

# 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



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

INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
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.

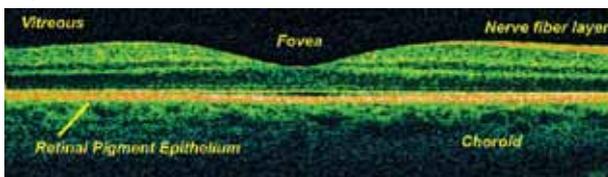


Fig. 4 - Tomografia de coerência óptica (ou OCT, de *Optical Coherence Tomography*). Um corte 2D na retina, beneficiando da coerência parcial da luz e de interferências, e com fortes semelhanças com a imagem ecográfica, com base em ultra-sons.

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  $\chi$  a susceptibilidade dieléctrica) deixa de ser adequada e devem-se considerar termos de 2.<sup>a</sup>, 3.<sup>a</sup>, ..., 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.<sup>a</sup> 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.

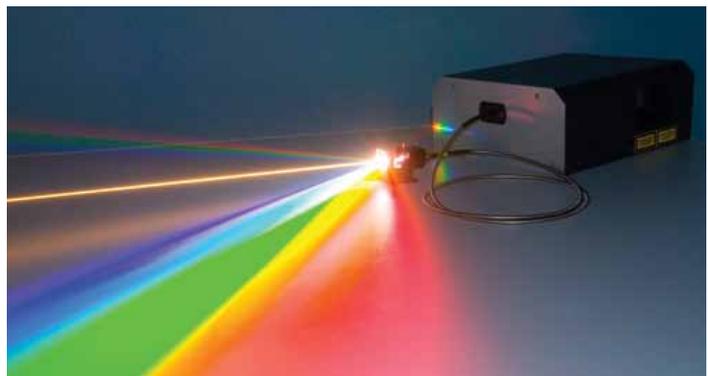


Fig. 5 - Dispersão típica de um feixe de um laser de Ti:Safira, (de femto-segundos), com geração de supercontínuo.

## 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

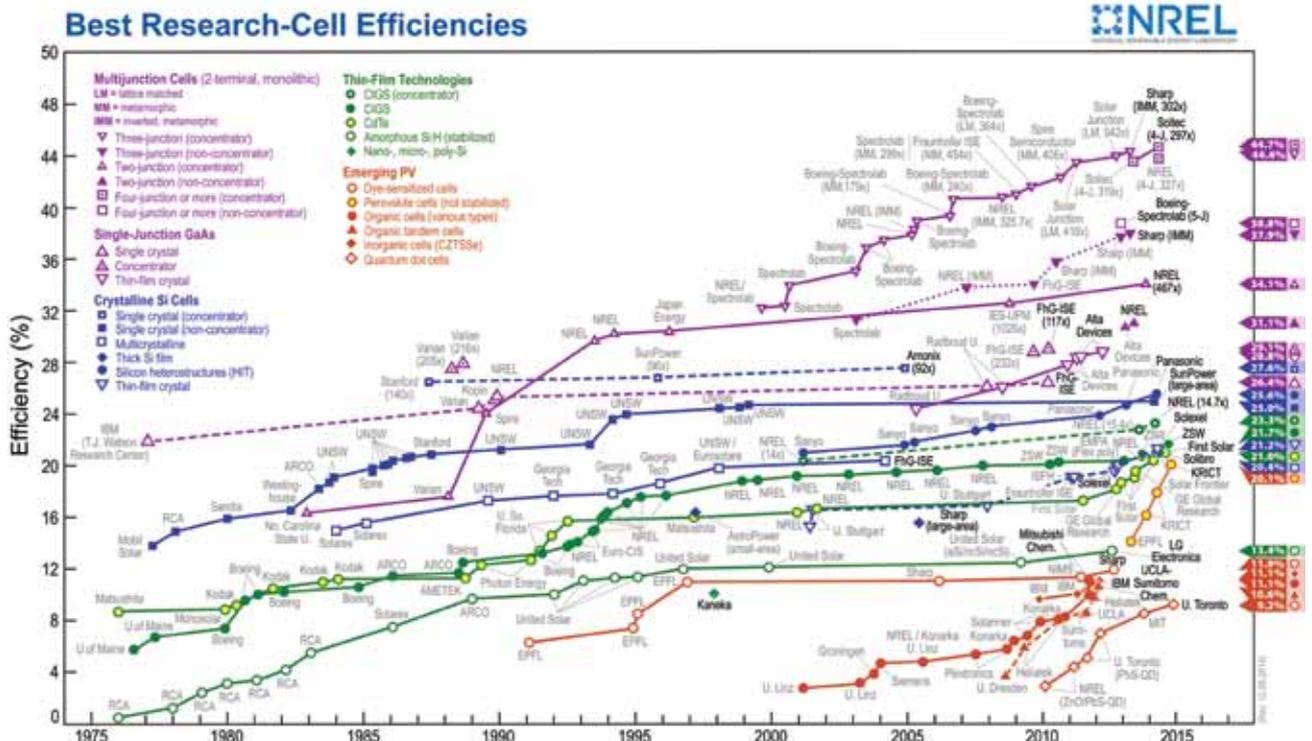


Fig. 7 - Evolução da eficiência das células fotovoltaicas ao longo do tempo.

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.<sup>a</sup> 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

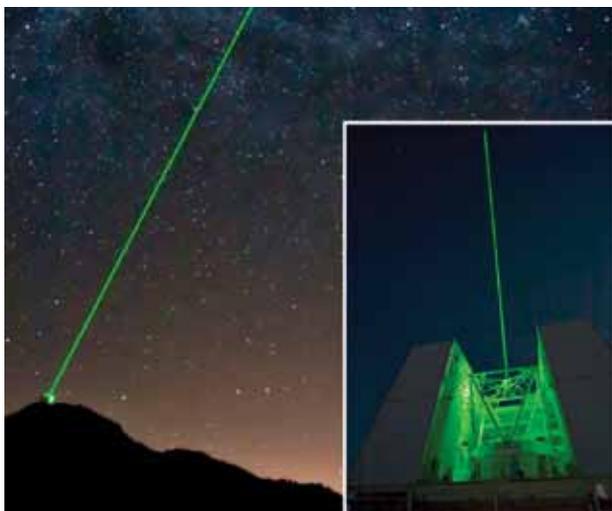


Fig. 8 - Óptica Adaptativa: lasers em telescópios no solo permitem criar estrelas sintéticas na atmosfera a cerca de 100 km.



Fig. 9 - Manto de invisibilidade de Harry Potter.

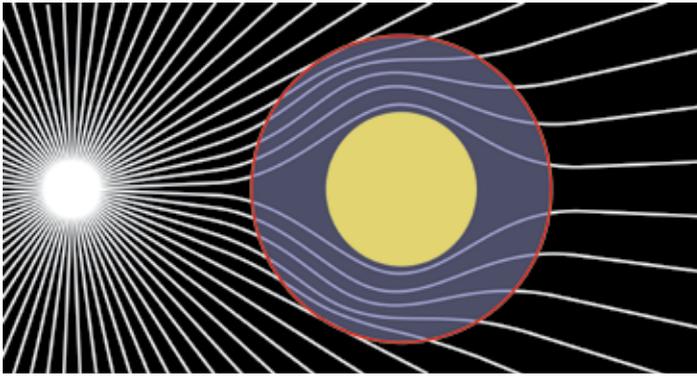


Fig. 10 - Como tornar um objecto invisível através de um revestimento que difracte a luz convenientemente.

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-

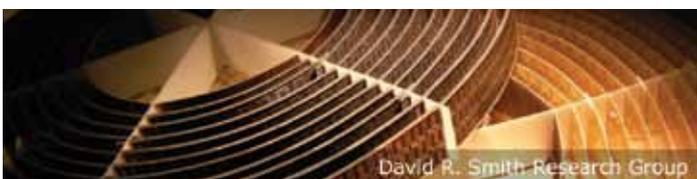


Fig. 11 - Metamateriais feitos para grandes comprimentos de onda.



Fig. 12 - Caracterização electromagnética de materiais, espaço ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ).

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 permitividade 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!

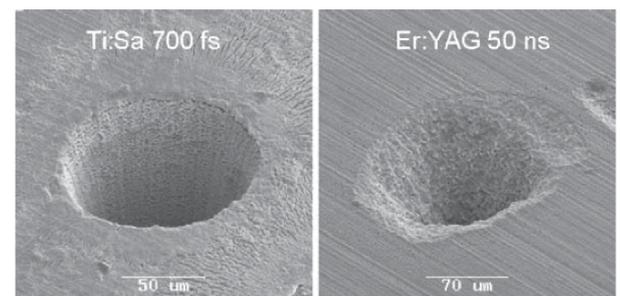


Fig. 13 - Compare-se a furação laser, no infravermelho, em dois regimes distintos (térmico, à direita).

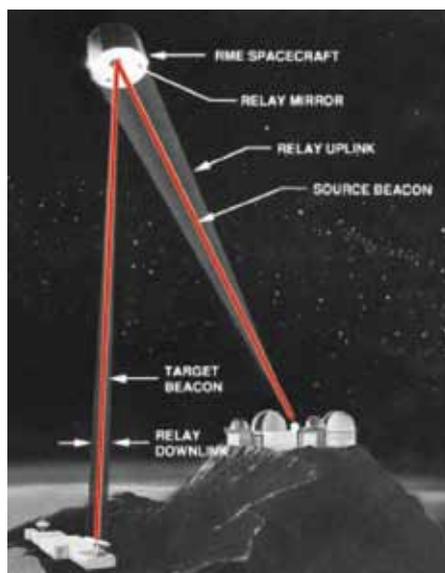


Fig. 14 - *Relay Mirror Experiment* (RME, 1990): um dos demonstradores da Iniciativa de Defesa Estratégica americana para fazer incidir um feixe laser em qualquer alvo, no espaço ou na terra, utilizando reflectores espaciais em órbita. No essencial, os conceitos e as tecnologias necessárias foram desenvolvidas.

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](http://www.fromquarkstoquasars.com)
- Fig. 4 - [http://www.wikiwand.com/nl/Optische\\_coherentietomografie](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.