de acordo com o conteúdo de partículas atmosféricas (poluição, poeiras, nevoeiro). Por simplicidade, muitas metodologias ignoram a componente circumsolar e assumem que a radiação difusa de fundo é uniforme e isotrópica, introduzindo um “Fator de Céu Visível” para a quantificar.

O grande desafio de estimar a irradiância no meio urbano prende-se com a complexidade da topografia, incluindo edifícios, árvores e outros equipamentos urbanos. Toda a informação associada a estes elementos deve ser conhecida, nomeadamente o respetivo formato, posição e altura, o que se torna tanto mais complexo quando mais abrangente for a área a analisar. Sendo que se está a lidar com dados a três dimensões, torna-se essencial armazená-los, tratá-los e analisá-los recorrendo às capacidades dos computadores modernos, nomeadamente a *software* de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ou de Desenho Assistido por Computador (CAD) e programas de cálculo numérico (Figura 3).

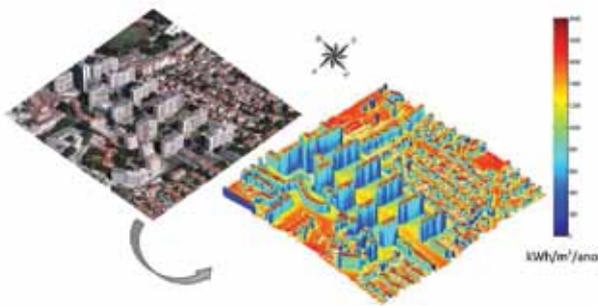


Fig. 3 - Exemplo de uma área de estudo em Alvalade, Lisboa (imagem da esquerda, retirada do *GoogleMaps*) e respetivo potencial solar calculado através de uma ferramenta desenvolvida por uma equipa do DEGGE- FCUL (à direita).

Mas como se pode obter informação 3D ao nível de um bairro, ou mesmo uma cidade? Existem vários métodos, uns mais simples para quando o estudo não requer muito detalhe e outros mais exigentes. No primeiro caso, são de realçar os mapas com a pegada dos edifícios, que se podem elevar à altura destes e assim representar o edificado com base em polígonos. Por outro lado, é também possível executar o desenho de raiz incluindo pormenores além de superfícies lisas. No entanto, hoje em dia, começa a ser comum o uso de dados provenientes de levantamentos LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Estes levantamentos consistem no envio e receção de feixes laser a partir de um avião, cujo intervalo de tempo permite inferir acerca da localização em longitude, latitude e altura de um determinado ponto do tecido urbano. Após o devido tratamento, obtém-se um Modelo Digital da Elevação (MDE) pronto a entrar como representação do ambiente físico numa simulação computacional.

Como se pode imaginar, quanto maior for a resolução espacial dos dados e o intervalo de tempo que no qual se quer determinar a irradiância, maior será o poder computacional solicitado, pelo que um dos grandes desafios que se colocam atualmente está relacionado com o desenvolvimento de algoritmos que funcionem em computação paralela, que sejam simplificados sem comprometer a qualidade dos resultados e que possibilitem a consulta e interação pelo público em geral, de maneira a disseminar a importância da radiação solar nas nossas vidas.



Clárisse Magarreiro é mestre em Engenharia da Energia e Ambiente pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (2011). Em 2012, iniciou o doutoramento em Sistemas Sustentáveis de Energia na mesma Universidade. Analisa nesse âmbito a aplicabilidade de modelos regionais de previsão numérica de tempo a estudos de recurso de energia solar em locais com características meteorológicas distintas.



Sara Freitas é estudante de doutoramento na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, no âmbito do programa MIT Portugal em Sistemas Sustentáveis de Energia. Obteve na mesma instituição o mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente. A sua investigação concentra-se na avaliação do potencial solar fotovoltaico em ambiente urbano e na otimização destes sistemas de energia. Encontra-se igualmente envolvida em atividades de divulgação e na orientação científica de alunos de DEGGE.



Miguel Centeno Brito é professor na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa no Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, e coordenador do Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente. Licenciado em Engenharia Física Tecnológica no Instituto Superior Técnico, e doutorado na Universidade de Oxford, Reino Unido, é investigador no Instituto Dom Luiz. As suas principais áreas de interesse são análise do recurso e previsão solar, em particular em meio urbano, eletrificação solar remota e sistemas de energia. É também responsável pelo Campus Solar – Ensaios de Sistemas Solares, no campus da faculdade.

Luz Cósmica – Linguagem Universal

Rosa Doran

NUCLIO - Núcleo Interativo de Astronomia

rosa.doran@nuclio.pt

Resumo

Em 2015, celebramos o Ano Internacional da Luz. Um pouco por todo o mundo, celebram-se os 1 000 anos do tratado de óptica, publicado por Ibn Al-Haitham, os 150 anos do eletromagnetismo de Maxwell, os 100 anos da teoria da relatividade geral de Einstein, os 50 anos da descoberta da radiação cósmica de fundo, entre outras importantes efemérides. Todas estas celebrações têm algo em comum, a capacidade dos seres humanos de decifrar a linguagem universal, a luz cósmica. Este artigo pretende chamar a atenção para a importância da proficiência nesta comunicação entre seres humanos e o cosmos. Pretende ainda ser um alerta para a necessidade de inspirar as novas gerações para a importância e a beleza da ciência, ferramenta indispensável para a construção de uma civilização justa, tolerante e consciente da sua dimensão e fragilidade neste lindíssimo cosmos.

Introdução

O texto que se segue apresenta uma estrutura fragmentada mas que na verdade reconstrói-se facilmente como as peças de um *puzzle*. Um *puzzle* em que cada peça é essencial e única. Ao juntarmos todas as peças, ficará evidente a sua complementaridade, a sua infinitesimal dimensão e enorme importância para a manutenção do edifício do saber. Ficará também evidente a escassez de elementos existentes face aos desafios que esta estrutura terá que enfrentar. O epílogo será um convite a todos para repensar o seu próprio diálogo com a luz.

1. Luz e Conhecimento = Ser Humano

A palavra “humano” tem origem no latim e serve para designar aquilo que é relativo à espécie humana. O que distingue o ser humano dos outros animais é a sua capacidade de agir com racionalidade.

No Ano Internacional da Luz, essa definição assume especial dimensão. “Consciência” é o que nos difere dos restan-

tes seres que habitam pacificamente este planeta. Em 2015, a tecnologia associada à luz permite uma saudável globalização do saber e das boas práticas a ele associadas. No mundo da educação, as novas tecnologias prometem verdadeiras revoluções. As autoridades da educação em vários países resistem às mudanças mas elas já invadiram as talentosas mãos e mentes dos estudantes e o modelo de escola que ainda vemos na maior parte das “casas do saber” tem os dias contados. As novas formas de comunicação e troca de saber e conhecimento são à velocidade da luz e a nossa capacidade de adaptação tem que acompanhar essa evolução. Essa é a beleza de ser humano, ser capaz de se adaptar aos ambientes, de ser mutável e evoluir, sempre. Essa é a melhor definição de “ser” humano, ser capaz de acompanhar as mutações necessárias para uma melhor adaptação ao habitat que se pretende cada vez mais global com oportunidades iguais para todos.

2. Luz que vem do passado

Einstein revolucionou a nossa forma de perceber o Universo que nos rodeia e abriu novos horizontes para a sua compreensão. Uma das consequências das suas brilhantes ideias é estarmos condicionados por uma barreira intransponível e muito angustiante. A velocidade da luz no vácuo é constante e nada pode viajar mais rápido do que a luz, que ainda por cima não é instantânea como queria Newton. Essa limitação traz consequências perturbadoras, uma delas o facto de nunca podermos ter acesso ao presente. É verdade que no nosso dia a dia não nos damos conta dessa importante realidade, mas a verdade é que a não instantaneidade da luz faz com que a imagem da pessoa que está mesmo ao nosso lado demore uma fração de segundo para chegar aos nossos olhos. O nosso cérebro não é capaz de



Fig. 1 - A imagem de campo profundo feita pelo telescópio espacial Hubble é uma das mais fabulosas imagens feitas no século passado. Aqui encontramos mais de dez mil galáxias observadas num pequeno retalho do nosso céu noturno.

perceber esse atraso na transmissão de informação, mas ela existe e tem importantes consequências. Vejamos por exemplo a belíssima imagem (Figura 1) feita pelo telescópio espacial Hubble.

Para obtenção deste extraordinário resultado, o telescópio esteve a capturar fótons durante dez dias. Nesta imagem, com algumas exceções, cada pontinho é uma galáxia, algumas delas muitas vezes maiores do que a nossa. Nesta imagem, há galáxias em diferentes fases da sua evolução. Temos galáxias que se encontram a alguns milhões de anos-luz de distância de nós e outras, na mesma imagem, que se encontram a milhares de milhões de anos-luz de distância. Numa representação mais simples, seria a mesma coisa que fazermos uma fotografia num belo jardim onde passamos uma agradável tarde em família e na mesma fotografia conseguiríamos ver os nossos filhos e netos, os nossos pais, avós, bisavós e por aí afora até à origem dos seres vivos no planeta. Parece confuso não é? Mas essa é a beleza desvendada pela teoria da relatividade de Einstein.

3. Luz e magia

É parte inerente de “ser” humano a atração que sentimos quando confrontados com realidades desconhecidas, novos conhecimentos. Infelizmente a procura vai muitas vezes para a *fastfood* da informação. Milagres inexplicáveis, acontecimentos estranhos, fenómenos paranormais. Em geral as teorias de conspiração, as verdades escondidas, são a consequência de uma de duas situações. Ganham dimensão pelas mãos de quem não aprendeu ciência na escola e são iniciadas por quem enrique-

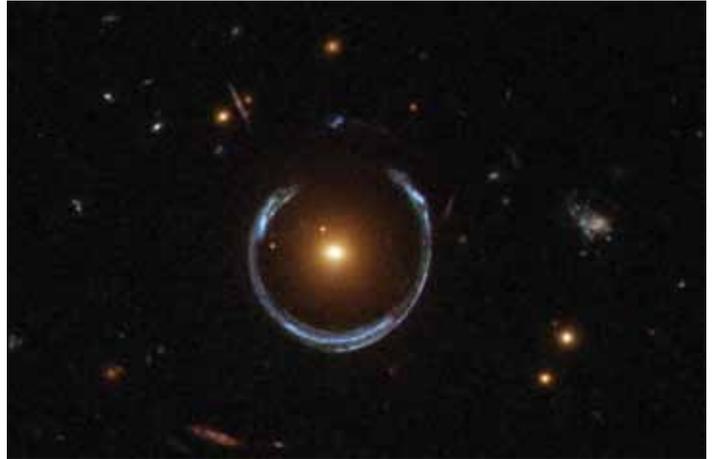


Fig. 2 - Lente gravitacional LRG 3-757 descoberta em 2007 nos dados do levantamento Sloan Digital Sky Survey.

ce à custa destes. Os fenómenos raros e intrigantes estão por todo o lado. Vejamos por exemplo o fascinante anel de Einstein (Figura 2).

O fenómeno da lente gravitacional foi previsto pelo cientista em 1912. É uma consequência do efeito gravítico de objetos de grande massa que se interpõe entre o observador e a fonte emissora da luz. Na verdade, as imagens distorcidas que vemos na figura são cópias de um objeto que não está visível por estar por trás do objeto responsável pela deflexão dos raios de luz. São uma miragem cósmica surpreendente mas perfeitamente explicada. Para compreendê-la foi necessário alguém com um grande grau de proficiência na linguagem do Universo.

4. Luz pelos “olhos” dos telescópios

Os nossos olhos estão perfeitamente adaptados ao nosso planeta e à nossa estrela, o Sol. É por esta razão que a zona do espectro eletromagnético para a qual somos mais sensíveis encontra-se nas bandas do que chamamos visível. Mas a parte visível do espectro é apenas uma minúscula fração, como podemos ver na Figura 3.

E se o Sol fosse uma estrela cujo pico de emissão estivesse na banda do infravermelho? Provavelmente veríamos o calor e não a cor. Felizmente, e por sermos capazes de decifrar a linguagem do universo, conseguimos equipar telescópios

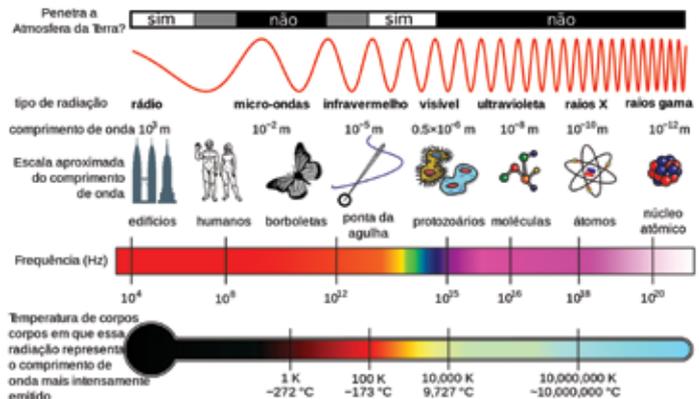


Fig. 3 - Espectro eletromagnético.

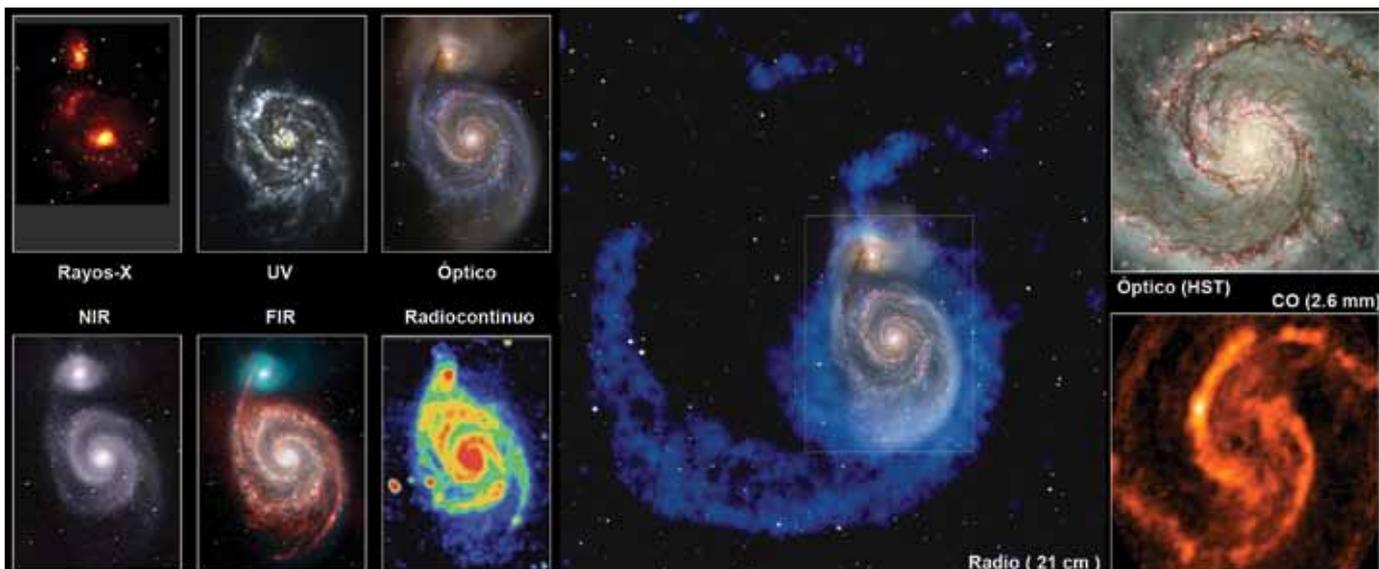


Fig. 4 - Galáxia M51 em vários comprimentos de onda.

(em terra e no espaço) com detetores capazes de detetar fótons nos vários comprimentos de onda. É assim que conseguimos, cada vez mais, perceber a dimensão e beleza deste gigantesco cosmos que nos rodeia. Vejam por exemplo este bonito exemplo da galáxia M51 (Figura 4).

Fótons com diferentes energias mostram diferentes partes da galáxia onde diferentes fenómenos têm lugar. É ao observar as galáxias com este incrível detalhe de informação que somos capazes de concluir que não há um local privilegiado no nosso Universo, que os elementos químicos detetados pelos nossos equipamentos são os mesmos que encontramos na natureza, no planeta Terra.

5. Luz e Vida

Estas conversas com o Universo, nos diferentes compri-



Fig. 5 - Nebulosa de Órion.

mentos de onda, contam-nos histórias de outros mundos, alguns deles quiçá com as condições ideais para a vida, igual ou diferente da nossa, mas muito provavelmente baseada em carbono. A Figura 5 mostra a nebulosa de Órion, um berçário de estrelas, visível a olho nu durante as noites de inverno no hemisfério Norte, e que alberga uma grande quantidade de protoestrelas, e possivelmente, sistemas protoplanetários.

Alguns destes planetas poderão ter as condições necessárias de habitabilidade. Conhecemos neste momento mais de 2000 planetas à volta de outras estrelas. Alguns destes planetas encontram-se na zona habitável da sua estrela. Novas missões espaciais estão a ser planeadas com o objetivo de descobrir quais são os possíveis candidatos a ter vida e ao descobri-los, quem sabe, estar um passo mais perto da verdadeira descoberta de vida no Universo para além da nossa.

6. Luz e igualdade

Agora vamos ver este diálogo com o Universo mas do ponto de vista de um hipotético habitante de um desses planetas. Imaginemos um astrónomo, num planeta não muito distante, que tem o equipamento necessário para observar com muito detalhe o nosso planeta (Figura 6).

É certamente um ser de um planeta evoluído onde o investimento na ciência e educação é uma prioridade. Esse astrónomo consegue detetar a existência dos elementos químicos necessários à existência de vida. Num passo seguinte, consegue ver o bonito ponto azul (alunha dada por um dos maiores *linguistas* do nosso planeta, Carl Sagan). O hipotético astrónomo vê indubitavelmente sinais de vida e tenta compreender a informação recebida. O planeta tem vida e esta distribui-se de uma forma estranha. Não há limites naturais que separem as diferen-



Fig. 6 - A Terra vista do espaço.

tes partes do planeta, e no entanto, há uma clara divisão entre os diferentes habitats. Em alguns locais daquele bonito planeta, seres humanos consomem cinco vezes mais matéria prima do que o planeta pode produzir. Em outras partes do planeta, seres humanos morrem de fome. Em partes do planeta, a literacia científica constrói-se à custa do ensino obrigatório, em outras partes a literacia se faz à custa de pés descalços que caminham quilómetros todos os dias para ter acesso a pequenas gotas de saber. Numa parte do planeta, o egocentrismo é abundante, e noutras, famílias inteiras perdem-se à procura de uma vida melhor. Uma das amostras de seres humanos, estudada mais em profundidade a partir das imagens obtidas, mostra não ter consciência da beleza natural do seu próprio planeta e da importância da sua preservação. Talvez o cientista conclua que ele próprio afinal não fala tão bem a linguagem do Universo. Não é possível compreender os resultados obtidos, estão certamente incorretos. Talvez toda a sua teoria acerca da vida no Universo tenha que ser refeita. Aquele pálido ponto azul é um desafio a qualquer ser inteligente.

Conclusão

Qualquer pessoa com alguma literacia científica sabe que ainda faltam muitas peças do *puzzle*. Sabemos hoje, graças à capacidade de comunicação universal de alguns cientistas, que não estamos no centro do sistema solar, que o nosso Sol não está no centro da galáxia, que a nossa galáxia é apenas uma do Grupo Local, que este é apenas uma ínfima parte de um super-aglomerado de galáxias que é apenas uma parte do universo observável, que sabemos não ser tudo e que não sabemos se é único ou não. Sabemos que não ocupamos uma posição especial nesse extraordinário cosmos, que somos feitos da mesma matéria que os outros objetos que

conseguimos observar e que, acreditando que as nossas teorias científicas estão no caminho certo, são apenas uma ínfima fração de tudo que existe. Uma mensagem de humildade e grandeza ao mesmo tempo. A grandeza do nosso cosmos e que se iguala à beleza da nossa capacidade de percebê-lo.

Este não é um artigo científico, não há ainda ciência capaz de explicar a dimensão e complexidade de *ser humano*. Este é um artigo sobre a luz, a luz que vem do cosmos e que nos ajuda a contar a nossa própria história. A luz que ilumina o nosso passado e indica o caminho futuro. Quem sabe, e com algum positivismo no coração, possamos marcar este ano como o começo da construção de uma infraestrutura global de comunicação, tolerância e saber. Quem sabe daqui a cem anos celebraremos novamente a luz, a luz que acendeu a consciência global.

Referências

- Fig. 1 - http://www.nasa.gov/images/content/56533main_MM_image_feature_142_jwfull.jpg
- Fig. 2 - http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/11/A_Horseshoe_Einstein_Ring_from_Hubble.JPG
- Fig. 3 - http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/Espectro_EM_pt.svg
- Fig. 4 - <http://www.flickr.com/photos/angelrls/2121732894//?rb=1>
- Fig. 5 - http://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_693.html
- Fig. 6 - http://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/image_records/8000/8108/ipcc_bluemarble_east_lrg.jpg



Rosa Doran é licenciada em Física pela Universidade Católica de São Paulo, tendo feito mestrado em Altas Energias e Gravitação na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, e está a fazer Doutoramento na Universidade de Coimbra, com tese denominada "Black Holes in my Schools". Desde 1992 que

se dedica à investigação, divulgação e ensino das ciências. É Presidente do NUCLIO, associação que se dedica precisamente à divulgação e ensino da Astronomia.

É responsável pelo *Galileo Teacher Training Program*, um dos maiores programas mundiais para o ensino da astronomia, e de diversos projetos financiados pela União Europeia no domínio do ensino e da divulgação da Astronomia. Participa ainda em diversos programas internacionais neste domínio. É *vice-chair* do painel da educação da COSPAR (*Commission for Space Research*), é membro da *Task force for Children and School Education* da IAU e *co-chair* do Grupo Lusófono de Astronomia para o desenvolvimento.

O bosão de Higgs e os fótons sem massa

Como a partícula que dá massa a todas as outras se viu pela primeira vez com fótons que não têm massa

André David

CERN

O provérbio popular diz que “candeia que vai à frente alumia duas vezes” e assim é com a investigação fundamental em física das partículas.

Ao explorar as fronteiras do conhecimento, a investigação fundamental descobre fenómenos e propriedades novos que abrem o caminho para invenções e tecnologias que acabam a popular o nosso quotidiano.

No CERN, perto de Genebra, procuram-se respostas a questões fundamentais sobre a natureza do Universo, entre elas, “o que é a matéria escura?,” “porque têm as partículas massa?,” ou “porque é que há mais matéria do que anti-matéria?”.

No CERN, fruto da necessidade de responder a tais perguntas, inventou-se a *world wide web*, criaram-se tecnologias de vácuo que permitem a construção de painéis solares

mais eficientes, e constroem-se detectores de fótons cuja utilização permite detectar o cancro da mama mais cedo e com mais precisão.

Mas o CERN não é um centro de investigação aplicada.

Para responder às questões fundamentais utilizamos enormes aceleradores de partículas (Fig. 1), como o LHC, um anel subterrâneo com 27 km de perímetro, onde colidimos centenas de biliões de prótons, quarenta milhões de vezes por segundo, durante mais de metade do ano.

Nessas colisões, recriamos condições em tudo semelhantes às que existiam no Universo quando tinha apenas milionésimos de segundo de idade, excepto que nas nossas colisões usamos muito menos matéria.

As televisões de outrora – aquelas grandes, pesadas e que demoravam tempo a aquecer (Fig. 2) – eram autênticos aceleradores de partículas e experiências como os do CERN.

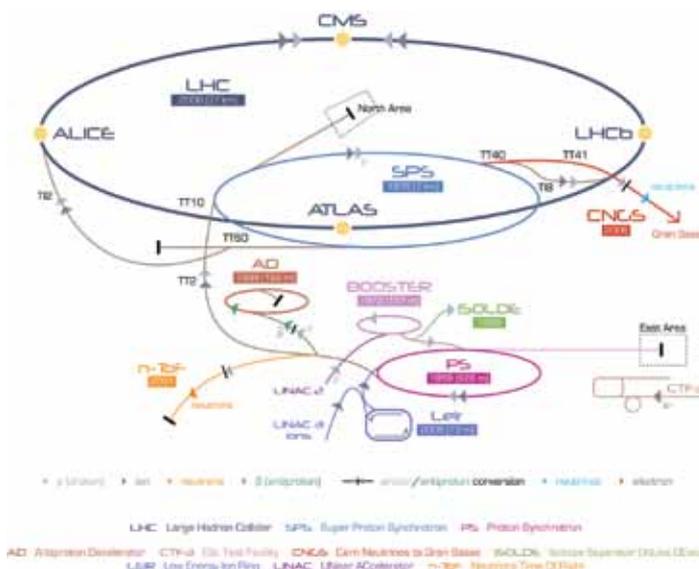


Fig. 1 - O complexo de aceleradores do CERN, assim como as principais experiências. Antes de chegarem ao LHC, feixes de prótons são acelerados pelo LINAC2, BOOSTER, PS, e SPS. Como numa caixa de mudanças de um carro, cada estágio de aceleração é feito num acelerador otimizado para o intervalo de energias envolvidas.

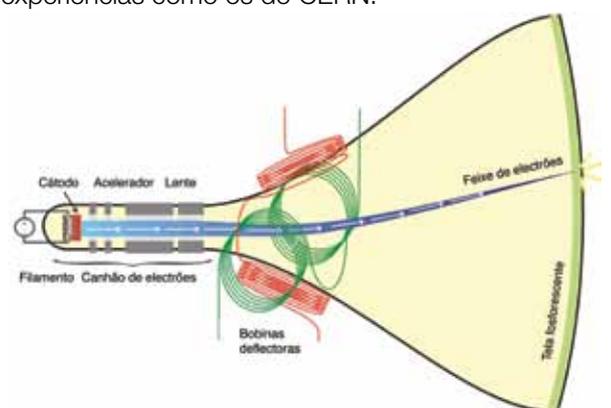


Fig. 2 - As televisões de outrora eram em tudo semelhantes a experiências de física de partículas com aceleradores: um feixe de electrões é criado, acelerado e focalizado na parte esquerda. Esse feixe é depois apontado para o ecrã à direita. Ao colidir com este, os electrões interagem com o fósforo do ecrã.

Nessas televisões, um feixe de electrões é produzido, acelerado, focalizado e interage ao colidir com o fósforo do ecrã.

Como resultado dessas colisões produzem-se muitos fotões.

Alguns desses fotões propagam-se então pelo ar, passam pelo humor vítreo dos nossos olhos, e depositam a sua energia na células da retina.

Essa energia traduz-se num sinal eléctrico que se propaga no nosso cérebro, que por sua vez reconstrói uma imagem e, finalmente, nós pensamos que vimos alguma coisa.

As experiências no CERN funcionam de forma em tudo semelhante, com duas excepções.

Em primeiro lugar, os nossos olhos evoluíram de forma a detectar fotões na gama do visível e apenas e só fotões.

Por sua vez, os detectores do LHC foram construídos de forma a detectar fotões com energias biliões de vezes maiores, superiores às energias dos raios x, e têm diversos tipos de “olhos” de forma a também conseguir “ver” muões, electrões, e outras partículas carregadas (piões, protões, etc.) e neutras (neutrões, etc.). Diversos exemplos são mostrados na Fig. 3.

Em segundo lugar, dado um intervalo muito alargado de energias e tipos de partículas que se detectam no LHC, há um outro passo que é muito mais complexo do que ver televisão: a reconstrução da cena.

Quando vemos com os nossos olhos, o nosso cérebro interpreta o que se passa com base no vê: que objecto está onde, que partes são contíguas, o que está à frente ou atrás, etc.

No LHC, a informação que os detectores produzem tem que passar por um processo semelhante de depuração e reconstrução, de forma a se poder “ver” o que aconteceu na colisão entre os protões.

O resultado desse processo de reconstrução são as energias e direcções dos diferentes tipos de partículas resultantes da colisão, algo semelhante aos objectos que reconhecemos quando vemos com os nossos olhos.

Munidos de uma lista de “objectos,” podemos então analisar a cena em questão e interpretar o resultado da colisão: da mesma forma que uma longa fila de carros nos leva a pensar em “engarrafamento,” ou secretárias e ecrãs de computador nos faz pensar em “escritório,” no LHC um par de muões com certas energias faz-nos pensar em “bosão Z”, etc.

A descoberta do LHC em 2012, foi o resultado da análise dos dados dessas colisões, que permitiram encontrar um bosão de Higgs, o primeiro bosão de Higgs, talvez o único bosão de Higgs.

E para se chegar à presença do bosão de Higgs foram precisos 50 anos de aturado trabalho teórico e experimental.

A desesperada e atribulada procura por esta partícula percebe-se pelo papel central que tem na nossa compreensão da matéria.

O bosão de Higgs é um alfinete de ama da teoria padrão em física de partículas: sem ele, não teríamos uma explicação para as massas que medimos nas outras partículas elementares que conhecemos e a teoria desabararia como um castelo de cartas.

O bosão de Higgs, nada mais que uma previsão teórica durante quase 50 anos, explica como as outras partículas elementares podem ter as massas que medimos, e – ironicamente – foi descoberto com a ajuda de fotões, que de massa não têm nenhuma.

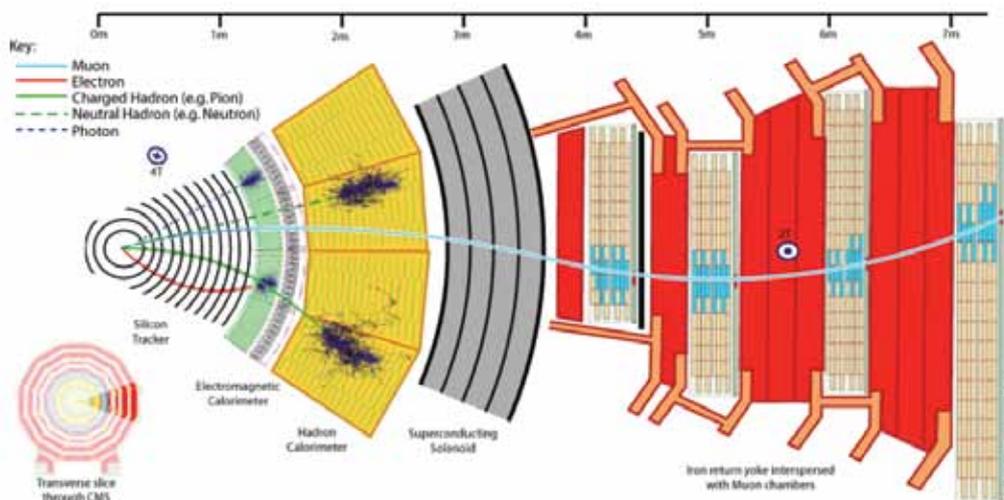


Fig. 3 - Os vários sistemas que detectam partículas na experiência CMS, uma das duas maiores experiências do LHC. O detector de CMS tem várias camadas, especializadas na detecção de diferentes tipos de partículas; do ponto onde se dão as colisões até ao exterior do detector, temos, da esquerda para a direita: o traçador de silício que detecta partículas electricamente carregadas, seguido do calorímetro electromagnético (verde) que detecta fotões e electrões, seguido do calorímetro hadrónico (amarelo) que detecta protões, neutrões e outras partículas compostas de *quarks*. A meio, encontra-se a bobina supercondutora do electroimã de CMS que cria um campo magnético dez mil mais intenso que o da Terra. Finalmente, a parte externa da experiência é dedicada à medida de muões em câmaras de fios (azul) colocadas entre partes de ferro (vermelho) que fecham as linhas de campo magnético.

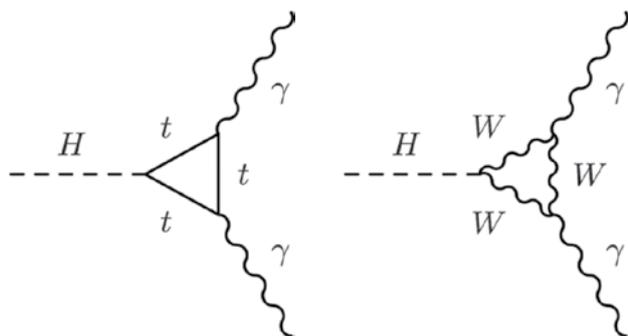


Fig. 4 - Em mecânica quântica, tudo o que pode acontecer, acontece, mas com probabilidades diferentes. O decaimento do bóson de Higgs do modelo padrão em dois fótons não pode acontecer directamente dado o fóton não ter massa. No entanto, o decaimento é possível graças à mediação feita por partículas virtuais como *quarks* top (esquerda) ou bosões W (direita). Se bem que não seja possível destrinçar estas duas contribuições, o resultado da sua possibilidade traduz-se na previsão do decaimento do bóson de Higgs do modelo padrão em dois fótons.

Como podem então os fótons sem massa interagir com o bóson de Higgs?

A resposta requer um pouco de mecânica quântica e partículas virtuais.

Uma das características marcantes das teorias quânticas é a previsão de que partículas virtuais podem mediar interações entre partículas reais (estáveis e que se podem medir directamente).

Por exemplo, a teoria padrão prevê que o bóson de Higgs decaia em dois fótons, mesmo que o bóson de Higgs não “fale” directamente com os fótons, visto que o bóson de Higgs apenas “fala” com partículas que tenham massa.

O decaimento acontece então através de “intermediários,” como *quarks* top ou bosões W, ambos virtuais, dado que não os vemos nos nossos detectores (Fig. 4).

Obviamente há um preço a pagar pelo envolvimento de intermediários virtuais nesta “transação,” razão pela qual o decaimento em dois fótons é muito mais raro que outros decaimentos do bóson de Higgs.

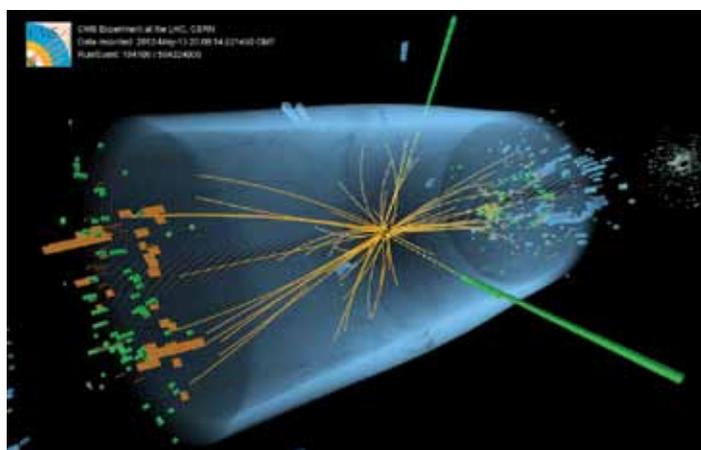


Fig. 5 - Resultado das colisões de prótons em CMS. No detector, podem observar-se diversos tipos de objectos, sendo os mais proeminentes dois fótons de alta energia que aparecem como paralelepípedos verdes. Este par de fótons pode ter sido produzido na desintegração de um bóson de Higgs.

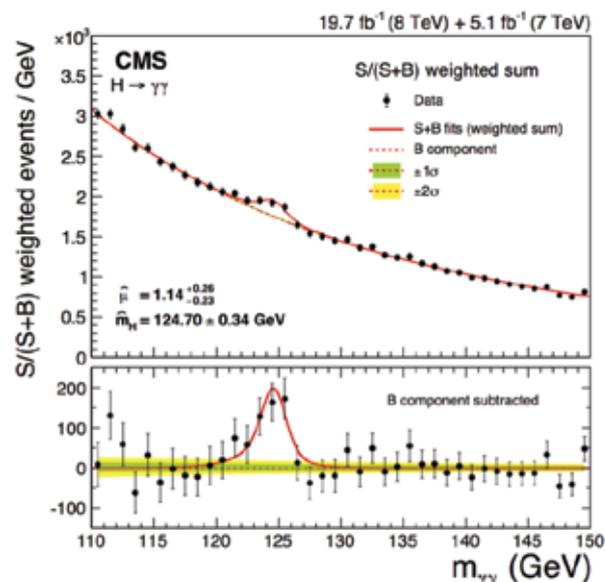


Fig. 6 - Distribuição da massa invariante de pares de fótons produzidos em colisões entre prótons em CMS. Os pares de fótons produzidos na desintegração de bosões de Higgs acumulam-se em torno da massa do bóson de Higgs a cerca de 125 GeV.

Por outro lado, este decaimento em dois fótons tem excelentes características para descobertas por duas razões.

Em primeiro lugar, as posições e energias dos fótons são extremamente bem medidas pelos detectores do LHC (Fig. 5).

Dada a precisão das medidas, a “soma” das energias dos dois fótons permite reconstruir um pico onde se acumulam pares de fótons resultantes do decaimento de bosões de Higgs (Fig. 6). Foi exactamente desta forma que os fótons deram à luz a descoberta do bóson de Higgs.

Mas há um outro aspecto deste decaimento que é muito interessante: em virtude da necessidade de ser mediado por partículas virtuais, ao medirmos a sua probabilidade, temos a possibilidade de perceber se outras partículas virtuais para além das que

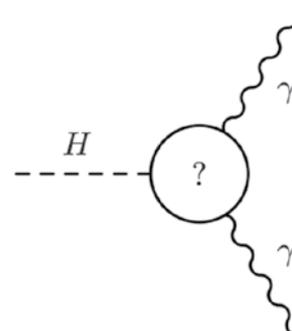


Fig. 7 - O decaimento do bóson de Higgs em pares de fótons, por ser mediado por outras partículas com as quais o bóson de Higgs pode interagir directamente, é sensível à existência de outras partículas e, por isso, pode dar pistas sobre mistérios do Universo que o modelo padrão não explica.

esperamos e conhecemos alteram a forma como o bosão de Higgs “fala” com os fótons (Fig. 7).

Mais, se 5 % do Universo é matéria visível e 24 % matéria escura, pode ser que o bosão de Higgs “fale” também com a matéria escura e nós a possamos descobrir ao escutar essa conversa com o bosão de Higgs.

Para ver, é preciso ter luz.

No caso do bosão de Higgs, a sua interacção indirecta com os fótons foi e continuará a ser muito importante na compreensão dos constituintes da matéria, que são os mesmos constituintes do Universo.

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



André David obteve a Licenciatura em Eng. Física (2000) e o Doutoramento em Física (2006) no Instituto Superior Técnico. No seu doutoramento, trabalhou nos detectores da experiência NA60, e em 2006 entrou para a experiência CMS. Com os primeiros

dados de colisões do LHC, realizou a primeira medição de produção de fótons individuais isolados. Desde 2010 esteve fortemente envolvido na busca do bosão de Higgs por decaimento em dois fótons, tendo contribuído significativamente para a sua detecção e exploração das suas propriedades. Entre os seus interesses, conta-se também a divulgação científica, sendo um dos guias oficiais do CERN desde 2004.

O estranho caso da Matéria Escura

Ilídio Lopes

Centro Multidisciplinar de Astrofísica (CENTRA) e Departamento de Física
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

Resumo

Durante os últimos 100 anos, um progresso assinalável em várias áreas da física, astrofísica e cosmologia contribuiu definitivamente para uma melhor compreensão sobre a matéria de que é feito o universo. No entanto, para grande surpresa de todos uma nova forma de matéria foi descoberta – a matéria escura. Esta é muito mais abundante do que a matéria comum de que nós e o Sol somos feitos. Atualmente só conhecemos a sua existência devido à sua ação gravítica. De que partículas fundamentais é feita esta nova forma de matéria? Como interage a matéria escura com a matéria comum? Estas são duas das muitas questões sobre a matéria escura a que os físicos e astrofísicos terão que responder nas próximas décadas.

A maior parte da massa da Via Láctea não reside nas regiões de gás e estrelas que podem ser diretamente observados com telescópios, mas antes numa nova substância invisível, constituída por partículas que até agora escaparam à deteção direta de um grande número de detectores na Terra. Este défice da massa observada em relação à verdadeira massa total é encontrado na nossa, assim como em muitas outras galáxias. Este resultado é obtido através da aplicação das leis do movimento e da lei da gravitação universal, tal como Newton propôs no seu famoso livro *Principia* há 330 anos. Estima-se hoje que mais de 90 por cento da massa de uma galáxia seja devida a esta substância invisível, que por razões históricas chamamos “matéria escura”. Que motivos têm os físicos para fazer uma afirmação tão surpreendente?

Atualmente, fundamenta-se tal afirmação em três factos:

1. embora não tenhamos ainda detectado a matéria escura, a sua existência é inferida a partir da atração gravitacional que esta exerce sobre a matéria “luminosa” que observamos;
2. as observações cosmológicas a grandes escalas mostram que a massa total do Universo excede largamente a massa total de matéria normal, de que nós somos feitos, assim como as estrelas, planetas, rochas, nuvens de gás e poeira; na verdade, a matéria

normal representa apenas uma pequena fração da massa total do Universo;

3. o último argumento vem da necessidade de incluir matéria escura nos modelos teóricos que explicam a formação do Universo, pois só assim estes modelos reproduzem as características do universo em que hoje vivemos; isto é, a matéria escura é necessária para que ocorra a formação de planetas, estrelas, enxames de estrelas, galáxias e enxames de galáxias, que os cosmólogos observam coletivamente como aglomerados e grupos de galáxias.

Efetivamente, todas as provas experimentais que temos sobre a existência da matéria escura vêm da astrofísica e cosmologia. Estas medições astronómicas baseiam-se exclusivamente na forma como esta matéria interage gravitacionalmente. Temos dois métodos de estudar os efeitos da gravidade da matéria escura sobre os corpos celestes:

(i) podemos observar como um grupo de objetos astronómicos se move sob a influência da sua gravidade, (ii) ou medir como esta gravidade modifica a forma como a luz viaja. Atualmente, existe uma grande variedade de resultados observacionais que nos dão conta da presença da matéria escura no Universo. Como tal, escolhi apresentar brevemente dois exemplos que os astrónomos usam para mostrar a existência de matéria escura. Num caso, a matéria escura é inferida a partir da aplicação das leis de Newton e, num segundo caso, a partir da teoria da relatividade geral de Einstein.

Matéria escura e a curva de rotação das galáxias

Em 1975, durante uma reunião da Sociedade Astronómica Americana, Vera Rubin comunicou um resultado aparentemente surpreendente: que as estrelas mais distantes nas galáxias espirais, como a Via Láctea, giram com uma velocidade constante em torno do centro da galáxia. Este resultado observacional parecia contrariar as leis de movimento

de Newton, tal com ilustrado na Figura 1: enquanto que, no caso do movimento dos planetas em torno do Sol, as velocidades orbitais observadas são consistentes com os valores previstos pela leis de movimento de Newton, no caso do movimento das estrelas na Via Láctea, tal parece não se verificar. Será que as leis de Newton já não se aplicam? Uma análise cuidada do problema permitir-nos-á concluir que tal não é o caso. Para ilustrar o que está a acontecer no caso das galáxias espirais, os astrónomos usam dois resultados fundamentais das leis do movimento – a conservação do momento angular e a lei da gravitação universal, os quais passo a explicar de forma breve:

(i) Começemos por considerar o movimento das estrelas em torno do centro galáctico, como ilustrado na Figura 1(b). Efetivamente, o facto da velocidade orbital destas estrelas ser independente da distância ao centro da galáxia parece contradizer a conservação do momento angular. Esta lei fundamental do movimento diz que num sistema fechado em evolução, o momento angular é conservado. Para ilustrar este ponto, consideremos os casos simples de um bailarino clássico fazendo piruetas, de um planeta a rodar em torno do Sol, ou ainda de uma estrela a rodar em torno do centro da galáxia. Estes últimos dois exemplos correspondem aos casos ilustrados na Figura 1. Em todos estes exemplos, podemos calcular o momento angular do sistema, L , como

$$L = mr^2\omega = mvr$$

onde m é a massa do corpo em movimento, isto é a massa do bailarino, planeta ou estrela, ω e v são as velocidades angular e linear desse corpo, r é a distância ao eixo de rotação do sistema, sendo o eixo uma linha vertical imaginária perpendicular ao

plano de movimento, isto é a cintura do bailarino, o plano de movimento dos planetas (eclíptica) e o disco galáctico, respectivamente.

Assim, de acordo com a equação acima referida, para que L se mantenha constante, sempre que uma quantidade da equação variar, uma outra terá que compensar essa variação, mantendo assim constante L . Por exemplo, o leitor compreenderá agora como o bailarino Mikhail Baryshnikov aumentou a sua velocidade de rotação nas suas famosas 11-piruetas do filme *White Nights*¹. Como o L do bailarino é conservado, para aumentar a sua velocidade de rotação, isto é para aumentar ω e v , depois do impulso inicial o bailarino simplesmente diminui r contraindo uma perna e os braços. No final do exercício o bailarino reverte o processo, isto é diminui a rotação abrindo novamente os braços para terminar o exercício com elegância e em equilíbrio. Tipicamente, um bailarino de 50 kg, por contração da perna e braços poderá aumentar a sua velocidade angular de 2 rotações por segundo para 32 rotações por segundo.

A formação do sistema planetário e da galáxia a partir de uma nuvem de gás inicial resulta do equilíbrio de forças que se estabelecem durante o colapso gravitacional da nuvem de gás em rotação devido à conservação de L . Tal como no exemplo do bailarino, a contração do tamanho da nuvem em rotação, isto é a diminuição de r , é acompanhada com um aumento significativo da velocidade de rotação da nuvem ω . No entanto, como a nuvem de gás não é um corpo rígido, resulta que os corpos celestes junto ao eixo de rotação ficam a girar mais rapidamente do que os mais exteriores. Assim, os planetas exteriores do nosso sistema planetário rodam mais lentamente, como ilustrado na Figura 1(a).

O mesmo também era esperado para as estrelas localizadas a grandes distâncias do centro galáctico, como ilustrado

¹ Ver <https://youtu.be/02EvsGal-Wc> ou <https://youtu.be/UZ2tD4PLcOM>

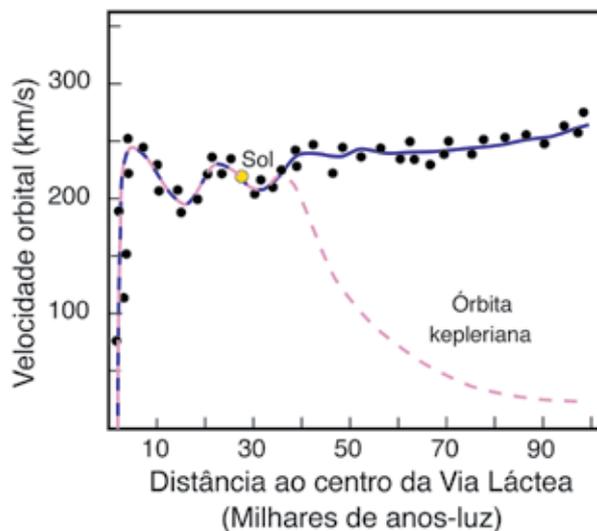
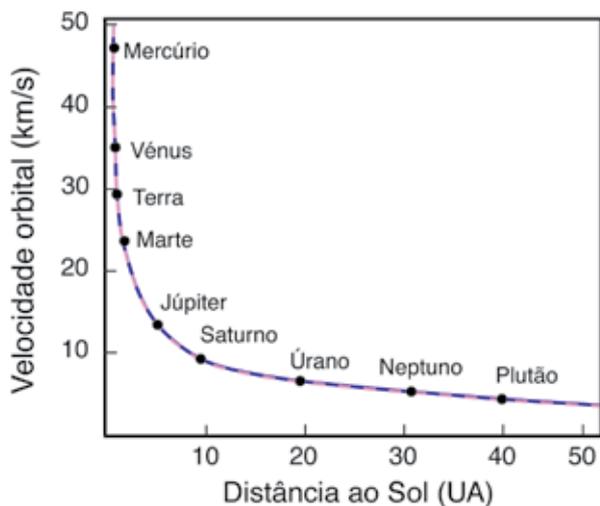


Fig. 1 - (a) Velocidade orbital dos planetas em torno do Sol. A distância está expressa em unidades astronómicas. (b) Velocidade orbital das estrelas em torno do centro da Via Láctea; a curva a azul corresponde à velocidade orbital média, determinada a partir das velocidades das estrelas medidas pelos astrónomos; a curva a tracejado-rosa corresponde à velocidade orbital calculada a partir da massa luminosa (estrelas e nuvens de poeira da galáxia) observada. A velocidade orbital é calculada a partir das leis de movimento de Newton (ou leis de Kepler).

na Figura 1(b); no entanto, tal não se observa. Pode agora o leitor imaginar a surpresa de Vera Ruben ao verificar que estas estrelas mais exteriores rodavam todas com velocidades muito elevadas, aparentemente contrariando a conservação do momento angular. Então, o que estaria errado afinal?

Para compreendermos o que está acontecer neste caso temos que analisar um pouco mais este problema.

(ii) Consideremos então os dois últimos exemplos: os planetas a girarem em torno do Sol e as estrelas a rodarem em torno do centro galáctico. Podemos calcular a velocidade orbital v de um planeta ou de uma estrela, a partir da lei da gravitação universal de Newton. Como as órbitas são praticamente circulares, no movimento orbital de um planeta ou estrela de massa m temos que a força de gravidade iguala a força centrípeta. Como tal

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r},$$

onde G é a constante universal da gravitação (ou constante de Newton), M é a massa central do sistema. Resolvendo a última equação em ordem a v , obtemos

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}},$$

expressão que dá a velocidade orbital do planeta ou estrela em função da distância ao centro do sistema. Constatamos que v varia como $1/\sqrt{r}$. No entanto, este simples resultado tem duas leituras distintas, para os dois sistemas em consideração.

No primeiro exemplo, como o Sol contém 99 % da massa do sistema solar, podemos aproximar M pela massa do Sol. Por exemplo, para calcularmos a velocidade orbital da Terra, podemos desprezar as massas dos restantes planetas internos à distância r . Tal como previamente mencionado, v diminui com a distância. A Figura 1(a) ilustra o exemplo apresentado. O resultado fundamenta as conhecidas leis do movimento planetário, como foram empiricamente deduzidas por Johannes Kepler no século XVII.

No segundo exemplo, a massa M corresponde a toda a massa interna ao raio r , e não somente à massa central do sistema que, neste caso, seria a massa do buraco negro supermassivo localizado no centro da nossa galáxia. Na verdade, quando Vera Rubin, assumiu que M correspondia à massa de todos os objetos luminosos observados, em particular todas as estrelas, nuvens de gases e poeiras, ela esperava que v diminuísse com a distância ao centro da galáxia (órbita kepleriana, Figura 1(b)), mas tal não se verificava. Na Figura 1(b), está ilustrada a velocidade orbital calculada a partir da equação prévia, assim como a velocidade medida a partir das observações. Vera Rubin concluiu que a única forma de v se manter constante era considerar que M , para além da matéria visível M_{vi} , contém também matéria não visível M_{me} , a que hoje identificamos ser ma-

téria escura, tal que $M = M_{vi} + M_{me}$. Portanto, M_{me} é a quantidade adicional de matéria escura, que faz com que as estrelas distantes continuem gravitacionalmente ligadas à galáxia. Caso M_{me} deixasse de existir, a força gravitacional devido a M diminuiria. Como consequência, as estrelas mais exteriores acabariam por escapar da galáxia, isto porque a velocidade medida nestas estrelas é superior a $\sqrt{2}v$, isto é superior à velocidade de escape. Esta é a razão porque sabemos que todas as galáxias espirais, incluindo a Via Láctea, estão imersas num halo de matéria escura.

Matéria escura e colisão de galáxias

A mais forte indicação de que a matéria escura é constituída por partículas de um tipo desconhecido foi pela primeira vez observada em 2004, no aglomerado galáctico 1E0657-558 na constelação de Carina, conhecido pelo nome de “aglomerado da bala”, aqui reproduzida na Figura 2. Nesta imagem podemos identificar uma colisão entre dois enxames de galáxias. Atualmente, mais de 70 aglomerados galácticos foram descobertos com características idênticas ao aglomerado da bala.

O magnífico resultado mostrado na Figura 2 foi obtido através da combinação de três imagens distintas. As galáxias em cor de laranja e branco correspondem a uma imagem óptica observado pelo Telescópio Espacial Hubble. Sobreposta a esta, encontra-se uma imagem de raios x obtida pelo satélite Chandra (NASA), identificada por duas regiões cor-de-rosa distintas. A última imagem, de cor azul, dá-nos a concentração de massa no aglomerado. Esta distribuição de massa foi cartada através da distorção que a gravidade do aglomerado galáctico produz na luz de objetos distantes que o atravessam, um mecanismo físico conhecido por lente gravitacional.

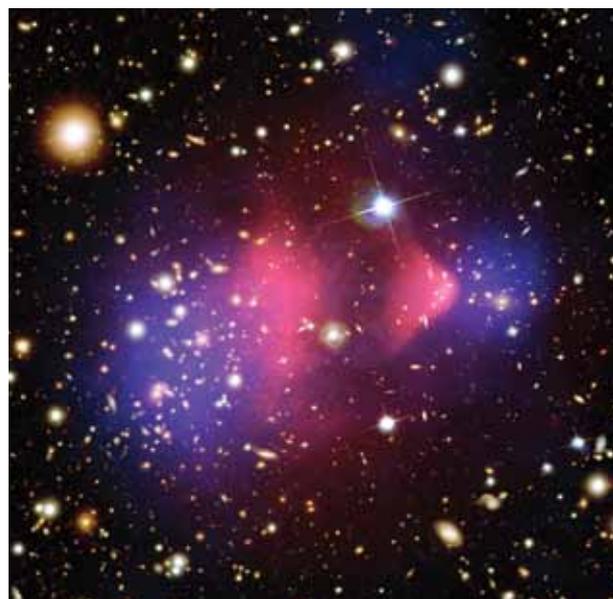


Fig. 2 - Aglomerado galáctico (1E 0657-558) na constelação de Carina, também conhecido pelo nome de “aglomerado da bala”.

MRA Instrumentação

Fotónica e imagem

Na área de tecnologias de Fotónica, Visão e Imagem o Grupo Álava Ingenieros dispõe da mais avançada gama de instrumentos, componentes e sistemas tanto para o espectro visível como para o ultravioleta e o infravermelho.

Dispomos da mais completa gama tecnológica do mercado em conjunto com uma excelente equipa formada por técnicos especialistas de produto, engenheiros de aplicações e implementação de sistemas, técnicos especialistas em instalações e um pessoal altamente qualificado para disponibilizar-lhe a melhor opção tecnológica e fornecer-lhe o melhor apoio e assistência pós-venda.

Lasers científicos e industriais

Visão artificial

Câmaras de alta e ultra alta velocidade

Óptica e optomecânica

Câmaras multi e hiperspectrais

Sistemas aerotransportados

Espectrometria

Termografia infravermelha

Correlação digital de imagem (DIC)

Caracterização fontes de luz

Câmaras científicas

Mecânica de fluídos e tamanho de partículas

Hoje sabemos que as regiões cor-de-rosa devem-se à emissão de raios x pelo gás quente (matéria normal) presente no aglomerado. Esta distribuição de matéria é claramente distinta da região azul que contém toda a matéria do aglomerado (matéria normal e matéria escura), mostrando de forma evidente a existência de uma grande quantidade de matéria que não emite radiação de raios x. Em conformidade com outros resultados observacionais identificamos esta região como sendo dominada pela matéria escura.

Compreender com se faz a cartografia da matéria neste tipo de aglomerado galáctico é central para interpretar a Figura 2. Por essa razão, de forma abreviada, vamos detalhar como funciona uma lente gravitacional ideal, isto é, como é que um campo gravitacional criado pela matéria modifica o trajeto da luz.

Tal como Einstein explicou na sua nova Teoria da Relatividade Geral, concluída em 1916, a luz de uma estrela distante propaga-se no espaço em linha reta, sendo a sua trajetória curvada ou deflectida quando a luz passa perto de um objecto massivo, por exemplo o Sol, como ilustrado na Figura 3. No âmbito da nova teoria, Einstein foi o primeiro a obter a fórmula que dava o ângulo de deflexão da luz θ que passa a uma distância r de um objecto esférico de massa M , tal que

$$\theta = \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{r}$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo. Durante um eclipse total solar, tal como dado pela última equação, a luz das estrelas sofre um desvio angular θ , que é função de r . Em particular, para o caso do Sol de raio R_{\odot} e massa M_{\odot} , temos

$$\theta_{\odot} = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}}$$

isto é $\theta_{\odot} = 1.74''$. Quando Einstein obteve este resultado, não lhe deu muita relevância, pois nessa época não era es-

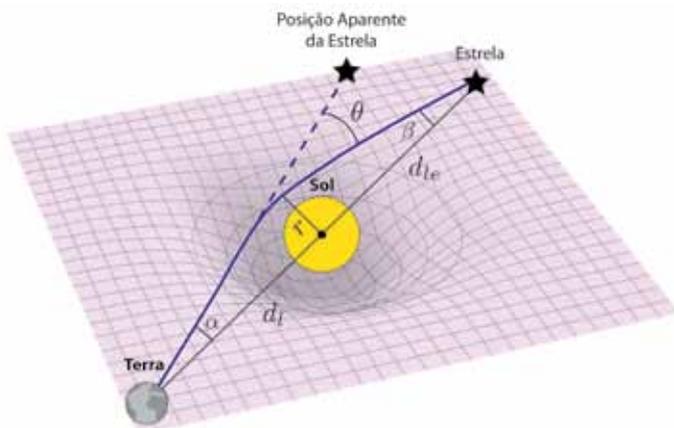


Fig. 3 - Esquema de uma lente gravitacional: A lente de massa M , por exemplo o Sol, encontra-se entre a fonte de luz, por exemplo uma outra estrela, e o astrónomo localizado na Terra. Devido ao campo gravítico do Sol que altera o trajeto da luz, o astrónomo não vê a estrela, mas somente a sua imagem (posição aparente da estrela).

perado que este efeito pudesse ser observado. No entanto, contrariando as expectativas, tal acabou por acontecer em 1919: o valor θ_{\odot} , foi confirmado (com um erro de 20 %) por uma equipa de astrónomos liderada por Sir Arthur Eddington, numa expedição conjunta à ilha do Príncipe e ao Sobral no Brasil para observar o eclipse total do Sol. Como o diâmetro aparente da Lua e do Sol são idênticos, durante o eclipse é possível determinar o ângulo de deflexão da luz para estrelas com posições angulares próximas do disco solar, pois como ilustrado na Figura 3, devido à ação do campo gravítico do Sol sobre a luz, a posição aparente da estrela (imagem) é distinta da posição real da estrela. Comparando as posições das estrelas (imagens) em fotografias obtidas antes e durante o eclipse solar, a equipa do Eddington pôde calcular θ , o ângulo de deflexão da luz.

No seguimento da apresentação deste resultado teórico, cuja validação experimental fez Einstein famoso, vamos determinar um outro que é fundamental para o estudo observacional da matéria escura. No modelo simplificado ilustrado na Figura 3, o ângulo θ é pela geometria dos triângulos igual a $\alpha + \beta$. Cada um destes ângulos pode ser expresso em termos de distâncias. Uma vez que em ambos os triângulos, r é muito mais pequeno que qualquer das outras distâncias, podemos aproximar as tangentes dos ângulos pelos próprios ângulos, assim temos $\alpha = r/d_l$ e $\beta = r/d_{le}$. Definindo a grandeza f tal que $\theta = r/f$, a equação escreve-se como

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_l} + \frac{1}{d_{le}}$$

onde d_l é a distância a que se encontra a massa M (Sol na Figura 3) e d_{le} é a distância a que a estrela se encontra da massa M . O leitor com conhecimentos em óptica geométrica provavelmente já verificou que esta equação é a mesma que descreve a formação de uma imagem por uma lente, onde f se identifica com a distância focal da lente. Do ponto de vista do astrónomo, a localização angular da imagem em relação à estrela é dada pelo ângulo α , o qual é obtido resolvendo a equação em ordem a r e dividindo o resultado por d_l . Assim, temos

$$\alpha = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{d_{le}}{d_l(d_l + d_{le})}}$$

Esta relação permite determinar a partir do ângulo aparente α a massa total M do sistema responsável pelo efeito de lente gravitacional. Existe um caso particular de alinhamento dos astros em que o efeito de lente gravitacional dá origem à forma-

ção de uma imagem peculiar. Consideremos que a Figura 3 corresponde a um sistema de duas galáxias longínquas, tal que a galáxia lente (Sol) e galáxia fonte (estrela) estão localizadas exatamente na linha de visão do astrónomo. A imagem formada não será uma imagem localizada numa única região, como a posição aparente da estrela mostrada na Figura 3, mas antes forma-se uma imagem anular (dada pelo ângulo α), devido ao espalhamento da luz. Este tipo de imagem é conhecida por anel de Einstein.

A Figura 4 é um exemplo quase perfeito de um anel de Einstein obtido pelo telescópio Hubble devido ao alinhamento de duas galáxias com o telescópio. O campo gravítico da galáxia lente, vista em primeiro plano, é responsável pela formação do anel. Em objetos como LRG 3-757, o anel de Einstein permite aos astrónomos determinar a massa da matéria escura da galáxia lente, uma vez que α só depende de distâncias e da massa da galáxia lente M . Tal como no caso ilustrado, na maioria das vezes as lentes gravitacionais funcionam como lentes divergentes ou convexas, isto é, quando um feixe de luz paralelo passa por estas lentes, a luz espalha-se como consequência da imagem resultante ser uma ampliação do objeto real. A distribuição de massa inferida pelo efeito de lente gravitacional na Figura 2 foi obtida usando o princípio físico aqui descrito, embora usando uma técnica numérica mais elaborada. Tal como no primeiro exemplo, a interpretação deste resultado observacional implica a existência de uma grande quantidade de matéria escura.



Fig. 4 - Imagem LRG 3-757 lente gravitacional) obtida pelo Hubble Space Telescope: o campo gravítico de uma galáxia luminosa laranja distorce gravitacionalmente a luz de uma galáxia azul muito mais distante. O alinhamento quase perfeito entre a Terra e galáxia azul dá origem a que a imagem resultante se distribua em forma de ferradura, num anel de Einstein quase completo.

As forças da matéria escura

Depois de os físicos e astrónomos falharem em obter uma explicação sobre a constituição da matéria escura como sendo feita de partículas fundamentais conhecidas, rapidamente chegaram à conclusão de que esta matéria é constituída por um novo tipo de partículas. A única certeza que temos hoje é que a matéria escura não é feita de partículas normais. No

final da década de 80, foram feitas muitas propostas sobre as propriedades destas partículas, baseadas nas observações astronómicas. A mais consensual é que a partícula de matéria escura deve ser mais pesada que o protão, ter uma velocidade claramente inferior à da luz, ser electricamente neutra e interagir muito fracamente com a matéria normal. O nome genérico desta classe de partículas é “partícula massiva de interação fraca” ou WIMP (*weakly interacting massive particle*, em inglês).

Mas como se compara a partícula de matéria escura com outras que conhecemos bem, tais como o eletrão, o protão ou mesmo o neutrino? Talvez seja interessante lembrar o leitor sobre o modelo padrão de partículas elementares – um dos grandes sucessos da física moderna. Esta teoria classifica as partículas subatómicas e define as regras das interações fundamentais entre partículas. A Figura 5 apresenta um esquema breve das partículas elementares que constituem o modelo padrão. Com a descoberta do bosão de Higgs em 2012 ficámos finalmente a conhecer todas as partículas fundamentais que constituem este modelo. Tal como a tabela periódica de Mendeleev permite uma melhor compreensão da formação e propriedades dos elementos químicos, o modelo padrão estabelece como as partículas interagem entre si, dando origem à formação de outras partículas mais complexas, tais como núcleos e átomos. No âmbito desta teoria, a formação da matéria é explicada como resultando da interação de 12 partículas elementares – os fermiões (*quarks* e *leptões*) – que interagem entre si por intermédio de outras 4 partículas elementares – os bosões, os quais estão associados às forças fundamentais: interação eletromagnética, fraca, forte (ver Figura 5).

Então, como se comparam as partículas de matéria escura com as partículas do modelo padrão? O nosso conhecimento é ainda muito limitado e não sabemos as suas propriedades mais básicas, tais como a massa, a carga elétrica, se têm momento dipolar elétrico ou magnético. Ou ainda se são partículas estáveis, ou decaem para partículas elementares do modelo padrão como o neutrino, ou ainda outras partículas desconhecidas. Também não sabemos se estas partículas são ou não elementares. E se são partículas elementares, de que tipo? Fermiões ou bosões ou algo desconhecido? Será a matéria escura feita de partículas elementares ou partículas compostas, tal como sugerem al-

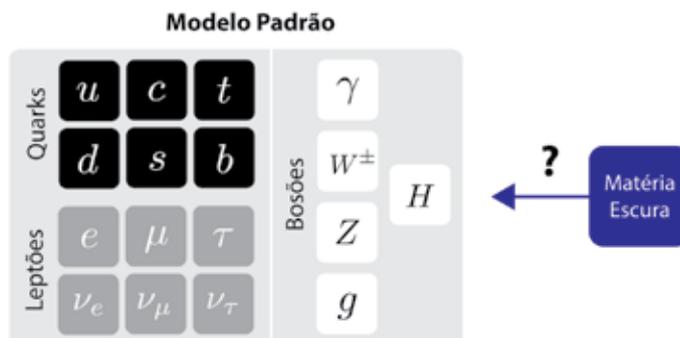


Fig. 5 - Tabela de partículas elementares que, de acordo com o modelo padrão, formam toda a matéria (normal) do Universo. Indicada está também a matéria escura formada por um novo tipo de partículas, cuja natureza enigmática tem levado os físicos a propor modelos alternativos ao modelo padrão.

guns modelos teóricos mais recentes? Em qualquer dos casos, a sua explicação implica generalizar o modelo padrão.

A verdade é que estas são algumas das muitas perguntas às quais esperamos dar resposta nas próximas décadas, com a ajuda dos detectores e aceleradores de partículas já em construção.

Uma resposta final só vai ser possível quando detectarmos estas novas partículas, tal como fizemos para todas as partículas fundamentais do modelo padrão. A grande dificuldade experimental na detecção da matéria escura reside no facto destas partículas interagirem muito fracamente com a matéria normal, sendo por isso a sua detecção extremamente difícil.

Para compreendermos o significado de “interação fraca”, podemos recorrer aos neutrinos que vem do Sol, que igualmente interagem muito pouco com a matéria normal. Um neutrino percorre em média uma distância de 10^{16} m (1 seguido de 16 zeros) entre duas colisões sucessivas. Por exemplo, um neutrino produzido no Sol percorre uma distância que é cem mil vezes a distância da Terra ao Sol antes de colidir com uma partícula de matéria normal. Uma partícula de matéria escura tem uma interação ainda mais fraca do que o neutrino.

Apesar disso, desde a década de 60 do século passado, várias experiências foram construídas para detectar os neutrinos que vêm do Sol, o que fazem atualmente com regularidade. Hoje os telescópios a neutrinos para observar o Universo são uma realidade promissora em astrofísica. A possibilidade de observar neutrinos e medir as suas propriedades tem revolucionado a nossa compreensão da física de neutrinos, assim como tem aberto novos caminhos ao modelo padrão. Por isso mesmo, T. Kajita e A. B. McDonald, responsáveis pelas equipas dos observatórios de neutrinos Super-Kamiokande e Observatório de Neutrinos

de Sudbury, receberam em 2015 o prémio Nobel da Física. A experiência acumulada na construção dos observatórios de neutrinos dá-nos esperança de que, num futuro próximo, as partículas de matéria escura acabarão por ser descobertas.

No epílogo destes primeiros 100 anos após a publicação da teoria da relatividade geral, a história recorda-nos de um século com revoluções permanentes na física, astrofísica e cosmologia, repleto de descobertas nos aceleradores de partículas, telescópios, e mais recentemente em satélites astronómicos. Mais do que qualquer outra atividade humana, as aplicações tecnológicas que daqui resultaram têm contribuído positivamente para ajudar a humanidade.

O mais extraordinário legado científico de Einstein foi o facto de a sua teoria da Relatividade Geral, desenvolvida para explicar o universo visível, ser hoje fundamental na investigação de um inesperado universo invisível. Einstein teria ficado bem surpreendido. Hoje, este universo invisível constitui um tremendo desafio para os cerca de 3 milhões de físicos e astrónomos entre os 7 mil milhões de habitantes no planeta.

Agradecimentos

O autor agradece a José Lopes por ter realizado as Figuras 1, 3 e 5, e a Susana Brandão e Cláudia Rola pelos comentários feitos a uma versão preliminar do manuscrito. O autor agradece ainda à NASA, ESA e Hubble Space Telescope pela permissão da utilização das imagens 2 e 4. Agradece também à Sociedade Portuguesa de Física e ao Gonçalo Figueira pelo convite para escrever este artigo.



Ilídio Lopes é Professor Auxiliar no Departamento de Física do IST e investigador do CENTRA-IST. Licenciou-se na Universidade do Porto, fez o mestrado e doutoramento na Universidade de Paris e um pós-doutoramento no Commissariat d’Energie Atomique (CEA, Paris). Trabalhou como investigador nas Universidades de Cambridge e de Oxford (Reino Unido), antes de voltar a Portugal como professor na Universidade de Évora. Os seus interesses de investigação incluem astrofísica, cosmologia e física das partículas. As publicações mais recentes são em tópicos de física solar e estelar, heliosismologia, astrossismologia, magnetismo solar, neutrinos solares, primeira gerações de estrelas, matéria escura e ondas gravitacionais. Mantém uma colaboração regular com várias instituições internacionais, nomeadamente, Universidade de Oxford, Universidade de Paris e Universidade de John Hopkins.

Fotão, a partícula luminosa

José Tito Mendonça

Aqui vos quero falar do fotão, a partícula da luz, e das suas inusitadas propriedades. O fotão pertence à classe dos bosões, ou seja, das partículas que carregam um campo. Neste caso, é o campo electromagnético. Ele possui interessantes propriedades, que iremos revelar, como sejam, a transversalidade, a polarização, a ausência de massa e de carga eléctrica, a rapidez, e por último, a vorticidade. Ele traz-nos informação de todo o universo, desde o Sol e a Lua até às galáxias distantes. Ele também nos permite criar feixes de luz chamados lasers, ligar o tempo com o espaço, e de caminho, estudar a estrutura das células. O fotão é como uma janela aberta para o mundo.

1. Um fotão é um bosão

No meu tempo de liceu, tinha um colega muito bonzão, que se chamava Julião. Uma vez perguntei-lhe: “És Bonzão, oh Julião?”. Ele não gostou da piada, e passou a evitar-me. Eu então virei-me para a Fatinha, que era muito Boazinha. Isto para dizer que, tal como as pessoas, as partículas também podem ter dois nomes. O fotão é pois um bosão e eu explico.

O fotão transporta o campo electromagnético, que está na origem da luz. A luz é um campo que se propaga e essa propagação é veiculada pelos fotões. Os fotões são o campo em acção. Ou dizendo de outro modo, o campo é um exército e os fotões os seus soldados.

Ora existem outros campos físicos, os campos nucleares (forte e fraco) e o campo gravítico. Cada tipo de campo tem os seus soldados. Os bosões são os transportadores do campo e, deste modo, estabelecem a relação entre as partículas materiais. As partículas com massa (como o electrão, o protão ou o neutrão) são fermiões. Aliás, o protão e o neutrão não são partículas elementares, pois são compostas

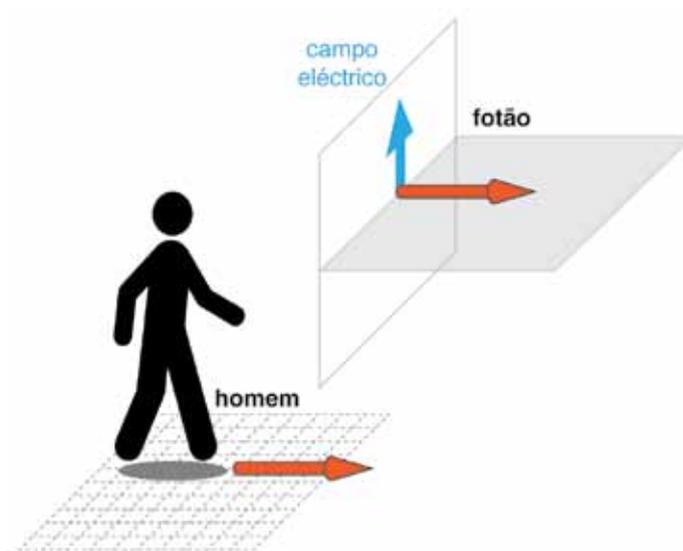


Fig. 1 - O Fotão é transversal, o Homem também.

de *quarks*, que são eles próprios também fermiões. Os fermiões têm *spin* semi-inteiro, enquanto que os bosões têm *spin* inteiro. Mas não me perguntem agora o que é o *spin*.

Usando uma analogia feliz, o mundo é uma casa, onde os tijolos são fermiões e os bosões a argamassa que os une. Essa argamassa é feita de uma mistura de três campos (ou cimentos) que são o electromagnético, os nucleares e o gravítico. Cada campo tem os seus próprios bosões. Todos já foram identificados através de experiências, excepto o gravitão, que é o bosão do campo gravítico e cuja existência é apenas teórica. Assim, podemos dizer, sem forçar muito a analogia, que os fotões fazem parte da argamassa que aglutina o mundo e lhe dá a forma.

2. A transversalidade

O que eu mais aprecio nas pessoas é a sua verticalidade. Não gosto nada de *nhé-nhé-nhés*, *tá-tá-tás*, gosto de

conversas limpas e atitudes claras. Já no fotão, o que eu mais aprecio é a sua transversalidade. Parece diferente, mas é quase o mesmo. As pessoas deslocam-se na horizontal, e o seu corpo está situado na vertical. Ou seja, as pessoas movimentam-se de forma transversal. Nisso distinguem-se (infelizmente, não todas) dos vermes, cujo corpo se orienta no sentido da marcha, ou seja, na horizontal. Há também boa gente que tem feito carreira na horizontal, mas isso tem outra conotação e outro picante.

Mas voltemos ao fotão. Ele é como as pessoas, move-se numa direcção (digamos, na horizontal) e o seu campo eléctrico aponta numa direcção transversal ao movimento (digamos, na vertical). Assim, por muito estranho que pareça, os fotões movem-se como os homens, com o seu campo (ou o seu corpo) orientado numa direcção transversal ao movimento.

As coisas não são, no entanto, tão simples. Quando o fotão se propaga em certos meios materiais, o seu campo eléctrico pode inclinar-se, tal como um velho cuja penosa marcha o obriga a inclinar-se para a frente. Ou uma pessoa saudável a subir uma encosta. De facto é quase o mesmo, o velho sobe a encosta do tempo. E, se o meio material contiver cargas eléctricas livres, aparece mesmo uma outra espécie de fotões, chamados plasmões, que rastejam como um verme. Ou seja, têm o campo eléctrico na direcção de propagação.

3. A polarização

A paixão é uma polarização. Nós estamos vidrados numa pessoa, ou em qualquer assunto, e não pensamos noutra coisa. “Eu só penso nela!” Mas “ela” tanto quer dizer uma mocinha como a teoria da gravitação quântica. Há paixões para todos os gostos. Ou seja, a paixão polariza, orienta o pensamento numa direcção bem definida, de forma obsessiva. De modo que não podemos desviar o pensamento noutra direcção.

O mesmo acontece com o fotão. Apesar de não ser emotivo, o fotão tem características próprias que orientam o seu campo eléctrico numa direcção bem definida. Essa é uma característica de cada fotão, a sua polarização não se modifica.

Já tínhamos visto que o campo eléctrico era transversal, mas o plano transversal tem duas direcções ortogonais (digamos os eixos O_x e O_y). De maneira que certos fotões preferem orientar-se na direcção O_x e outro na direcção O_y . Numa experiência que ficou célebre, os físicos franceses Fresnel e Arago demonstraram no início do século XIX que dois feixes luminosos com polarizações ortogonais (ou seja, um na direcção O_x , e o outro na direcção O_y) nunca interferem entre si. As suas paixões diferem.

4. A massa e a carga

Numa fria noite de inverno sabe bem aconchegar a pança. Comer um cozido à portuguesa, acompanhado de vinho tinto, seguido de uma alegre fatia de toucinho do céu, para acabar com um cálice de licor ou uma aguardente. Com isto, o nosso corpo tende a aumentar a massa e ficamos

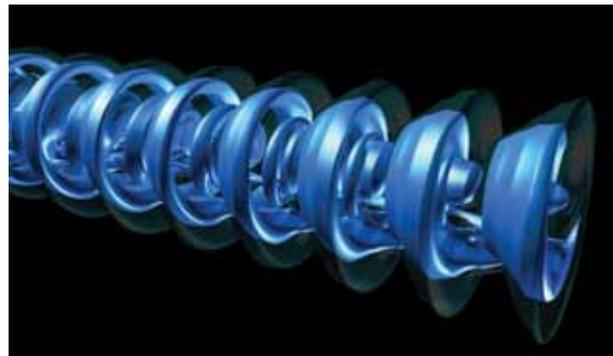


Fig. 2 - Fotão torcido: o campo eléctrico tem uma forma helicoidal (imagem cortesia de Jorge Vieira, IPFN/IST).

mais pesados. A massa mede a nossa capacidade para nos deslocarmos, quando nos queremos levantar da cama, ou do sofá, ou quando somos empurrados.

Já a carga eléctrica pode ser associada à nossa capacidade de interagir com os outros. Com o vinho e o licor, tendemos a ficar mais comunicativos, ou mesmo mais conflituosos. Por vezes dá-se o contrário, e a seguir ao jantar caímos na modorra. De qualquer modo, embora o nosso corpo seja electricamente neutro e em geral não possua carga, o nosso carácter tem essa irritante propriedade de implicar (ou não) com os outros, que se parece muito com uma carga eléctrica. Por isso se diz às vezes: “Parece que estás eléctrico!”

Contrariamente ao indivíduo, o fotão tem massa nula e também carga eléctrica nula. Faz lembrar o caso limite de um Inglês, muito fleumático e muito magrinho. Se ele pudesse ficar fleumático e magrinho até ao infinito, ficaria como o fotão. Ou seja, infinitamente leve e infinitamente fleumático. Por serem tão leves, os fotões podem viajar à velocidade máxima possível, que é a velocidade da luz no vazio, c , cerca de 300 mil quilómetros por segundo. Por não terem carga eléctrica eles não se atraem nem repelem e podem cruzar-se no vazio sem se desviar da trajectória.

5. A velocidade

O que dizer dos gémeos. O seu paradoxo foi terem nascido iguais e (quase) ao mesmo tempo. E, apesar disso, poderem seguir vidas e carreiras muito distintas. Quando eu andava a estudar no Técnico, encontrei um colega no meio da rua. Cumprimentei-o cordialmente e, ao contrário do que esperava, ele olhou para mim com um olhar ausente e não me retribuiu o cumprimento. Vim mais tarde a saber que era um irmão gémeo do primeiro, que andava em Medicina.

Mas a invariância da velocidade da luz impôs aos gémeos um outro género de paradoxo, um paradoxo relativístico. Segunda a Teoria da Relatividade, a velocidade da luz no vazio é igual em todos os sis-

temas de referência não acelerados (os chamados referenciais de inércia). Essa é também a velocidade máxima possível. Assim, se nós estivermos parados numa estação a ver passar um comboio, e se alguém de dentro de uma carruagem nos fizer um sinal luminoso com uma lanterna, quando o comboio se aproxima, a velocidade com que nos chega a luz não é igual à soma da velocidade da luz com a velocidade do comboio. Isto porque, de acordo com a lei relativista da soma das velocidades, somar a velocidade da luz com outra velocidade dá sempre a velocidade da luz. É como somar um número infinito com outro finito, dá sempre infinito.

Esta propriedade magnífica significa que nós nunca poderemos andar mais depressa do que a luz, ou seja, nunca poderemos ultrapassá-la. Pior do que isso, dado que temos uma massa finita e o fóton não tem nenhuma, nunca poderemos sequer atingi-la.

Mas há uma outra consequência ainda mais drástica dessa lei relativista, que é a mudança do ritmo do tempo. Quando comparamos um relógio parado com outro que se está a mover, verificamos que o tempo no relógio parado passa mais depressa. É como se andar fizesse bem à saúde, pois o tempo passa mais devagar para quem se desloca. Isso parece um paradoxo, pois cada relógio está a andar em relação ao outro, basta trocar o sistema de referência a que chamamos fixo para inverter a situação.

Assim, o paradoxo dos gémeos pode ser posto nos seguintes termos. Se um gémeo ficar na Terra, e o outro embarcar numa nave espacial que se afasta a grande velocidade da Terra, o que viajou vai chegar mais novo.

Mas o paradoxo é só aparente, pois a situação não é completamente simétrica: o gémeo que viajou tem que inverter a marcha, a certa altura, se quiser regressar. Enquanto que o outro ficou na sua, ou seja, na nossa (Terra). Assim, a invariância da velocidade da luz tramou os gémeos.

6. A vorticidade

Num carrossel ou numa dança, percebemos bem o que é a vorticidade. É essa propriedade que nos faz rodar no espaço, em torno de um eixo (caso do carrossel) ou de uma pessoa (caso da valsa).

Até há poucos anos, pensava-se que os fótons não gostavam de rodar sobre si próprios, não apreciavam valsas nem carrosséis. Eram umas partículas bem empertigadas, que não torciam a espinha. Hoje sabe-se porém que os fótons se podem enroscar em torno do seu eixo, como um rabinho de porco. Chamam-se a esses fótons que se enroscam, os fótons torcidos. Esta é uma área nova do estudo da luz, que ainda tem muito para dar.



José Tito Mendonça é professor catedrático aposentado do Instituto Superior Técnico e antigo presidente do Departamento de Física, do Centro de Física de Plasmas e do Centro de Fusão Nuclear deste Instituto. É também professor convidado da Universidade de São Paulo, no Brasil, e da Universidade de Strathclyde, em Glasgow, Reino Unido. Tem um doutoramento de estado pela Universidade de Paris-Sud Orsay e foi conselheiro científico do director do projecto Europeu JET, em Oxford. Foi ainda responsável pela introdução de duas novas áreas de investigação em Portugal, a Fusão Nuclear e os Lasers Intensos. É actualmente responsável pela investigação em átomos frios e plasmas quânticos no Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear.

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

A luz na medição de distâncias

Fernanda Saraiva

Unidade Laboratório Nacional de Metrologia, Departamento de Metrologia, Instituto Português da Qualidade, Rua António Gião n.º 2, Caparica

fsaraiva@ipq.pt

Resumo

A luz foi a fonte que, durante o século XX, conduziu à rutura científica e tecnológica da definição do metro e da respetiva realização prática. O conhecimento sobre a luz veio permitir que o metro, unidade de base da grandeza comprimento, passasse, desde 1960, a ser definido a partir de propriedades da luz. Paralelamente a evolução tecnológica veio possibilitar que, desde 1983, a realização prática do metro seja efetuada através de sistemas que produzem luz monocromática, colocando no museu de metrologia a cópia n.º 10 de platina iridiada com secção em X do protótipo internacional do metro, fruto da Convenção do Metro (1875) [1] e atribuída a Portugal na 1.ª Conferência Geral dos Pesos e Medidas (1889). Atualmente as medições de qualquer comprimento a nível da ciência ou da indústria, com exatidão elevada e incerteza de medição baixa, são realizadas com tecnologias que envolvem a luz. Este artigo descreve a importância da utilização da luz na medição de comprimento, expondo alguns dos patamares de cadeias de rastreabilidade metrológica, desde a realização do padrão metro, no Laboratório Nacional de Metrologia do Instituto Português de Qualidade (IPQ), até ao utilizador final de instrumentos de medição de comprimento.

Introdução

A tentativa de uniformização de um sistema de unidades coerente teve o seu ponto de partida com a Revolução Francesa, onde um grupo de cientistas da Academia de Ciências (a Comissão de Pesos e Medidas), no qual se incluía Lavoisier, propõem um padrão universal e a adoção da divisão decimal, como forma de eliminar as barreiras comerciais que a panóplia de sistemas de pesos e medidas de cada país e até de cada região criavam, tornando morosa a comparação entre medições. Em 1791, a Assembleia Francesa adotou o metro para unidade de comprimento, definindo-o como sendo igual à décima milionésima parte

de um arco de meridiano. Quanto ao objetivo de criação de apenas um padrão universal (uma unidade de base) a que todas as medições estariam metrologicamente referenciadas, veio a tornar-se impraticável, sendo atualmente sete as unidades de base do Sistema internacional de Unidades (SI). A grande conquista desta Comissão foi ter conduzido à adoção mundial do sistema métrico decimal que permite dividir a unidade metrológica em múltiplos e submúltiplos de dez. O metro é a única unidade de comprimento¹. A utilização dos seus múltiplos e submúltiplos de base dez (decâmetro, hectómetro, quilómetro, ... decímetro, centímetro, milímetro, ...) tornou os cálculos muito mais simples, respondendo às necessidades práticas e permitindo a comparação imediata de resultados científicos, industriais e tecnológicos.

A evolução do conhecimento científico sobre as propriedades da luz (a velocidade da luz no vácuo é uma constante fundamental e exata da física) e os trabalhos sobre interferometria óptica desenvolvidos por A. Michelson, no final do século XIX, conduziram à atual definição da unidade de comprimento: o metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz, no vácuo, durante um tempo de $1/299\,792\,458$ do segundo [2]. Um padrão de medição deve ser reprodutível, estável ao longo do tempo, uniforme e possuir exatidão máxima. Estas propriedades tornaram-se possíveis, no caso do metro, com o aparecimento do laser (*Light Amplification through Stimulated Emission of Radiation*) e com a evolução tecnológica que levou à estabilização em frequência

¹ O sistema legal das unidades de medida em vigor em Portugal é definido no Decreto-Lei n.º 128/2010 de 3 de dezembro. Nele são apresentados os nomes, os símbolos e as definições das unidades, os prefixos e símbolos dos múltiplos e os submúltiplos dessas mesmas unidades e as recomendações para a escrita e para a utilização dos símbolos.

(ou comprimento de onda) da luz emitida, permitindo a sua utilização na realização de um novo padrão de comprimento e levando a que a realização prática da unidade seja agora universal [3]. A luz é assim a base da definição e da realização prática do metro. Os leitores encontram informação mais detalhada sobre esta matéria nas referências bibliográficas deste texto. É também com a luz e as tecnologias a ela associadas que se faz a disseminação do metro e a medição de distâncias com exatidão elevada, sendo pertinente a apresentação de alguns desses processos de medição e de calibração de padrões, assim como de exemplos de cadeias de rastreabilidade metrológica.

Medição com frações do comprimento de onda da luz

No final do século XIX, Albert Michelson, cientista americano inventor do interferómetro que recebeu o seu nome, instrumento capaz de medir pequenas distâncias em função do comprimento de onda da luz, propõe o uso de interferómetros ópticos para medir comprimento. A luz produz um fenómeno designado interferência que representa a sobreposição de uma ou mais ondas num ponto ou posição de referência, criando no espaço franjas de interferência. Entre 1892 e 1893, Michelson e Benoit efetuaram medições de padrões do metro (barra de platina iridiada) no Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) em função do comprimento de onda da linha vermelha de uma lâmpada de cádmio [4]. Estes trabalhos foram o início da relação luz – medição de distância, tendo contribuído para a atribuição a Michelson do Prémio Nobel da Física em 1907 [5,6].

Luz, laser-padrão de comprimento e interferómetro

A luz é a radiação eletromagnética de uma pequena região do espectro correspondente à radiação que o olho humano deteta, com comprimentos de onda variando aproximadamente de 400 nm a 700 nm. Como cada radiação é caracterizada pelo seu comprimento de onda (λ) e sendo o laser um equipamento capaz de emitir luz quase monocromática, torna-se evidente a sua utilização em metrologia dimensional. A estabilização em frequência de lasers He-Ne veio permitir a emissão de luz monocromática, ou seja, com apenas um comprimento de onda e com incertezas da ordem dos 2,5 kHz. Este tipo de lasers, estabilizados com células de iodo ($^{127}\text{I}_2$) (Figura 1), possui características metrológicas que dão resposta ao especificado pelo Comité Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) para a realização do metro (incertezas relativas em comprimento de onda ou frequência da ordem dos $2,1 \times 10^{-11}$) [7], sendo por isso designados normalmente de laser-padrão de comprimento. A determinação com elevada exatidão da frequência (ou comprimento



Fig. 1 - Laser-padrão IPQ3 em alinhamento e após a substituição do tubo de He-Ne. Este sistema laser é constituído por uma cavidade de ressonância formada por dois espelhos, estando um solidário com o topo do tubo laser e o outro solidário com um piezoelétrico, e por uma célula de iodo colocada no interior da cavidade de ressonância do laser. A unidade de controlo deste sistema laser permite o controlo do comprimento da cavidade e a fixação do mesmo, conseguindo-se a emissão de um feixe de luz monocromático e estabilizado de acordo com as recomendações do CIPM para a realização prática da definição do metro: $f_{\text{IPQ3}} = 473\,612\,353\,601,5$ kHz; $\lambda_{\text{IPQ3}} = 632\,991\,212,6$ fm.

de onda) é obtida por comparação com uma frequência-padrão de um sintetizador de frequências ópticas (SFO), sendo este último o padrão atual do topo da cadeia metrológica de comprimento. Na prática, os lasers-padrão He-Ne, estabilizados com células de iodo, são ainda os sistemas internacionais mais utilizados para a realização prática e disseminação do metro.

O avanço tecnológico dos lasers veio substituir as lâmpadas que Michelson utilizou no seu interferómetro, mantendo-se contudo o princípio de medição através de frações de franja de interferência. O padrão de interferências – sucessão contínua de franjas claras e escuras – gerado por um interferómetro do tipo Michelson é caracterizado pelo comprimento de onda da radiação eletromagnética emitida pela fonte de luz utilizada. Os interferómetros laser são atualmente utilizados para medir distâncias com exatidão elevada e com baixas incertezas de medição. Para que estes objetivos sejam atingidos, o valor do comprimento de onda da radiação laser tem de ser conhecido, sendo obtido através da calibração do laser do interferómetro. Nestas calibrações, os resultados de medição do padrão são comparados com os do equipamento em calibração, estabelecendo-se uma relação entre os valores do padrão de referência, neste caso os do laser-padrão de He-Ne, com os resultados de indicação do equipamento em ensaio, ou seja, com os do laser do interferómetro. Este processo de calibração é levado a cabo nos laboratórios nacionais de metrologia e constitui um dos primeiros patamares da disseminação do metro.

A luz na medição do comprimento de blocos-padrão

Os blocos-padrão têm rastreabilidade metrológica à definição do metro porque são calibrados por interferometria óptica e são um elo de ligação da cadeia de rastreabilidade metrológica para a indústria. Os blocos-padrão são padrões de comprimento de topo, isto é, definem um comprimento-padrão entre duas faces opostas, planas e paralelas (valor nominal l). Os mais comuns são de aço, de secção retangular 9 mm x 30 mm, podendo também ser fabricados com outros materiais (ex: cerâmica ou liga de tungsténio e



Fig. 2 - Conjunto de blocos-padrão de aço. Regra geral, os conjuntos são constituídos por 88, 111 ou 122 blocos, podendo fabricar-se outros para resposta a calibrações de equipamentos de medição específicos como é o caso do micrómetro (ISO 3611:2010) e com classes de exatidão diferentes.

carbono) [8]. O acabamento superficial das suas faces de medição, com tolerâncias de planeza da ordem dos 50 nm (para os de classe de exatidão k), permite a aderência entre si formando pilhas, com comprimentos variáveis, de modo a satisfazer os requisitos dos utilizadores. Um conjunto básico de blocos-padrão é constituído por 111 blocos, com valores nominais de 0,0005 mm a 100 mm em que a primeira série de nove blocos, de 1,001 mm a 1,009 mm, tem um passo de 1 μm (Figura 2).

Método de medição

O interferómetro para a calibração de blocos-padrão é constituído por dois lasers estabilizados e calibrados, que funcionam como padrões de referência do processo. O processo de medição é baseado no método de fração de franja, desenvolvido por Michelson e Benoit, que aplica o princípio de um determinado comprimento poder ser expresso por um único conjunto de ordens de interferência, para cada comprimento de onda (λ_{ar}). O conjunto óptico constituído por espelhos, divisores de feixe e detetores é alinhado segundo o esquema do interferómetro de tipo Michelson (Figura 3). Nos topos dos braços do interferóme-

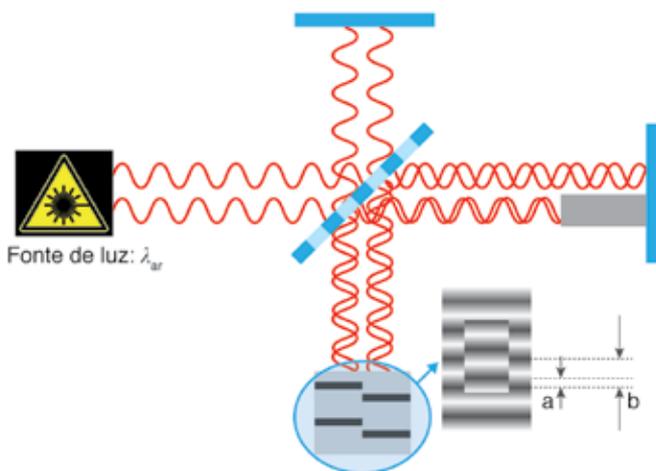


Fig. 3 - Esquema de um interferómetro para a medição de blocos-padrão. O comprimento de cada bloco-padrão é determinado medindo-se a fração de franja (a/b) entre o padrão de interferências formado no topo do bloco e o padrão de interferência formado no topo da superfície do prato.

tro existem duas superfícies refletoras, sendo uma constituída pelo conjunto prato mais bloco-padrão (Figura 4) e a outra por um espelho 100 % refletor.

A fração de franja a/b , determinada a partir do padrão de interferências gerado (onde a é a diferença entre a franja no prato e no bloco e b a distância entre franjas, função do λ_{ar} da radiação utilizada), permite obter o erro de medição do comprimento do bloco-padrão, h , através da Equação 1.

$$h = \frac{a}{b} \cdot \frac{\lambda_{\text{ar}}}{2} \quad (1)$$

O valor de medição, v_m , do comprimento de cada bloco-padrão é dado pela soma do valor nominal, l com h .

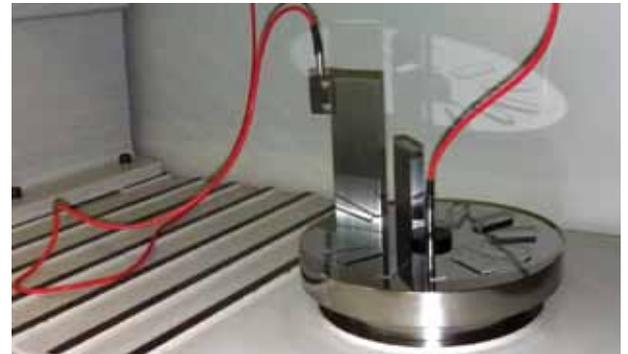


Fig. 4 - Conjunto de blocos-padrão aderidos ao prato de referência na cabine do interferómetro, prontos para medição dos respetivos comprimentos por interferometria.

Resultado de medição de um bloco-padrão

Para concluir a calibração de um bloco-padrão, falta ainda a determinação de uma das parcelas fundamentais do resultado de medição, a incerteza de medição expandida, U [9]. A cada medição está sempre associada uma incerteza de medição. A grandeza [10] que pretendemos medir (resultado de medição do comprimento do bloco) é expressa através de $l_{vn} = v_m \pm U$. O método de medição utilizado e os parâmetros de influência no valor medido levam a que se tenha de ter em conta, no mínimo, as seguintes fontes de incerteza: comprimento de onda no vazio das radiações utilizadas, medição da fração de franja, temperatura do bloco-padrão, espessura do filme de aderência, erros de frente de onda, erros de alinhamento resultantes do desenho e alinhamento óptico, índice de refração do ar, temperatura, pressão e humidade do ar e incerteza do valor do coeficiente de expansão linear dos blocos-padrão [11]. O tratamento estatístico de todas as fontes de incerteza, incluídas no processo de calibração levado a cabo no laboratório de comprimento do IPQ, conduziu ao valor de $U=(26+0,28l)$ nm (para l de 0 mm a 100 mm). Os

resultados de medição expressos no certificado de calibração estão assim rastreados à realização prática do metro, permitindo a disseminação da unidade ao serem utilizados como valores de referência nos patamares seguintes da cadeia de rastreabilidade, quando na indústria os blocos-padrão são utilizados para a calibração de equipamentos de medição dimensional correntes, por exemplo: no caso dos micrómetros e paquímetros [12].

Cadeias de rastreabilidade metrológica

Os processos acima apresentados descrevem os patamares de uma cadeia de rastreabilidade metrológica de comprimento, iniciada com a realização prática da definição do metro através dos sistemas SFO e laser-padrão de He-Ne, e a sua disseminação com processos de calibração de padrões secundários de comprimento, que incluiu os lasers dos interferómetros, os blocos-padrão e os micrómetros. Nesta cadeia, o interferómetro de tipo Michelson utilizado é o de franjas estacionárias. No entanto, outro tipo de configuração óptica do interferómetro permite gerar franjas dinâmicas, sendo aplicado para medir longas distâncias com exatidão elevada. Este tipo de interferómetro, com apenas um laser calibrado por comparação com o laser-padrão de comprimento, é utilizado para a calibração de medidas materializadas de traços (escalas, fitas métricas e sondas), bancos de ensaio e máquinas ferramenta com controlo numérico.

Devido à evolução científica e tecnológica, o metro é realizado em qualquer ponto do mundo com a mesma exatidão. O rastreabilidade metrológica dos resultados das medições à realização prática do metro, através da calibração dos equipamentos de medição utilizados na investigação científica, é o garante para a comparação e aceitação, a nível universitário e internacional, dos resultados de medição. Por outro lado, o fabrico de componentes e acessórios em diferentes locais e destinados a serem montados num único conjunto ou sistema, é produzido e controlado por equipamentos de medição rastreados à realização do metro, permitindo criar critérios de aceitação/rejeição de peças baseadas em valores de medição exatos, com grandes vantagens económicas e funcionais, na produção e transação de bens.

Referências

1. *Convention du Mètre*. <http://www.bipm.org/en/worldwide-metrology/metre-convention/>
2. *BIPM Compte Rendus 17th Conf. Gén. Poids et Mesures*, p. 45-49, p. 97-98 (1983).
3. F. Saraiva e outros, "O LASER na realização prática da definição do metro", *Gazeta de Física* 34(1), 8-11 (2011).
4. *The former Prototype Metre*. <http://www.bipm.org/en/measurement-units/history-si/former-prototype-metre.html>
5. *Nobel Lectures, Physics 1901-1921*, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, (1967).
6. *Albert A. Michelson - Nobel Lecture: Recent Advances in Spectroscopy*. Nobelprize.org. Nobel Media AB 2014. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1907/michelson-lecture.html.
7. *Practical realizations of the definitions of some important units: Recommended values of length standard frequencies*. <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html>
8. ISO 3650:1998 - (GPS) - *Length Standards - Gauge Blocks*.
9. *Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections).
10. *Vocabulário Internacional de Metrologia- Conceitos fundamentais e gerais e termos associados*, 1.ª edição Luso-Brasileira, (2012).
11. J. E. Decker, J. Rr. Pekelsky, "Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry", *Metrologia* 34, 479-493 (1997).
12. F. Saraiva, "Paquímetro - Conceitos Metrológicos Associados", Poster. <http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Pages/MatDidat.aspx>



Fernanda Saraiva é licenciada em Física Tecnológica pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa em 1991 e é técnica superior no Departamento de Metrologia do IPQ desde 1992. Atualmente é responsável pelos domínios de Comprimento e Ângulo e Gestora da Qualidade da Unidade Laboratório Nacional de Metrologia do IPQ. Integra e desenvolve trabalhos em projetos de investigação metrológica internacionais e é coordenadora técnica dos ensaios de comparação de padrões a nível nacional, nas áreas de comprimento e ângulo. Sócia e membro dos corpos sociais da Academia de Amadores de Música, sócia da Sociedade Portuguesa de Metrologia e da Sociedade Portuguesa de Física.

No Ano da Luz – medir a constante de Planck com díodos LED

Maria Conceição Abreu¹ e Luis Peralta^{1,2}

¹ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas

² Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

mabreu@ualg.pt; luis@lip.pt

Resumo

Este trabalho tem por objetivo a medição da constante de Planck, h , com díodos emissores de luz (LED), usando um método pouco complicado e que, com recurso a um amplificador integrado de luz, permite chegar não só à ordem de grandeza da constante (10^{-34} J s) mas também estabelecer o seu valor até às décimas dentro da incerteza da metodologia proposta. Com esta experiência, obteve-se um valor para a constante de Planck de $(6,6 \pm 0,2) \times 10^{-34}$ J s.

Motivação

Este trabalho tem as seguintes motivações principais:

- No Ano Internacional da Luz, propor ou relembrar que se pode medir a constante de Planck com recurso à emissão e deteção de luz pareceu-nos interessante.
- Os alunos gostam de medir e verificar o que lhes ensinamos teoricamente, e esse desejo maior é quando o desafio é medir algo muito pequeno como h numa simples mesa ou quase bancada, já que laboratórios nas escolas secundárias são história.
- Os nossos colegas professores do ensino secundário, que recorrem a experiências considerando-as um instrumento didático importante, podem encontrar neste trabalho uma fonte de inspiração e, esperamos, uma boa ajuda para efetuar a medição sem surpresas.
- Desmistificar que medir é simples, rápido e que até se pode fazer com muito pouca coisa: por um lado é verdade, mas por outro só permite em geral medições elementares.

No domínio da didática, avançamos um pouco mais e dizemos que tal como a aprendizagem da parte teórica é multicamada, muito mais o é a parte experimental. Quase todas as experiências sobre um dado tema podem ir de um ciclo inicial até à universidade. Neste caso, esta experiência é para o ensino secundário, mas muito fica para poder ser explorado no 1.º ciclo do ensino superior.

Relação entre o LED e a constante de Planck

Experiências em que LED são usados para a determinação da constante de Planck têm sido descritas e analisadas por vários autores [1-4, entre outros]. O argumento principal baseia-se na hipótese de que a energia $h\nu$ do fóton emitido é aproximadamente igual à energia perdida pelo eletrão ao passar da banda de condução para a banda de valência na zona ativa do LED quando se dá a recombinação eletrão-buraco [5]. Esta energia é aproximadamente igual à energia E_g da banda proibida (*gap*) do semiconductor de que é feito o LED.

Num díodo não polarizado, existe uma zona na junção P-N, chamada região de depleção, em que quase não existem portadores de carga livres. A densidade de carga em cada lado da junção (devido aos dadores na região tipo-N e aos aceitadores na região tipo-P) cria a diferença de potencial de difusão V_D . Esta diferença de potencial depende da concentração de dadores e de portadores, bem como de portadores intrínsecos de carga [5]. Quando um díodo é ligado num circuito de tal forma que a sua região tipo-P fica a um potencial mais elevado que a região tipo-N, dizemos que o díodo se encontra diretamente polarizado.

Nas condições típicas de polarização direta do díodo, a relação entre corrente I e a diferença de potencial V_{LED} , aplicada aos terminais do LED é aproximadamente exponencial

$$I = I_0 \exp(eV_{LED}/kT) \quad (1)$$

sendo e o valor absoluto da carga do eletrão, k a constante de Boltzmann e T a temperatura termodinâmica.

A energia $h\nu$ dos fótons emitidos por um semicondutor com uma energia de *gap* E_g é

$$h\nu \approx E_g \quad (2)$$

em que ν é a frequência e h a constante de Planck.

Num LED ideal, cada eletrão injetado na zona ativa e que se recombinar com um buraco dará origem a um fóton. O LED começa a emitir luz quando a tensão exterior aplicada à junção atinge um valor de tensão limiar ou de ativação, e que é aproximadamente igual à tensão de difusão V_D [5]. Por seu lado, a tensão de difusão para um LED é aproximadamente igual a E_g/e [5]. Assim, tem-se que no limiar de emissão do LED

$$h\nu \approx eV_D \quad (3)$$

e a energia dada pela fonte exterior de tensão transforma-se em energia radiante. No LED, outros processos, como a agitação térmica, podem contribuir para fornecer a energia necessária ao eletrão que atravessa a zona ativa, pelo que a relação anterior será então reescrita como

$$h\nu \approx eV_D + W \quad (4)$$

sendo W a energia fornecida pela rede cristalina. Esta equação descreve uma relação linear entre a tensão de ativação do LED e a frequência dos fótons emitidos

$$V_D \approx h\nu/e - W/e \quad (5)$$

que pode ser utilizada para estimar o valor da constante h de Planck. A Equação 5 é análoga à que se obtém quando a constante h é medida a partir do efeito fotoelétrico, mas sua origem e significado são diferentes.

Material necessário

- Conjunto de díodos LED emissores de vários comprimentos de onda
- Resistências de 1 k Ω (uma por LED)
- Fotodetetor (conversor luz-tensão, TSL12S ou equivalente)
- Pilha de 4,5 V
- 2 voltímetros digitais

- Uma fonte de tensão contínua variável (por ex. entre 0 V e 6 V)
- Cabos e fichas banana para as ligações
- Um tubo de plástico de diâmetro pequeno

Nesta experiência, deteta-se a luz emitida pelo LED utilizando um fotodetetor, que converte a luz numa tensão que pode ser medida com um voltímetro digital. O componente escolhido – TSL12S [6] – integra um fotodíodo e um amplificador de alto ganho, permitindo de uma forma eficiente a deteção de intensidades luminosas muito fracas – isto é, conseguir detetar a luz logo que esta começa a ser emitida, com intensidade de difícil perceção pelo olho humano. Este componente pode ser alimentado por uma pilha de 4,5 V, tornando a sua montagem e operação muito simples. O seu intervalo de sensibilidade cobre o intervalo de comprimentos de onda de 320 nm a 1050 nm, permitindo realizar experiências em toda a banda do visível e infravermelho próximo.

Os díodos LED a escolher para a experiência devem preferivelmente ter o corpo transparente e incolor (tipo *water clear*) de forma a diminuir a autoabsorção. Devido à semelhança entre si e para evitar confusão, os díodos LED a utilizar devem ser previamente etiquetados. A largura a meia-altura $\Delta\lambda$ da banda de emissão deverá ser a menor possível: os valores típicos para os dispositivos atualmente comercializados encontram-se no intervalo de 20 nm a 40 nm.

O esquema das ligações necessárias entre os diversos componentes está representado na Figura 2. O LED é ligado através de uma resistência de proteção (valor típico de 1 k Ω) a uma fonte de tensão variável. Nos díodos LED, o terminal com maior comprimento deve ser ligado ao polo positivo da fonte para este ficar diretamente polarizado. O voltímetro deve ser ligado aos terminais do LED de forma a medir a tensão que lhe é aplicada. O fotodetetor TSL12S possui três terminais: o terminal GND é o ponto comum e é ligado ao polo negativo da pilha; o terminal VDD é ligado ao polo positivo, sendo o voltímetro ligado entre os terminais OUT e GND. Tanto o LED como o fotodetetor devem ser

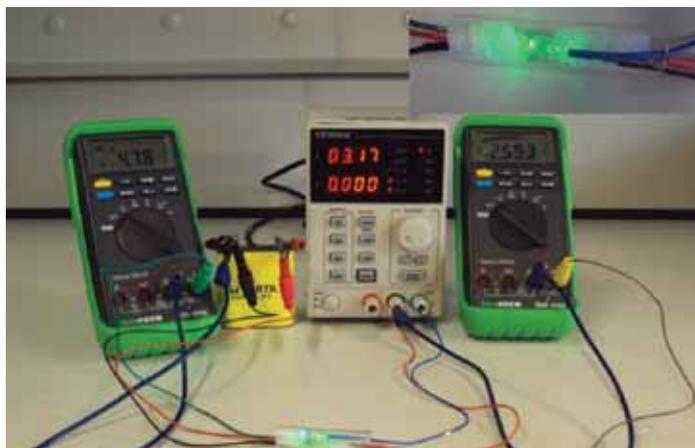


Fig. 1 - Exemplo do dispositivo de medida. Para realizar as medições, o tubo que contém o fotodetetor e o LED deve ser envolvido numa película opaca à luz (por exemplo, folha de alumínio). Os valores apresentados pelos aparelhos na fotografia não são indicativos de uma situação de medição real, mas foram escolhidos para ser visível a luz do LED. No canto superior direito é mostrado um *zoom* do tubo com o fotodetetor e o LED.

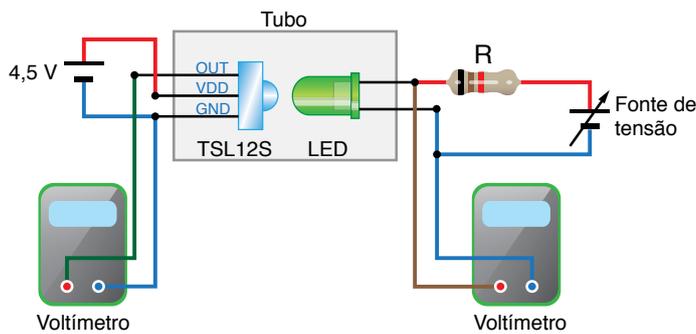


Fig. 2 - Esquema das ligações entre os diversos componentes.

colocados dentro de um pequeno tubo, de forma a ficarem frente-a-frente. Para evitar interferências de luz vinda do exterior, o tubo deve ser envolvido numa película completamente opaca (folha de alumínio é uma boa opção).

Como determinar a constante h ?

O método proposto assenta na determinação direta da tensão de ativação do LED com base na detecção da luz emitida usando um sistema com um fotodetector de elevada sensibilidade. A determinação da tensão para a qual o LED começa a emitir luz pode ser feita de acordo com o seguinte procedimento: a tensão aplicada ao LED é aumentada até que o fotodiodo registre um sinal acima do valor do ruído (que será da ordem do milivolt). Empiricamente verificámos que com um voltímetro de baixo custo, para um aumento de 1 mV do sinal acima do ruído, pode-se considerar ter atingido a tensão de ativação V_D .

Sendo este um procedimento muito simples, adequa-se a ser utilizado por alunos do ensino secundário. Um método mais sofisticado passaria, por exemplo, pela obtenção de dois valores de sinal acima do ruído para dois valores de tensão no LED e posterior extrapolação do valor da tensão no LED para o valor de sinal nulo.

Na experiência podem ser utilizados díodos LED que cubram o espectro de comprimentos de onda do infravermelho ao azul. Para o comprimento de onda característico do LED, escolhemos em cada caso o valor de pico (*peak value*) indicado pelo fabricante. Alguns fabricantes fornecem também o valor dominante do comprimento de onda. Contudo, os resultados obtidos com este valor mostraram ser de qualidade inferior aos obtidos utilizando o valor de pico. Na Tabela 1, indicamos os comprimentos de onda de pico dos LED utilizados, bem como as tensões de ativação medidas nesta experiência. De notar que, para alguns díodos LED, as tolerâncias cotadas pelos fabricantes para os comprimentos de onda de pico podem chegar a alcançar 10 nm, o que na ausência duma medição direta do comprimento de onda introduz uma incerteza experimental no valor assumido.

O gráfico da Figura 3 apresenta a curva experimental típica da tensão de ativação em função da frequência de pico da luz emitida. O valor de h é obtido através de um ajuste linear aos pontos experimentais, o que poderá ser facilmente conseguido utilizando por exemplo uma folha de cálculo. Nesse

Tabela 1 - Comprimentos de onda de pico dos LED utilizados e tensões de ativação medidas. Os valores de tensão têm associadas uma incerteza de 0,005 V e os valores de comprimento de onda de pico têm associada uma incerteza de 10 nm. Notar que os dois LED com $\lambda_{\text{pico}} = 565$ nm são de fabricantes diferentes.

$\lambda_{\text{pico}} / \text{nm}$	V_D / V
464	2,103
535	1,886
565	1,663
565	1,595
583	1,554
596	1,505
610	1,465
627	1,469
631	1,406
645	1,296
660	1,305
850	0,934

caso, será pedida a equação da linha de tendência que ajusta os pontos. Dependendo do número e do tipo de díodos LED escolhidos para realizar o ajuste, obtivemos valores de h que variam entre $6,4 \times 10^{-34}$ J s e $6,8 \times 10^{-34}$ J s, sendo $(6,6 \pm 0,2) \times 10^{-34}$ J s o valor médio.

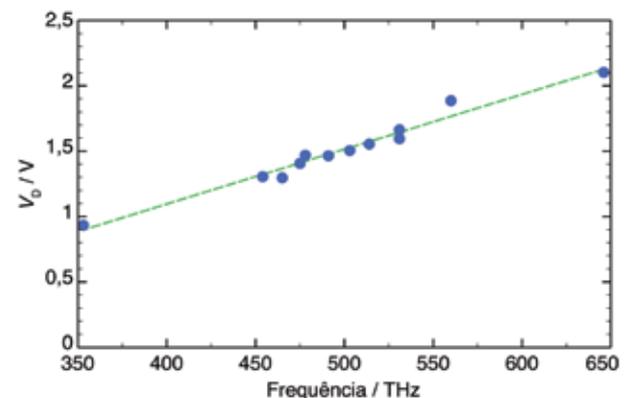


Fig. 3 - Gráfico típico do valor de tensão de ativação do LED em função da frequência de pico. A linha a tracejado representa o ajuste linear aos dados, a partir do qual se extraiu o valor da constante de Planck. Por conveniência na representação, a frequência é dada em THz.

Avaliação final

Outras experiências que utilizam o LED para a determinação da constante de Planck baseiam-se na determinação da tensão de ativação V_D a partir da extrapolação linear para corrente nula da curva característica corrente-tensão do diodo [1-2]. Este procedimento, além de pouco intuitivo para os alunos, sofre da indefinição na escolha da tensão de ativação. Para os díodos LED atualmente comercializados, a curva corrente-tensão é bem descrita

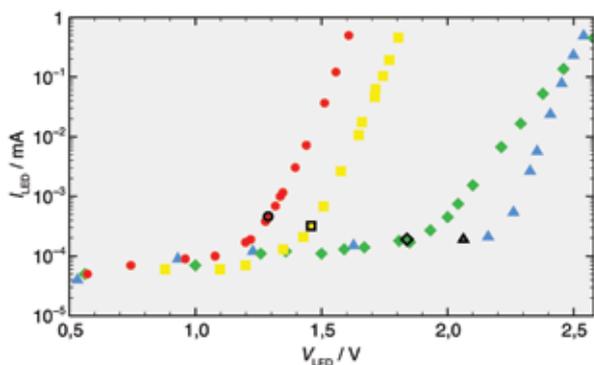


Fig. 4 - Curva característica para quatro diodos LED de cores diferentes, em que a intensidade de corrente foi medida num miliamperímetro de precisão. Notar que para esta medição não é necessária a utilização do fotodiodo TSL12S. O ponto correspondente à tensão de ativação está indicado por um símbolo diferente dos restantes.

por uma exponencial até valores muito pequenos (menores que $1 \mu\text{A}$) como se pode constatar na Fig. 4. A tensão de ativação (marcada na figura por um símbolo diferente para cada LED) encontra-se perto do ponto de inflexão da curva, sendo a sua medição direta difícil com o equipamento normalmente disponível nas escolas secundárias.

Notemos que na Tabela 1 e Figura 3 apresentamos valores de V_D diferentes para dois diodos cotados pelos fabricantes com o mesmo comprimento de onda de pico. É um exemplo da variação que podemos obter para diodos “semelhantes”, neste caso de fabricantes diferentes. O método agora proposto, para além de permitir medir diretamente V_D , apenas necessita de equipamento já existente nas escolas, o que pensamos ser uma vantagem. Suponhamos ainda que o aluno ou o professor querem “ver” o que se consegue sem fotodetector/amplificador. Neste caso, basta tentar estabelecer a tensão V_D para a qual se começa a detetar com os olhos a emissão de uma luz ténue colorida no diodo. Nós também começamos por fazer essa experiência e chegamos a um resultado de $8 \times 10^{-34} \text{ J s}$, ou seja, obtemos corretamente a ordem de grandeza, mas o valor está longe do estabelecido!

Terminamos referindo que o valor atualmente aceite para a constante de Planck é $(6,626\ 070\ 040 \pm 0,000\ 000\ 081) \times 10^{-34} \text{ J s}$ [7] verificando-se assim, tal como referido no início, que este método nos permite determinar h com dois dígitos.

Referências

1. V. Indelicato, P. La Rocca, F. Riggi, G. Santagati e G. Zappala, “Analysis of LED data for the measurement of Planck’s constant in the undergraduate laboratory”, *Eur. J. Phys.* 34, 819–830 (2013); DOI: 10.1088/0143-0807/34/4/819
2. Y. Kraftmakher, “Experiments with light-emitting diodes”, *American Journal of Physics* 79, 825-830 (2011); <http://dx.doi.org/10.1119/1.3599072>
3. F. Herrmann e D. Schätzle, “Question 53. Measuring Planck’s constant by means of an LED”, *American Journal of Physics* 64, 1448 (1996); DOI: 10.1119/1.18404
4. Roger Morehouse, “Answer to Question #53. Measuring Planck’s constant by means of an LED”, *American Journal of Physics* 66, 12 (1998); DOI: 10.1119/1.19034
5. E. Fred Schubert, *Light-Emitting Diodes*, 2nd edition, Cambridge University Press, 2006, cap. 4
6. O componente TSL12S é comercializado através de diversas casas de electrónica. A título de exemplo referimos os sites de duas que efetuam entregas: <http://pt.rs-online.com> e <http://www.digikey.pt>
7. NIST h constant: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h>



Física.

Maria da Conceição Abreu

é investigadora do Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP) e professora catedrática aposentada da Universidade do Algarve. Interessa-se no presente por Física Médica, área da radioproteção e sempre pela componente experimental do Ensino da



Física.

Luis Peralta é professor associado com agregação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e investigador do LIP. A sua investigação decorre nas áreas das radiações ionizantes com aplicações à Medicina e ao Ambiente. É há oito anos coordenador do projeto *Radiação Ambiente* que envolve a participação de várias dezenas de escolas do ensino básico e secundário.

Um raio de luz no Alentejo

Raquel Forca, Sylvie de Sousa e Paula Lagarto

Agrupamento de Escolas de Almodôvar, Travessa da Ponte Romana, Almodôvar

raquelforca@aealmodovar.org; sylviesousa@aealmodovar.org; paulalagarto@aealmodovar.org

Resumo

O Agrupamento de Escolas de Almodôvar tem promovido a ligação entre várias áreas do saber e entre os vários ciclos de ensino, numa lógica de cooperação e desenvolvimento do conhecimento acessível a todos. Celebrar o Ano Internacional da Luz foi, este ano, o mote para desenvolver projetos internos interdisciplinares (como *Poemas com Luz* e *Luz Sustentável*) e participar em outros a nível nacional como o das *Cidades Sustentáveis*, que divulgaram diferentes fenómenos e tecnologias ligadas à luz.

O Agrupamento de Escolas de Almodôvar comemorou o Ano Internacional da Luz, integrando e dinamizando diversos projetos e atividades. Foi criado um *workshop* intitulado *Poemas com Luz*; no âmbito do projeto europeu *Cidades Sustentáveis*, procurámos resolver dois problemas identificados na nossa comunidade com as propriedades da luz, num projeto designado *Luz Sustentável*, que foi reconhecido como ideia de mérito pela Fundação Ilídio Pinho; comemorámos, num projeto europeu na plataforma e *Twinning*, o Ano Internacional da Luz, com diversas escolas europeias, tendo a nossa colaboração sido reconhecida com o selo de qualidade nacional e europeu e, por fim, no nosso quinto

encontro “Aqui há Ciência, Palavra e Luz”, trouxemos à nossa escola, mais uma vez, um grupo de cientistas/professores que nos proporcionaram um conjunto de palestras de extrema qualidade.

Durante o ano letivo, levámos a todas as escolas do pré-escolar e 1.º ciclo um *workshop* intitulado *Poemas com Luz*. Este *workshop* foi criado por uma docente de Física e Química, dinamizado pelos alunos do curso profissional do 11.º B (Técnico de Organização de Eventos), e organizado pela Biblioteca Escolar. Com base na leitura de pequenos poemas sobre a luz, seguidos de observação e experimentação, os alunos do pré-escolar e primeiro ciclo puderam reconhecer o papel da luz na ciência, desvendando o porquê de certos fenómenos óticos bem como os cuidados que devemos ter com a luz. Foi dinamizado o projeto *Luz Sustentável* onde se pretendeu envolver e promover a colaboração entre instituições científicas e entidades educativas. A primeira atividade deste projeto foi mostrar aos alunos envolvidos as inúmeras possibilidades de negócio em torno do tema da luz, promovendo o empreendedorismo junto da comunidade escolar. Pediu-se aos alunos que identificassem dois problemas na nossa comunidade e, após discussão e apresentação de argumentação, foi decidido que iríamos tentar encontrar uma solução para os mesmos, através da ciência, tecnologia e natureza da luz, promovendo o empreendedorismo e a sustentabilidade. Procurou dar-se resposta a duas questões: “Excedente de produção agrícola, o que fazer?” e “Qualidade da água de furos particulares, como fazer?”. A relevância destas questões de investigação prende-se com o facto do agrupamento estar inserido numa zona rural. No entanto, estes são também problemas identificados à escala mundial. Relativamente à qualidade da água, tivemos a presença da bactéria *Legionella spp* em alguns reser-

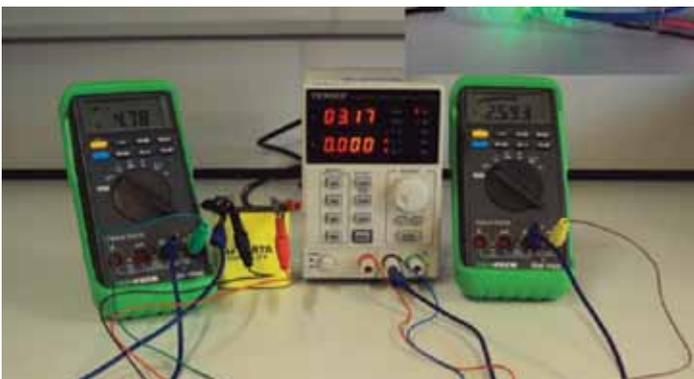


Fig. 1 - Apresentação do Projeto *Luz Sustentável* no V Encontro *Aqui Há Ciência, Palavra e Luz*, por alunos do 2.º e 3.º ciclos.

vatórios de abastecimento de água. Esta situação foi devidamente tratada pelas Águas Públicas do Alentejo S.A., mas deixou os alunos preocupados e a levantarem a questão de quem monitoriza a água nos furos particulares. Como a maioria dos alunos envolvidos neste projeto tem furos que abastecem habitações, são usados para regadio e para uso de pessoas e animais, esta tornou-se uma questão de extrema pertinência.

Identificadas as questões de investigação e consciencializados para a relevância deste estudo, sentimos necessidade de estabelecer uma parceria que nos proporcionasse o conhecimento científico necessário para a progresso desta investigação. Juntámo-nos ao projeto europeu *MARCH - Making Science Real in Schools*, dinamizado pelo Pavilhão do Conhecimento. Durante os meses seguintes, desenvolvemos uma metodologia de investigação para cada uma das questões. Da literatura que pesquisámos, concluiu-se que seria necessário construir dois protótipos: um desidratador solar e uma caixa de tratamento de água através de lâmpadas ultravioleta. A construção destes protótipos ajudar-nos-ia a recolher dados que, por sua vez, seriam tratados e analisados de forma a respondermos às questões que nos propusemos investigar. A ideia passou por construir protótipos *low-cost*, que pudessem ser autónomos a nível energético, de forma a serem utilizados em qualquer local, e que utilizassem a tecnologia e natureza da luz. Para estudar a eficácia do desidratador solar, utilizaríamos o excedente de produção da horta escolar. Para o protótipo de tratamento de água, seriam recolhidas aleatoriamente 15 amostras de furos privados e realizados testes bacteriológicos antes e depois do tratamento com lâmpadas ultravioleta germicida de baixa pressão, pois, segundo a nossa pesquisa, estas lâmpadas são usadas na desinfecção do ar, água e superfícies hospitalares, centros de investigação bacteriológica e farmacêuticos. Também são utilizadas na desinfecção de água potável, águas residuais, piscinas, câmaras frigoríficas, sistemas de ar-condicionado, materiais de embalagem, entre outros. Estas lâmpadas matam bactérias, vírus e outros micro-organismos. Mais uma vez, os dados recolhidos e tratados verificariam a eficácia deste protótipo. Foi então feito um levantamento dos custos de cada protótipo e, como necessitávamos de financiamento, concorremos ao projeto *Ciência na Escola*, da Fundação Ilídio Pinho, que viabilizou a verba necessária. Assim, foram construídos os dois protótipos. Fizemos a primeira divulgação do nosso projeto no Pavilhão do Conhecimento, em Lisboa. Nos dois meses seguintes, foi realizado todo o trabalho de experimentação do projeto. Pedimos o apoio da Universidade do Algarve, onde tivemos a oportunidade de conhecer a investigadora Professora Doutora Ana Costa, que nos recebeu no seu laboratório. Os alunos recorreram a um artigo



Fig. 2 - Fluorescência.

científico [1], e recriámos essa experiência de forma a obter uma película de grafeno para conhecermos as propriedades óticas deste material e a viabilidade de usá-lo no nosso projeto. O projeto foi finalmente apresentado no “Encontro Europeu MARCH/Innovation Swap Workshop”, no Pavilhão do Conhecimento – Ciência Viva [2]. As turmas dos nonos anos da escola também se envolveram num projeto e *Twinning*, em que cada escola europeia propôs uma experiência sobre a luz, explicando as suas propriedades físicas. Os alunos da escola recriaram uma experiência do livro *Um passeio aleatório pela ciência do dia-a-dia*, do autor Nuno Crato. Explicaram o fenómeno da fluorescência através de um pequeno vídeo. Os vídeos foram introduzidos no blogue *2015 International Year of Light*.



Fig. 3 - Tratamento de água com lâmpadas germicidas.

Anualmente é realizado um encontro que procura desenvolver a interdisciplinaridade entre áreas distintas como a Literatura, as Ciências e as Artes Visuais. Ao longo de cinco anos, vieram à escola diversas figuras ligadas a estas vertentes, nacionais e internacionais, que expuseram diferentes temas em palestras pertinentes e que mostraram a articulação perfeita entre estas áreas do saber. Foram também realizadas videoconferências com autores no Reino Unido, Estados Unidos da América e Holanda e feitas exposições por parte dos alunos do Agrupamento, desde o primeiro ciclo ao ensino secundário. De salientar também que se trata de uma atividade que envolve vários docentes, a Biblioteca Escolar e a Direção, num trabalho de articulação que acaba por dinamizar toda a escola. Em cada ano, procurou encontrar-se um tema comum que pudesse ser explorado e, este ano, por se tratar do Ano Internacional da Luz, esse foi o tema em destaque. Assim, estiveram presentes no encontro



Fig. 4 - Palestra da Presidente da Sociedade de Física, Doutora Maria Teresa Peña.

a Doutora Maria Teresa Peña, Presidente da Sociedade de Física, o Doutor João Paiva, da Universidade do Porto, a Dr.ª Violante Saramago Matos da Fundação José Saramago, e o Doutor Julio Güémez, Professor da Universidade da Cantábria. Realizámos também duas videoconferências, uma com o Doutor Pedro Russo, Professor na Universidade de Leiden, Holanda, e outra com o Doutor David Bodanis, a partir de Inglaterra. Alunos do 6.º e 9.º anos expuseram trabalhos e conduziram as videoconferências e a turma 11.º B, do já referido Curso Profissional de Técnico de Organização de Eventos, colaborou na organização e condução do evento.

Estes projetos e, mais concretamente, o *Encontro Aqui Há Ciência, Palavra e Luz*, contaram com a colaboração da Texto Editores e tiveram como principal objetivo mostrar à comunidade escolar e nacional diferentes fenómenos e tecnologias associados à luz, com atividades desenvolvidas por alunos de diferentes ciclos e em articulação com diferentes instituições nacionais e internacionais, numa mais-valia de partilha de saberes e cultura de áreas diferentes.

Referências

1. S. J. Woltornist, A. J. Oyer, J. M. Carrillo, A. V. Dobrynin, e D. H. Adamson, "Conductive thin films of pristine graphene by solvent interface trapping." *ACS Nano* 7, 7062 (2013).
2. <https://www.youtube.com/watch?v=wwAXIQ83rwc>
3. <http://iylight2015.blogspot.pt/>

Há luz nas escolas! Arte e Ciência na preparação para as Olimpíadas de Física

Teresa Paiva

Salesianos de Lisboa - Colégio Oficinas de S. José, Praça S. João Bosco 34, Lisboa

teresa.paiva@salesianos.pt

Resumo

Foram muitos os professores do Ensino Básico e Secundário que celebraram 2015 – o Ano Internacional da Luz, nas escolas, envolvendo os alunos em múltiplas atividades, muitas vezes com o apoio de investigadores do Ensino Superior [1]. Como exemplo destas comemorações, apresentam-se questões das Provas Locais de Seleção de alunos dos escalões A (9.º ano) e B (11.º ano), candidatos às Olimpíadas Nacionais de Física, realizadas nos Salesianos de Lisboa, em Fevereiro de 2015, precisamente sobre a temática da luz. As provas envolveram uma parte introdutória, comum aos dois escalões, em que a relação da Física com as Artes é expressa a partir de referências da obra *A Fada Oriana* de Sophia de Mello Breyner Andresen [2]. Uma ligação recorrente dos assuntos tratados em Física com as Artes, para além de cativar muitos alunos, desenvolve certamente a criatividade, tão fundamental na carreira científica!

Pontes entre Ciência e Arte no Ensino

Costumo iniciar o estudo da Astronomia no 7.º ano, pedindo um trabalho simples aos alunos, sobre um astrónomo nascido no seu dia de aniversário. Como os físicos não são assim muitos, e os astrónomos ainda menos, alguns alunos têm de fazer um trabalho alternativo e apresentam uma imagem, do *site* da NASA, do dia em que nasceram. Este ano uma aluna apresentou a imagem *Illumen*, do astrofísico e artista Peter Wasilewsky, onde cristais de gelo são fotografados com filtros polarizadores da luz. A fotografia (Figura 1) logo foi pretexto para consolidar a introdução à composição da luz branca, para falar mais uma vez sobre o Ano Internacional da Luz, para explorar os *Polaroids do kit* Photonics Explorer,

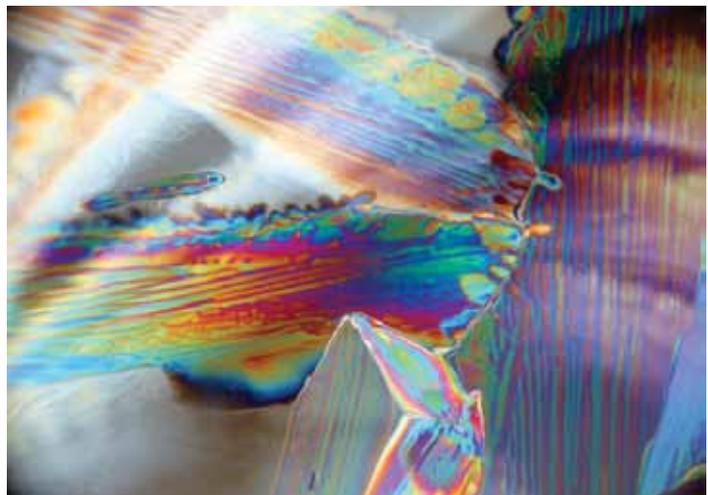


Fig. 1 - *Illumen* - Imagem artística de cristais de gelo de Peter Wasilewsky [4].

da EYEST (*Excite Youth for Engineering Science and Technology*) [3] e para valorizar a Arte feita a partir da Ciência!

Também nas sessões de preparação de alunos interessados nas Olimpíadas de Física, muitas vezes faço estas ligações entre as diversas artes e a Física. Acredito que tal ligação, ao desenvolver a criatividade e, até, o espírito crítico, permitirá aos alunos, para além de um enriquecimento cultural, uma melhoria no seu desempenho académico. Veja-se o caso de Ada Lovelace (1815-1852), a filha do escritor romântico Lord Byron, uma matemática famosa muito ligada às artes. De facto, para além de ter estado com Charles Babbage na construção do primeiro computador, dedicava-se à música e à escrita e era amiga de Charles Dickens (e do grande Faraday que, com a sua indução eletromagnética, permitiu a iluminação pública elétrica!). A importância desta personagem é tal que, considerada a primeira programadora, se celebra, sempre na segunda terça-feira de Outubro, o Dia de Ada Lovelace, um tributo ao importante papel das mulheres na Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática

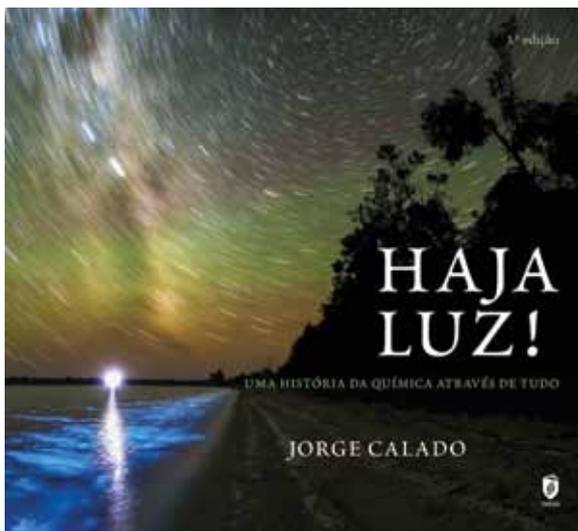


Fig. 2 - Capa de *Haja Luz*, de Jorge Calado [6].



Fig. 3 - Logotipo do *Ada Lovelace Day* [7].

(STEM no acrónimo inglês, STEAM se lhe acrescentamos o A das Artes, ao jeito de Jorge Calado, o autor do livro de História da Química, com incontáveis referências a físicos, *Haja Luz* [5]). Também no *kit* de Fotónica da EYEST é realçada a importância de despertar as alunas em especial para estas áreas mais tecnológicas, nomeadamente a computação quântica e toda a fotónica envolvida!

Seleção dos alunos para as Olimpíadas Nacionais de Física

Cabe às escolas o papel de escolher os três alunos participantes, em cada escalão, à etapa regional das Olimpíadas de Física, organizada pela Sociedade Portuguesa de Física (SPF). Em 2015, pela primeira vez, a SPF, disponibilizou uma Prova de Escola que alguns professores usaram na seleção local [8]. Como organizara no colégio sessões preparatórias com alunos interessados e já marcara as Provas de Seleção para uma data anterior, não suspendi as Provas Locais, até porque incluíam atividade experimental. De facto, como sempre defendem os responsáveis pela *Escola Quark!*, da Universidade de Coimbra, que prepara e seleciona posteriormente para as Olimpíadas Internacionais os alunos vencedores da Etapa Regional, é na componente experimental das Provas que os alunos apresentam maior dificuldade [9].

Assim, em Fevereiro de 2015, alguns alunos de 9.º e 11.º ano realizaram no colégio as Provas de que a seguir se apresentam algumas questões, envolvendo a temática da Poluição Luminosa, para a celebração do Ano Internacional da Luz. A escolha do tema teve a ver com a Oficina de Formação do NUCLIO – Núcleo Interativo de Astronomia que frequentava na altura, precisamente sobre Poluição Luminosa. Esta temática, já há muito explorada no continente Americano, tem vindo a ser mais divulgada pela comunidade dos astrónomos em Portugal, e existe até um *Manual da Poluição Luminosa*, editado pelo Centro Português de Iluminação [10]. Escolhi também extratos de textos de uma das nossas mais famosas poetisas – Sophia de Mello Breyner – por ser, na verdade, a minha escritora para a infância preferida. Aliás, também com os meus alunos de 8.º ano do ano transato, desenvolvi um trabalho “*Som e Luz*” na *Obra Poética de Sophia de Mello Breyner*, que apresentei no 25.º Encontro Ibérico do Ensino da Física, em Gijón [11].

Introdução à temática da Poluição Luminosa comum às Provas dos dois escalões

“... De dia e vista de perto a cidade era escura, feia e triste. Mas à noite a cidade brilhava cheia de luzes verdes, roxas, amarelas, azuis, vermelhas e lilases, como se nela houvesse uma festa. Parecia feita de opalas, de rubis, de brilhantes, de esmeraldas e de safiras...”

... No meio do grande Oceano há ilhas pequeninas com praias de areia branca e fina. Ali, nas noites de luar, tudo fica azul, parado e prateado...

... da caverna dos dois dragões e dos anéis de Saturno. O Poeta disse-lhe os seus versos, que eram claros e brilhantes como estrelas. Depois ficaram os dois calados enquanto a Lua subia no céu. Até que um sino trouxe de longe o som das doze badaladas da meia-noite e Oriana e o Poeta despediram-se...

... Um dia abandonou também o Poeta. Foi porque uma tarde o peixe lhe disse:

... Vista à luz do Sol és linda, mas de noite, vista à luz de uma chama, deves ser ainda mais bonita. E nessa noite Oriana, em vez de ir visitar o Poeta, encheu a margem do rio com pirlampos e fogos-fátuos e passou a noite a ver-se na água...

... Foi uma noite maravilhosa. Parecia uma festa extraordinária e fantástica no meio do silêncio e da escuridão da floresta. Os fogos-fátuos e os pirlampos eram iguais a estrelas...”

in *A Fada Oriana*, Sophia de Mello Breyner

Vista da Estação Espacial Internacional durante a noite, a Península Ibérica é muito bonita, tal qual a



Fig. 4 - A Península Ibérica à noite vista da ISS.

descrição poética de Sophia de Mello Breyner da cidade! Mas o *flash* luminoso que indica Madrid e Lisboa, para além de evidenciar excessivo consumo de energia elétrica local, perturba a observação astronômica noturna e a simples observação do brilho das estrelas que desencadeia tanta poesia... Mais,



Fig. 5 - Pirilampos na Floresta (foto de Yum Cyan).

o envio excessivo de luz para o espaço, só “benéfica” o espetáculo que observam os astronautas da ISS, prejudica a fauna e a flora e até a espécie humana. Alterando o ciclo circadiano, o excesso de luz artificial é fator de risco em certas doenças (aumento de níveis de stress, causa de certos cânceros), algumas espécies de pirilampos têm vindo a diminuir a sua população, algumas tartarugas-bebé

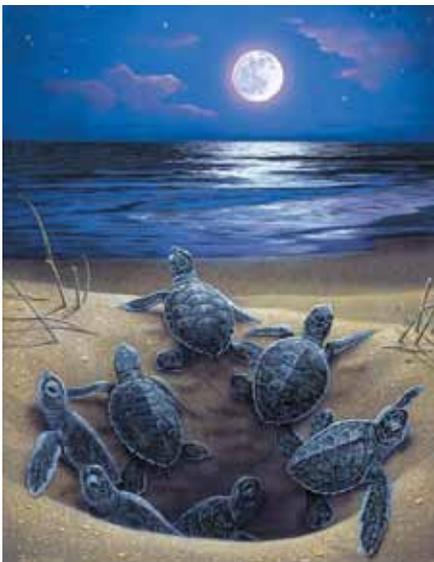


Fig. 6 - Tartarugas bebé.

desorientam-se e seguem a luz de candeeiros em terra, em vez do luar no mar, e muitos pássaros, encandeados, perdem a vida embatendo em edifícios. Uma grande parte da população mundial, graças à poluição luminosa, só consegue observar a Lua no céu noturno: feitos de pó de estrelas, nunca olham a maravilhosa Via Láctea!

Depois dos “velhos” astros, o fogo iluminou os Céus: a simples fogueira, primeiro, as velas depois, o gás dos candeeiros mais tarde (o mesmo gás, metano, dos fogos-fátuos naturais). Finalmente inventou-se a lâmpada: primeiro a de incandescência, depois a fluorescente e, mais tarde, os LED.

Algumas Questões da Prova do Escalão A - 9.º ano

Em cima da mesa tens uma pequena lâmpada de incandescência montada num circuito elétrico em paralelo com um reóstato:

1) Usando os dados da figura, faz um esquema do circuito montado.



2) A corrente elétrica produzida na pilha divide-se ao chegar à derivação: uma parte vai para o ramo do circuito que contém o reóstato, a restante para a lâmpada. Quer a lâmpada quer o reóstato têm uma resistência (oferecem oposição à passagem da corrente, neste caso, um movimento ordenado de eletrões através dos condutores elétricos). A corrente, I , mede-se em ampere, A, no amperímetro, ligado em série.

O reóstato tem uma resistência, R , que podes fazer variar, entre 1Ω e 20Ω , movendo o cursor. Nele, toda a energia elétrica se converte em calor por efeito de Joule.

A resistência da lâmpada muda consoante as condições a que é submetida, mas, as lâmpadas brilham tanto mais quanto maior a corrente que as atravessa! Nas lâmpadas, só cerca de 10 % da energia elétrica consumida é convertida em luz visível!

Varia a posição do cursor da resistência elétrica e mede o valor indicado pelo amperímetro. Regista na tabela os resultados obtidos:

Posição do cursor do reóstato	Corrente, I / A	Brilho da lâmpada (qualitativo)

3) O reóstato é um enrolamento de fio cujo comprimento afeto ao circuito se faz variar mexendo o cursor. Quando o reóstato apresenta o valor máximo de resistência o fio por onde passa a corrente é mais ou menos comprido? JUSTIFICA.

4) A figura seguinte ilustra um pássaro desenhado por Miguel Castelo Branco. É um pássaro-poesia, de cores quentes, incandescência...



Com base na experiência feita e sabendo que é a corrente a responsável pelos choques elétricos, explica por que razão poisam os pássaros com inocência nos fios de alta tensão e, atravessados por pouca corrente, continuam alegremente chilreando...

Acredita que com este trabalho celebraste dignamente 2015 - o Ano Internacional da LUZ e da LUZ CÔSMICA! Bem-hajas!

Algumas Questões da Prova do Escalão B - 11.º ano

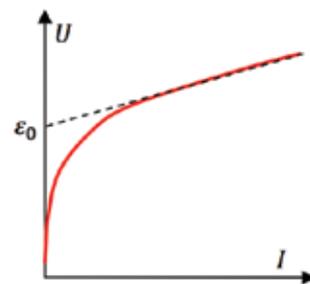
PARTE EXPERIMENTAL

Tal como as pedras preciosas da metáfora de Sophia de Mello Breyner devem a sua beleza às impurezas contidas nos minerais de que são feitas (um rubi é essencialmente óxido de alumínio, um pó branco bem “baratucho” quando puro, contaminado com crómio), os semicondutores de que são feitos os LED são dopados com impurezas diversas consoante a cor da luz que se quer que produzam!

Em cima da bancada dispões de uma lanterna LED, uma célula fotovoltaica, um multímetro, fios de ligação, tesoura, fita-cola (o material mais importante para um físico experimental!), cartolina preta, papel de alumínio e uma régua.

Faz um estudo do modo como a corrente elétrica (I) produzida pela célula varia com a distância da lâmpada à célula fotovoltaica (D).

- Regista os resultados experimentais obtidos.
- Esboça o gráfico $I = f(D)$ na folha de papel milimétrico.
- Analisa o gráfico e tira conclusões.



PARTE TEÓRICA

Os díodos emissores de luz, LED, são elementos passivos de um circuito, recetores, cuja curva característica é do tipo:

ϵ_0 é a força contraeletromotriz do LED.

- O que é a força contraelectromotriz de um recetor?
- O declive da reta do gráfico da figura corresponde a que grandeza? Justifica.

Os LED produzem luz à custa da conversão de energia elétrica em energia luminosa. Essa transformação é produzida em transições eletrónicas, pelo que pode, a partir de experiências com LED, determinar-se a constante de Planck, h .

A constante de Planck é prova que tal como a matéria é formada por partículas microscópicas discretas, os átomos, também os quanta de energia, fótons, são as partículas microscópicas que constituem a radiação eletromagnética! A energia de um fóton pode calcular-se através de $\Delta E = h \nu$, em que ν é a frequência da radiação eletromagnética.

Sabendo que o comprimento de onda de uma luz monocromática azul (os LED azuis deram Nobel em 2014!) é de cerca de 400 nm, justifica que a constante de Planck tenha um valor muito baixo.

...

3) Os pirilampos de Oriana emitem luz fria, produzida em reações químicas! As lâmpadas “antigas” de incandescência produzem luz à custa de radiação térmica. Os filamentos da lâmpada, por efeito de Joule, são muito aquecidos e, a elevadas temperaturas, irradiam no visível.

Calcula a energia elétrica consumida por uma antiga lâmpada de incandescência de 100 W, se estiver ligada 3 h.

Agradecimentos

O enunciado das Provas apresentado sofreu algumas alterações relativamente ao original por sugestão de Jorge Silva, Professor do Departamento de Física da Universidade Nova de Lisboa, a quem muito agradeço. Nomeadamente, em relação a questões que se prendem com as incertezas, erros ou resoluções de aparelhos, áreas mais ligadas à Metrologia [12] que ao trabalho dos físicos experi-

mentais. Esta área é muito difícil para os alunos e não está, do meu ponto de vista, bem explorada nos programas oficiais do Secundário de Física e Química, a ver também pelo que é exigido nas Olimpíadas Nacionais e Internacionais.

Agradeço ainda ao Carlos Azevedo, do Colégio Luso-Francês, que é certamente o Professor de Física que mais alunos tem levado às Olimpíadas Internacionais, pelo incentivo que me deu para publicar estas Provas. Desafio-o a partilhar com os colegas as suas metodologias tão proficuas. Finalmente, agradeço ao meu primo Minô, aluno do secundário, na Escola José Falcão, em Coimbra, a aguarela do pássaro da Prova do Básico.

A Luz do fogo é quente na pintura mas “fria” nas estrelas vermelhas que nos iluminam a noite! Há luz nas escolas!



Teresa Paiva licenciou-se em Química – Ramo Educacional, em 1987, na Fac. Ciências e Tecnologia da Univ. Coimbra e fez a parte curricular do primeiro Mestrado em Física para o Ensino, na Fac. Ciências da Univ. Lisboa, ainda no séc. XX. Ensinou Física e Química na Escola Pública (Infanta D. Maria, Coimbra;

Gil Vicente, Lisboa e Reynaldo dos Santos, Vila Franca de Xira) até 2007, altura em que passou a lecionar nos Salesianos de Lisboa. Enquanto Professora do Quadro da Escola Pública, coordenou diversos Projetos, Nónio, Ciência Viva, entre outros. Sempre envolveu os alunos em atividades fora de portas, como as Olimpíadas e ultimamente tem apresentado trabalhos, com alunos e ex-alunos, em Encontros de Professores.

Referências

1. Site do Ano Internacional da Luz – Portugal: Atividades e Haja Luz nas Escolas. <http://ail2015.org/>
2. Sophia M. B. Andresen, *A Fada Oriana*, Porto Editora (2012)
3. Site da EYEST - O kit Photonics Explorer. <http://www.eyest.eu/Programs/Photonics-Explorer>
4. P. Wasilewsky, “Illumen” (<http://go.nasa.gov/1T6a203>)
5. J. Calado, *Haja Luz*, IST Press, Lisboa (2011)
6. Fonte: <http://bit.ly/1Sfl6a5>
7. Site institucional das comemorações do Ada Lovelace Day. <http://findingada.com/about/our-mission/>
8. Provas de Escola das Olimpíadas de Física, SPF, 2015 – escalões A e B. <http://bit.ly/1L2quMl> – <http://bit.ly/1Qq4kUi>
9. J. A. Paixão, F. Oliveira, “Estudo sobre o modelo das atividades experimentais olímpicas de Física no contexto das escolas secundárias de Portugal”, *Libro de Resúmenes de la XXXV Reunión Bienal de la RSEF y del 25º Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física*, Real Sociedad Española de Física, Gijón (Jul. 2015).
10. Referência ao Manual no site Dark Sky Rangers do NUCLIO. <http://bit.ly/1UwwfUe>
11. T. Paiva, I - STEAM - Trabalho de Professora com alunos e ex-alunos, Ligação da Obra de Sophia de Mello Breyner Andresen a temas de Física - *Libro de Resúmenes de la XXXV Reunión Bienal de la RSEF y del 25º Encuentro Ibérico de Enseñanza de la Física*, Real Sociedad Española de Física, Gijón (Jul. 2015).
12. *Vocabulário Internacional de Metrologia VIM*, IPQ, 1.ª Edição (2012). http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Documents/VIM_IPQ_INMETRO_2012.pdf

Fontes das imagens

- Figura 4: <http://go.nasa.gov/1mcE9ym> - <http://bit.ly/1jzsl5> - <http://bit.ly/1VOHgyR>
- Prova 9.º ano: <http://bit.ly/1RjcHgR>
- Prova 11.º ano: <http://bit.ly/1XXZLCi>

Energia e Sustentabilidade

Aprender com criatividade no 1.º CEB

Lucília M. Santos¹, Cristina M. Sá²

¹ Dep. Física e CDITFF, Universidade de Aveiro, Campus de Santiago, Aveiro

² Agrupamento de Escolas do Castelo da Maia, Rua Prof. Idalina Santos Quelhas, Castelo da Maia

lucilia.santos@ua.pt; fsa.cristina@gmail.com

Resumo

O ponto de partida deste estudo para a implementação de atividades práticas no 1.º Ciclo do Ensino Básico foi o ensino e aprendizagem de temas relacionados com sustentabilidade, energia e preservação do ambiente. Parte-se da assunção que a importância da educação centrada na educação em ciência e no ensino experimental de ciências, nos anos iniciais de escolaridade, é fundamental numa escola que pretende ser atual. O grupo participante foi uma turma especial não só por integrar alunos dos quatro anos de escolaridade, mas por alguns manifestarem dificuldades de aprendizagem. A proposta, baseada em atividades práticas, teve como objetivos: (i) reconhecer o Sol como fonte de energia renovável e (ii) refletir nas razões para poupar energia. A análise efetuada sobre os dados recolhidos permitiu concluir que estas atividades promovem o interesse pela ciência de forma criativa, possibilitam a interdisciplinaridade e fomentam atitudes e valores de respeito sobre o ambiente.

Introdução

Vivemos num mundo cada vez mais ameaçado, onde as condições de vida estão comprometidas. O aumento populacional, sobretudo nos países subdesenvolvidos, promove a procura de energia, utilizando recursos baratos e rápidos, que são altamente poluentes. O tema “energia” lidera as preocupações mundiais devido às implicações sociais, culturais, económicas, políticas e ambientais. Neste contexto, assumimos o compromisso de promover práticas educativas que conduzam à formação de cidadãos interventivos, capazes de contribuir para um mundo melhor. Como outros autores [1], acreditamos que a educação em ciência deve começar nos primeiros anos de escolaridade, com uma abordagem de trabalho prático de tipo investigativo, permitindo identificar soluções para a resolução de problemas que possam ocorrer no dia a dia dos alunos. A questão principal que norteou este estudo [2] foi: como trabalhar

este tema, relacionando-o com o ambiente, numa perspetiva de sustentabilidade, e como desenhar, desenvolver, adaptar e implementar atividades relacionadas com a energia, num contexto CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente), no 1.º Ciclo do Ensino Básico.

Implementação das atividades

As atividades foram apresentadas aos alunos em plenário, com o título *Energia e sustentabilidade* sendo-lhes explicado como se iria proceder, o que era esperado que aprendessem e que seria seguida uma metodologia de trabalho de grupo, pelo facto de esta promover a interatividade, a troca de ideias e o respeito pelas ideias dos outros [3,4]. Foi providenciado um guia do professor e cada passo da atividade foi registado no diário do investigador. A avaliação consistiu na análise dos dados recolhidos através de um questionário aplicado em situação de pré e pós implementação das atividades e dos registos de observação realizados pelo professor.

Desenvolvimento das atividades

Problema a resolver: Para proteger o ambiente, devemos utilizar mais energias renováveis. Como poderemos usar a energia solar?

Os alunos leram a história “Vamos fazer um piquenique?” e o diálogo exploratório associado constituiu-se como motivação para a atividade a realizar. Partindo do Dia Mundial do Ambiente, o professor conduziu o diálogo para a realização de um piquenique. Logo se colocou a questão sobre como cozinhar a refeição, aproveitando para debater a questão das fogueiras, incêndios, a poluição, o dióxido de carbono e o aquecimento global, bem como os conceitos de calor, energia, eletricidade, fontes e formas de energia. Após o diálogo, cada aluno

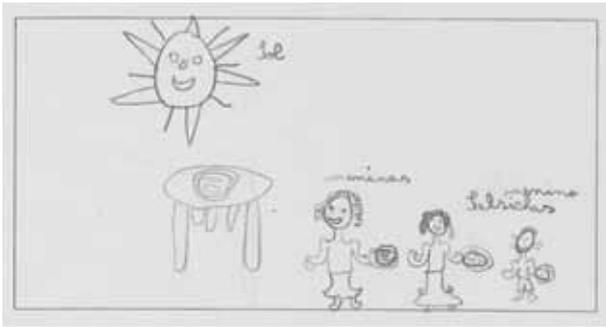


Fig. 1 - Registo de aluno do 1º ano

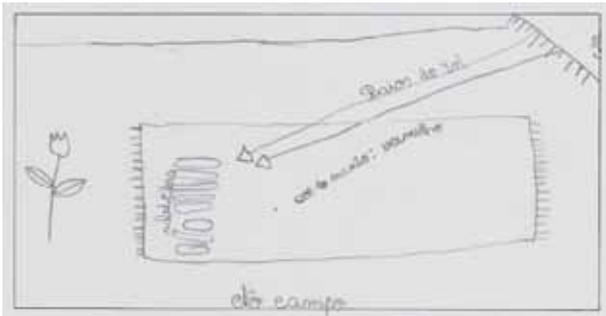


Fig. 2 - Registo de aluno do 4º ano

desenhou a sua ideia sobre a melhor forma de assar salsichas – a ementa escolhida para o piquenique –, sem recorrer a fogo ou chamas. Podem ver-se alguns exemplos nas Figuras 1 e 2.

Os alunos chegaram à conclusão de que o melhor seria construir um dispositivo para assar as salsichas, utilizando o Sol. O professor providenciou um plano para a estrutura de suporte ao assador – caixa de sapatos – e pediu a cada grupo que escolhesse qual o material e a cor (de acordo com os existentes na escola) que seria melhor para o processo. Após a discussão, cada grupo preencheu o plano de investigação, registando a questão/pro-

blema, as variáveis e os materiais que iriam precisar. Todos os grupos chegaram à conclusão que, para a experiência ser rigorosa, teriam que enumerar e registar as variáveis dependentes, independentes e de controle.

A seguir, colocou-se a questão de como determinar qual seria o melhor assador. Após debate concluíram que seria o que demorasse menos tempo para assar a salsicha, colocando-se então a necessidade de medir a temperatura e o tempo necessário para a assar. Após o preenchimento de uma ficha com o registo das ideias prévias de cada grupo, sobre os resultados a alcançar, deslocaram-se para o espaço exterior e colocaram os assadores de modo a ficarem virados para o Sol (Figura 3).

Os alunos registaram a temperatura e a hora a que efetuaram as medições, utilizando o relógio da sala e um termómetro de infravermelhos. Repararam que a posição da Terra relativamente ao Sol muda à medida que o tempo passa. Ao observarem as salsichas, verificaram e registaram que o seu aspeto se ia modificando, ficando mais rugoso e escuro. Após a recolha de dados, elaboraram gráficos e compararam as ideias iniciais com as observações efetuadas. Concluíram que o melhor material para utilizar a luz solar, para este fim, é o espelho.

Conclusão

A realização de atividades contextualizadas de acordo com as vivências diárias dos alunos permite a construção de “pequenas ideias” que se relacionam com outros eventos e situações, gerando “grandes ideias”. Assim, relacionar ideias provenientes de diferentes experiências potencia a construção de conhecimento novo por parte das crianças implicadas nas atividades práticas. Por outro lado, a realização de atividades práticas com recurso aos processos científicos permite aproximar os alunos da atividade e cultura científica. Com este estudo, pode concluir-se que o ensino experimental de ciências é uma opção fácil de implementar, com recurso a materiais simples e económicos, e que permite motivar os alunos para a aprendizagem de conteúdos de



Fig. 3 - Assadores dos grupos GA e GC, respetivamente da esquerda para a direita.

várias disciplinas. No caso apresentado, a Matemática, o Português e as Expressões Plásticas aparecem contextualizadas de forma global e decorrem da situação problemática inicial.

Referências

1. A. Cachapuz, J. Praia, M. Jorge, *Ciência, Educação em Ciência e Ensino das Ciências* Ministério de Educação, Lisboa (2002).
2. C. Sá, *Energia e Sustentabilidade: atividades para varios níveis no 1º CEB*, Universidade de Aveiro, Aveiro (2007).
3. F. J. Palacios, P. C. León, *Didáctica de las ciencias experimentales*, Editorial Marfil, S. A., Alcoy (2000).
4. M. Scoullou, V. Malotidi, *Handbook on Methods used in Environmental Education and Education for Sustainable Development*, MIO-ECSDE, Atenas (2004).



Lucília Tavares dos Santos,

doutorada em Física da Matéria Condensada pela Universidade de Aveiro, é Professora Associada do Departamento de Física da mesma universidade e desempenha funções executivas na Uinfoc e na UNAVE. É membro doutorado do Centro de Investigação “Didática e Tecnologia na Formação de Formadores”, CIDTFF, e integra o *Steering Committee* da *European Universities for Continuing Education Network*, EUCEN.



Cristina Maria Sá,

mestre em Educação em Ciência e doutora em Formação e Didática, ramo de Desenvolvimento Curricular, da Universidade de Aveiro é professora do 1º Ciclo do Ensino Básico. Atualmente exerce funções de assessora do Diretor do Agrupamento de Escola do Castelo da Maia. Tem publicado alguns artigos e participado em vários congressos e conferências nacionais e internacionais.

Livros



Histórias da Física em Portugal no Século XX

Teresa Peña e Gonçalo Figueira (eds.)

Gradiva, 2016

464 páginas

ISBN: 978-989-616-686-1

Que legado nos deixaram os físicos portugueses do século XX? Para responder a esta questão, neste volume compilam-se histórias escritas por actores e testemunhas muito diferentes, sobre várias peripécias do século XX da física em Portugal. Foram 100 anos de um crescimento nem sempre fácil, dentro e fora das universidades, navegando entre ventos e marés políticas e económicas diversas. Todavia, na teia quotidiana de conflitos e interesses a muitos níveis, foi possível criar e amadurecer instituições especialmente dedicadas à investigação e desenvolver em Portugal a física num enquadramento internacional. Foi possível mesmo um crescimento notável e contrariar o grande hiato com a ciência internacional. O que aconteceu foi de facto um pequeno *Big Bang* de físicos e da sua produção científica. Através das histórias deste livro, faz-se a viagem ao tempo desse *Big Bang* humano.

Os editores são respectivamente a anterior directora da *Gazeta de Física* e anterior presidente da SPF, Teresa Peña, e o actual director da revista, Gonçalo Figueira.



Uma Biografia da Luz, ou a Triste História do Fotão Cansado

José Tito Mendonça

Gradiva, 2015

272 páginas

ISBN: 978-989-616-647-7

Este ensaio sobre a natureza e as propriedades da luz enquadra-se na perfeição no Ano Internacional da Luz, celebrado em 2015, divulgando o conhecimento sobre este tema fundamental e apaixonante

da física. Podendo ser lido por um público não especializado, interessa também aos especialistas.

O autor, professor e investigador de mérito reconhecido, inclui testemunhos sobre a ciência e a vida, bem como episódios pessoais da sua actividade científica. «A luz é um dos grandes mistérios, perseguido tanto por pintores como por físicos. Mas também os insectos e os místicos são atraídos por ela», escreve José Tito Mendonça.

O tema da luz é aqui explorado com recurso a histórias e a exemplos para abordar os conceitos. A luz desempenha um papel vital no quotidiano das pessoas e das empresas, sendo, por isso, um tema de interesse geral.



Manual da Poluição Luminosa – Atuações para o seu controlo/redução

Luís Duarte, Guilherme de Almeida e Alberto Vanzeller (Grupo de Trabalho do Centro Português da Iluminação, para o Manual da Poluição Luminosa)

Centro Português de Iluminação (2014)

46 páginas

<http://www.cpi-luz.pt>

O crescimento das sociedades e a sua concentração em cidades tem originado várias formas de poluição. A poluição luminosa é consequência da incorrecta utilização da luz que se perde contaminando o ambiente envolvente.

A origem da poluição luminosa é identificada na iluminação monumental, nos outdoors e publicidade, nos equipamentos desportivos, na iluminação viária, devido a equipamentos mal projectados, incorrectamente instalados, com potências inadequadas para o objecto a iluminar.

O Manual apresenta as consequências da poluição luminosa no esplendor do céu e a forma de as medir, assim como os efeitos nefastos desta poluição para a saúde e para os ecossistemas.

Salienta ainda o desperdício de mais de 30 % da energia consumida, que é dispersa, reflectida ou emitida inutilmente para o hemisfério superior.

São sugeridos objectivos para os projectistas, decisores, fabricantes, legisladores e todos os que se preocupam com o ambiente, no sentido da adoção de posturas não poluentes e eficientes na iluminação exterior.

Poemas

Patrícia Santos

9.º B - Escola Básica D. Pedro Varela, Agrupamento de Escolas do Montijo

A luz

A luz que incide
nem tão calorosa, nem tão fria
é proveniente da alvorada
do nascer de um glorioso dia.

Esta omnipresente
é a luz da salvação
que tem como único sustento
aquecer a tua vida
sem ser em vão.

Onde a poderei encontrar?
é uma questão frequente
então pensa bem
e a resposta será eminente.

E se a tua luz
pretendes encontrar
abre bem os olhos
pois é nos teus amigos
que ela se irá revelar.

Astro Sol

Um astro glacial
por meio da eternidade
exerce sobre o mar
a sua soberba vontade.

Mar este
cuja frieza
é uma intempérie
da natureza.

Mar este
que até parece
que em um quadro
foi pintado.

Iluminada
por um astro superior
a nossa deusa da noite
lhe suplica
um trivial favor.

Astro Sol
que no dia governa

auxiliai com pudor
a vossa subalterna.

Deusa Lua
e astro Sol
que em conjunto talharão
o manso mar em colisão.

As vagas arabescas
de águas tempestuosas
são fruto do empenho
de exaustivas horas.
A sua atração irresistível
torna a bravura marítima possível.

Repousa
uma fração de tempo
pois hoje não desejamos
um mar turbulento.

Mas sim
um que no seu alento
nos deixe escutar
a sublime brisa do vento.

Por nós
poderás então descansar
para que
através da tua beleza
nos consigamos inspirar.

Aurora boreal

Uma aurora boreal
Deveras deslumbrante
Cega-nos com a sua beleza radiante
Incorporada num mundo distante
Cuja tão vasta extensão
Nos inquieta tanto a alma
Como o coração

De longe a sua plenitude
Nos alcança intensamente
Criando um espetáculo luminoso
incandescente
Que perdurará até aos confins de um
mundo incrédulo

Luz e Desaparição

Gonçalo M. Tavares

<http://goncalomtavares.blogspot.com>

Para onde vai a luz quando se apaga? A própria pergunta pressupõe uma caminhada, uma coisa que deixa de ser coisa porque tem intenção, vontade; dirige-se não é dirigida.

Várias hipóteses de formas ou percursos do desaparecimento da luz.

1. **Queda** – a luz desaparece porque cai. Isto é, dirige-se para o chão a grande velocidade; queda: movimento não controlado em direcção ao chão.
2. **Descida** – como quem desce degraus; controla por completo o ritmo, a velocidade. No limite: alguém que pode voltar atrás: descia, mas agora subo. Descida: movimento controlado em direcção ao chão, ao baixo. Estou cada vez mais perto do fundo mas é para o fundo que quero ir. Digamos que a descida é uma queda consciente, uma queda a que se tirou velocidade; quando desço mando mais no corpo que o mundo, quando caio manda mais o mundo.

Entre as possibilidades 1. e 2. a opção é clara: a luz (para já, a artificial) não domina o seu desaparecimento. Se desaparece em direcção ao solo ou ao fundo, só o fará por **queda**.

Então para a pergunta: para onde vai a luz quando se apaga?, eis a 1.^a resposta possível: *a luz vai para o fundo, caindo*.

Mas poderemos pôr ainda a hipótese (mantendo o eixo, e no sentido oposto): *a luz desaparece por cima*. Vai para cima. E à palavra fundo poderemos contrapor a palavra céu.

No entanto, um e outro limite produzem consequências bem distintas. Sentimos o ruído de um corpo a bater no fundo, mesmo que esse corpo seja a luz. Enquanto, pelo contrário, é difícil conceber o ruído de algo que bate no céu. Concebemos assim uma parte baixa do mundo com um limite concreto; vemos nele matéria que se opõe, que se torna

um obstáculo à continuação de um movimento: daqui não podes descer mais, *chegaste ao fundo*. Porém, lá para cima, por respeito ou ignorância, a miopia aumenta. Não concebemos um limite concreto, material, que diga a algo em ascensão: *daqui não passas, chegaste ao limite do céu*. Mesmo que a ciência nos discursse ou segrede fórmulas e explicações para um homem vivo a percepção é esta: o baixo tem chão, tem solo, o alto não; não há tecto. O movimento para baixo tem um fim, o movimento para cima, não. Como se, exploradores, tivéssemos explorado já, por inteiro, o caminho que vai do sítio onde estamos vivos até ao fundo do mundo; o caminho inverso, esse, ainda está como que a meio. Já tocámos o fundo do chão – já o sentimos: dói; mas nunca tocámos o topo do céu: ainda não sentimos essa dor. (E que dor será essa? Ou poderemos pensar em prazer? O choque do corpo que bate no topo do céu.) Atentemos ainda noutra hipótese.

3. **Ascensão** - a luz desaparece dirigindo-se para cima, e é nesse movimento (de subida jamais terminada) que é surpreendida com um chamado para regressar.

Aqui a ascensão corresponderá à descida de que anteriormente falámos.

Não falamos em sensação de queda em direcção ao céu precisamente porque não há sensação de tecto. Digamos que na ascensão há sempre uma percepção mínima de que controlamos o nosso movimento, mesmo que sendo puxados.

Imaginemos, por exemplo, um homem que subitamente é puxado para cima à mesma velocidade e à mesma variação de velocidade de um outro homem que cai. Pois bem, por instinto do pensamento diremos que a sensação de uma queda que cai será sempre mais temível que a sensação de uma queda que sobe.

Mas será mesmo? A queda que sobe, continuemos a utilizar esta expressão, sendo interminável, isto é, sem tempo, poderá afinal ser mais angustiante. Na queda que cai há um final, há um tempo que reconhecemos; na queda que sobe,

ao invés, o tempo já não tem um rosto humano, entraríamos num tempo monstruoso; talvez próximo de um aspecto que Deleuze associa à indiferença: “o nada negro, o animal indeterminado em que tudo é dissolvido”. Na queda que cai, morremos; na queda que sobe, provavelmente, desapareceremos dissolvidos numa coisa mais ampla.

Para onde vai a luz quando se apaga? 2.^a resposta possível: *a luz sobe, dissolvendo-se*. Ou: *a luz vai para o céu, dissolvendo-se*. Ou ainda: *dissolvendo-se, a luz vai para o céu*.

Mas para além do movimento ascendente ou descendente a luz poderá desaparecer de duas maneiras:

1. **por implosão**
2. **por explosão**

1. a luz pode desaparecer por **implosão** se num único instante se concentrar num ponto de tal modo mínimo que esse ponto deixe de ser ponto e passe a ser nada. O desaparecimento da luz por implosão é a sua concentração súbita no nada
2. a luz pode desaparecer por meio de uma **explosão** – explosão de tal forma intensa que faça com que cada uma das partículas originais, num único instante, se afaste de tal modo do ponto de origem que depois nada no espaço original guarde memória do que antes ali estava.

O desaparecimento por implosão transmite uma sensação de maior controlo, o sítio para onde a coisa vai (neste caso, a luz) é um sítio determinado geograficamente, é localizável. O desaparecimento por explosão, ao contrário, transmite a sensação de falta de controlo, a sensação de que será difícil voltar a localizar cada um dos fragmentos que resultaram da explosão.

Parece, à primeira vista, mais fácil recuperar a luz que implodiu do que a luz que explodiu.

Tal como parece mais fácil, aliás, recuperar a luz que caiu em direcção ao fundo do que a que subiu em direcção ao céu.

Estamos pois face a uma decisão importante que passa pelo cruzamento de quatro, chamemos-lhe assim, movimentos, ou formas de desaparecer: **queda, ascensão, implosão, explosão**.

Se considerarmos que mandamos na luz, isto é, que a controlamos, que sabemos para onde vai quando desaparece; se temos a certeza onde ela se esconde e por isso sentimos que a podemos, a qualquer momento, voltar a chamar, então o apropriado é considerarmos o movimento de desaparecimento da luz como uma **queda implosiva**: *a luz cai toda para um ponto, desaparecendo*. Se a quiser de novo, só terei de ir, a esse ponto, buscá-la.

Se considerarmos que não mandamos na luz, que a luz é uma entidade autónoma, incontrolável, então o cruzamento apropriado é aquele que considera o movimento de desaparecimento da luz como uma **ascensão explosiva**; a luz sobe ao mesmo tempo em direcção a uma infinidade de pontos, desaparecendo. Como a recuperar? Como fazer aparecer, à nossa ordem, o que desapareceu numa infinidade de sítios dos quais não temos mapa? Eis a luz indócil, a luz que não é objecto dos humanos.

Conhecemos duas luzes: a luz feita pelo homem (artificial) e a luz que não é feita pelo homem (natural). Respondendo de modo concreto e assertivo à questão que nos obrigou a escrever – para onde vai a luz quando se apaga? — eu diria que a luz feita pelo homem, por uma queda implosiva, cai para um ponto único; e que a luz que não é feita pelo homem, por uma ascensão explosiva, sobe em direcção a uma infinidade de pontos do céu. E assim duas luzes desaparecem.

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



Gonçalo M. Tavares, escritor português, nasceu em 1970. Os seus livros deram origem, em diferentes países, a peças de teatro, peças radiofónicas, curtas metragens e objectos de artes plásticas, vídeos de arte, ópera, performances, projectos de arquitectura, teses académicas, etc. Estão em curso cerca de 290 traduções em trinta e cinco línguas, com edição em quarenta e seis países. É um autor vastamente reconhecido em Portugal e no estrangeiro, tendo os seus livros recebido alguns dos mais importantes prémios literários nacionais e internacionais.