

A Física é a Ciência que estuda os fenómenos naturais em todas as escalas. Apesar da infinidade de fenómenos, estão-lhe subjacentes apenas quatro forças: a gravítica, a electromagnética, a fraca, e a forte. A força electromagnética é a mais relevante para a compreensão da esmagadora maioria dos fenómenos do nosso dia-a-dia. Numa síntese de grande beleza, Maxwell mostrou que o electromagnetismo se resume a quatro “frases”, que muito impressionaram Einstein.

JOÃO PAULO SILVA

Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

R. Conselheiro Emídio Navarro, 1

jpsilva@deec.isel.ipl.pt

# AS FORÇAS DA A IMPORTÂNCIA SIMPLICIDADE DA ELECTROMAGN

A Física é a única Ciência que estuda a Natureza em todas as escalas. Desde as ínfimas dimensões dos electrões e dos quarks, passando pelas escalas dos núcleos, dos átomos, das pequenas moléculas como a de água, das macromoléculas da vida (ADN), das nossas células, do nosso corpo, da Terra e do seu movimento no sistema solar e deste na nossa galáxia, até às enormes escalas do Universo como um todo. Estas estruturas e todos os fenómenos que lhes estão associados caem no âmbito da Física.

Talvez a maior realização do espírito humano tenha sido o entendimento de que por detrás desta infinidade de fenómenos estão quatro, e apenas quatro, forças: as forças gravítica, electromagnética, forte e fraca.

A força gravítica é a mais relevante à escala da Terra e a escalas superiores [1]. A força electromagnética domina à escala da Terra (campo magnético terrestre e relâmpagos, por exemplo) e em todas as escalas inferiores. Em particular, é a força que regula quase todos os processos físicos, químicos e biológicos que constituem a nossa vida. Esta força é também extremamente importante para conhecermos o que se passa no Universo, pois essa informação só nos é acessível através da radiação electromagnética que de lá recebemos. Ao abranger todas as escalas, quer pela fenomenologia a que dá origem, quer como meio de observação, esta é verdadeiramente a “mãe de todas as forças”.

É a força electromagnética que está subjacente à interacção entre as moléculas de água, à ligação de um átomo de oxigénio com dois de hidrogénio para formar a molécula de água ou à ligação entre o núcleo do átomo de oxigénio e os oito electrões que se movimentam à sua volta. Mas é também a

# NATUREZA: A, BELEZA E DA FORÇA NÉTICA

força electromagnética que nos coloca perante um aparente paradoxo no núcleo atómico. Com efeito, o núcleo do oxigénio é constituído por oito protões (partículas cerca de 1836 vezes mais pesadas do que o electrão, mas com carga oposta) e vários neutrões (partículas semelhantes aos protões mas sem carga eléctrica). Ora, estes protões estão confinados num espaço da escala de 0,000 000 000 000 001 metros! E, como têm a mesma carga, sofrem uma enorme repulsão eléctrica. Como se explica então que o núcleo seja estável? A única explicação reside na existência de uma outra força, atractiva, mais forte do que a força electromagnética, que compense a repulsão causada por esta e mantenha os protões unidos. Com alguma falta de imaginação (mas justificadamente) os físicos denominaram-na “força forte” [2].

Na Natureza, os núcleos de oxigénio podem ter diferentes números de neutrões: 8 (com uma abundância aproximada de 99,76%), 9 (0,04%) ou 10 (0,20%). Será que podemos criar um núcleo de oxigénio com 11 neutrões? A resposta é afirmativa, mas este núcleo “morrerá” passados cerca de 26,9 segundos, dando origem a um núcleo de flúor, a um electrão e a um antineutrino. Este processo pode ser descrito a nível microscópico como

neutrão  $\rightarrow$  protão + electrão + antineutrino.

Para o explicar, foi necessário introduzir uma nova força, mais fraca do que a força electromagnética, denominada “força fraca”. Assim, as forças forte e fraca são relevantes às escalas sub-nucleares.

Conhecemos hoje as partículas elementares sobre as quais as forças fundamentais actuam [3]. E temos também uma

teoria de campos, quântica e relativista que explica detalhadamente o modo como actuam as forças electromagnética, forte e fraca: é o chamado “modelo *standard*”. A construção teórica e experimental deste modelo é de longe o assunto que mais prémios Nobel arrecadou. Destaquemos algumas questões deste longo processo:

1- Para cada partícula de matéria existe uma antipartícula que lhe é quase igual, excepto pelo facto de a sua carga (e outros números quânticos) ser a simétrica.

2- A antipartícula do electrão (o positrão) foi “inventada” como resultado de uma equação desenvolvida por Dirac para explicar o comportamento do electrão. Isto vem mostrar o poder das equações como formas estruturadas de pensar. Tudo o que está expresso numa equação pode ser dito por palavras. Mas, ao contrário das frases normais, que podem ser alteradas de qualquer forma, sem nexos, as equações estruturam as nossas palavras e impedem-nos de dizer disparates. Até nos permitem prever novas partículas! Só um ano após a sua “invenção” foi possível descobrir o positrão nos raios cósmicos.

3- No Universo existe um excesso de matéria sobre anti-matéria. Se algum dos leitores demonstrar ter a explicação correcta para este fenómeno, merecerá um bilhete para Estocolmo para recolher o prémio Nobel.

4- No modelo *standard*, as forças fraca e electromagnética estão unificadas na “força electrofraca”. Assim, em vez de quatro forças da Natureza, poderemos falar em apenas três. Do modelo matemático que explicou esta unificação resultou a previsão de três novas partículas ( $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ ), que só foram descobertas dez anos mais tarde.

5- Este modelo prevê também a existência da “partícula de Higgs”. Para a detectar, está a ser construída a maior instalação experimental de física de partículas de sempre – o *Large Hadron Collider*, LHC - num túnel com 27 km de perímetro, no CERN, em Genebra, na Suíça. Esta instalação começará a funcionar em 2007 [3].

Até aqui dissemos que, subjacentes a todos os fenómenos, estão apenas quatro forças e que um sofisticadíssimo modelo matemático explica as forças fraca, forte e electromagnética. Mas a força electromagnética destaca-se por estar subjacente à esmagadora maioria dos fenómenos que afectam o nosso dia-a-dia. Um exemplo extremamente interessante é-nos dado pela história de “Sandy”, um tubarão branco fêmea. Sandy foi capturada em 1980 e levada para o aquário Steinhart de São Francisco, nos Estados Unidos. Nas primeiras 72 horas foi vista por 40 000 visitantes. No entanto teve que ser libertada porque era sensível a uma ínfima diferença de potencial de 0,000125 volt presente no aquário. Como confundia este sinal com uma

presa, atacando a parede do aquário, teve que ser devolvida ao oceano para que não acabasse por morrer.

Dada a sua importância, compreende-se que nos concentremos, de seguida, na força electromagnética.

Vamos procurar situar-nos em 1830 [4]. O que sabemos sobre electromagnetismo em 1830? Sabemos, desde os antigos gregos, que esfregando âmbar com um pano com pêlo ele atrai pedaços de papel e que, esfregando dois pedaços de âmbar e aproximando-os, estes se repelem. Para os antigos, estes fenómenos eléctricos não estavam relacionados com os fenómenos magnéticos observados quando a magnetite atrai pedaços de ferro. Em 1600 William Gilbert compreende que estes fenómenos podem ter reflexos à escala global, propondo que o facto de as bússolas apontarem sempre para Norte pode ser explicado admitindo que a Terra se comporta como um gigantesco íman. Em 1752, Benjamin Franklin mostra que os relâmpagos são manifestações atmosféricas da electricidade, inventando o pára-raios. Só em 1785 aparece a primeira lei quantitativa para estes fenómenos, por intermédio de Charles Coulomb. Este verifica que a força entre duas cargas tem a direcção da linha que as une, sendo proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas [5]. Estas características são semelhantes às encontradas anteriormente por Newton para a força entre duas massas, com a diferença que agora a força pode ser atractiva (quando as duas cargas têm sinais opostos), ou repulsiva (quando as cargas são ambas positivas ou ambas negativas).

Consideremos então uma carga positiva fixa no espaço (círculo preto na Fig. 1) e aproximemos desta uma segunda carga positiva (círculo vermelho na Fig. 1). Se largarmos a carga vermelha, esta vai ser repelida ao longo da seta vermelha que aponta para cima. Colocando a carga vermelha noutras posições, obtemos as outras setas da figura. O conjunto destas setas é uma representação do campo eléctrico,  $\vec{E}$ . Esta figura contém o essencial da lei de Coulomb. Como as setas parecem divergir da carga positiva, podemos descrevê-la através da seguinte “frase”:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{variação no espaço} \\ \text{tipo divergência} \end{array} \right] \text{ campo eléctrico} = \left( \begin{array}{l} \text{carga} \\ \text{eléctrica} \end{array} \right) / \epsilon_0.$$

Lendo essa frase da direita para a esquerda, diremos que “onde existe carga eléctrica vai haver uma divergência das linhas de força do campo eléctrico”. A constante  $\epsilon_0$  é apenas uma grandeza numérica que determina a intensidade das forças eléctricas. Para designar as linhas de força do campo passaremos a usar simplesmente linhas de campo, designação que é, aliás, tecnicamente mais adequada.

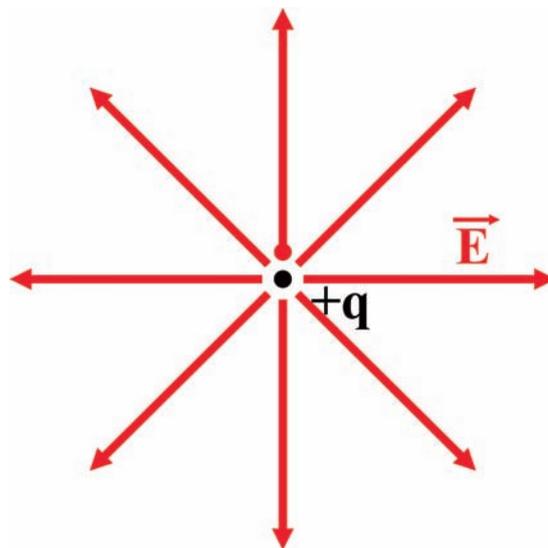


Fig. 1 Campo eléctrico criado por uma carga positiva, fornecendo uma representação visual da lei de Coulomb.

Em 1800 é inventada a primeira fonte controlável de corrente eléctrica: a pilha de Volta. Construindo uma enorme pilha na Royal Institution (uma das mais prestigiadas instituições científicas de então) Davy desenvolve a electrólise, que utiliza para identificar um grande número de novos elementos. Em 1820 Oersted descobre que as bússolas são afectadas na vizinhança de fios eléctricos, mostrando assim que a corrente eléctrica cria efeitos magnéticos. A expressão matemática destes efeitos será desenvolvida por Biot, Savart e Ampère entre 1820 e 1826.

Eis-nos em 1830. Sabemos:

1. descrever as forças entre duas cargas, dois ímanes, ou duas correntes estacionárias (isto é, sem variações no tempo);
2. que a experiência de Oersted significa que as correntes provocam efeitos magnéticos. Será que o contrário é verdade?

Haverá ligação entre estas duas questões?

Entra então em cena Michael Faraday (1791-1867). Faraday é filho de um ferreiro particularmente pobre que, ainda por cima, morre novo. Aos catorze anos Faraday vê-se obrigado a arranjar trabalho como aprendiz de encadernador, mal sabendo ler. Como primeiro sinal do seu génio, Faraday não se conforma em encadernar livros que ele próprio não consegue entender. Com uma enorme força de vontade, aprende a ler e lê tudo o que encaderna. Especialmente enciclopédias (muito em voga nessa altura), dando particular atenção aos artigos de electricidade. Sabendo deste seu interesse, um patrono oferece-lhe bilhetes para ir assistir a uma das palestras públicas de Davy na Royal

Institution. Estas palestras eram tão populares – e os engarrafamentos de coches tão grandes – que a rua da Royal Institution se tornou na primeira rua de Londres com sentido único. Noutro sinal do seu génio, Faraday tira notas meticulosas dessas palestras, enviando a Davy as 96 páginas que escreve, pedindo-lhe emprego. Faraday entra para a Royal Institution em 1813 como assistente de Davy, tendo uma ascensão verdadeiramente meteórica. Contam-se dois outros episódios reveladores da personalidade de Faraday. Foi-lhe oferecido por duas vezes o lugar de presidente da Royal Society, a sociedade científica mais prestigiada do mundo de então, distinção que ele recusou. A rainha, que nutria por Faraday uma especial admiração, ofereceu-lhe a possibilidade de ser enterrado em Westminster Abbey ao lado do grande Isaac Newton. Faraday também recusou, preferindo ser enterrado num cemitério normal, junto dos outros filhos de ferreiros... Esta história vem referida de forma brilhante em [6]. Ela deve-nos fazer pensar demoradamente. Há dois séculos era possível uma pessoa ser contratada para a maior instituição científica inglesa, independentemente das suas origens e do seu emprego anterior, apenas com base na sua competência científica. Tomáramos nós que, dois séculos depois, tal fosse verdade em todos os países europeus.

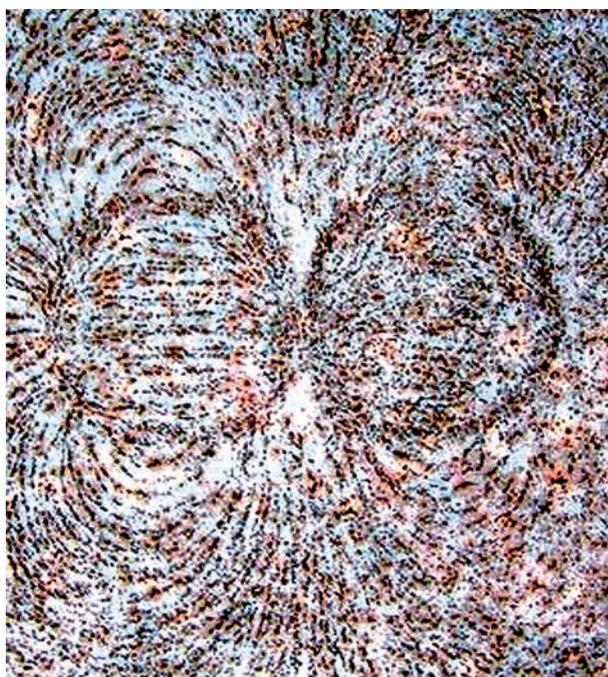


Fig. 2 Primeira ilustração conhecida, realizada por Faraday mostrando as linhas formadas pelas limalhas de ferro orientadas segundo o campo criado por dois ímanes. Nota-se que as linhas de campo se fecham sobre si próprias. O original encontra-se na Royal Institution.

Das inúmeras contribuições de Faraday para a Química e para a Física, destaquemos duas: a introdução do conceito

de linhas do campo magnético e a descoberta da lei de Faraday da indução magnética. Para perceber melhor os efeitos magnéticos, Faraday teve a ideia de utilizar o facto de os ímanes atraírem pedaços de ferro. Começou por colocar um papel por cima de um íman, deitando limalha (pó) de ferro sobre o papel e abanando levemente. Faraday reparou que as limalhas de ferro se dispunham ao longo de linhas fechadas, lineares nas zonas dos ímanes, fechando em arcos por fora destes. A Fig. 2 é a primeira figura conhecida realizada por Faraday segundo este método. Nela vemos distintamente as linhas de campo criadas pelo conjunto de dois ímanes, o que nos fornece uma forma muito visual de compreender os efeitos magnéticos.

De forma análoga poderíamos realizar uma figura para ilustrar visualmente a experiência de Oersted. A Fig. 3 mostra esquematicamente o que obtemos quando um fio muito comprido é percorrido por uma corrente eléctrica constante. Neste caso, obtemos linhas de campo circulares, dispostas num plano perpendicular ao fio. Como as linhas do campo magnético se fecham sempre sobre si próprias, Faraday referia-se a elas como os “turbilhões” magnéticos. Dado que elas parecem indicar um efeito de “andar à roda” (embora o campo, de facto, não varie no tempo, tudo está estacionário), podemos dizer que “a corrente eléctrica provoca um rotacional do campo magnético”, como está ilustrado na frase:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{variação no espaço} \\ \text{tipo rotacional} \end{array} \right] \text{ campo magnético} = \mu_0 \left( \begin{array}{l} \text{corrente} \\ \text{eléctrica} \end{array} \right).$$

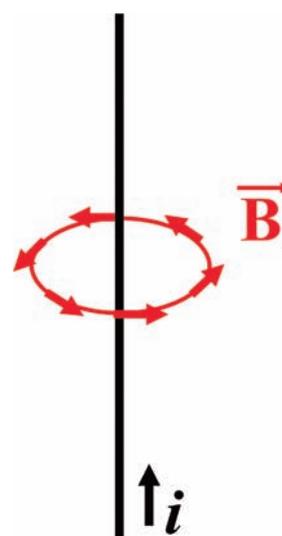


Fig. 3 Campo magnético criado por um fio percorrido por corrente eléctrica, permitindo uma representação esquemática da experiência de Oersted.

A constante  $\mu_0$  é apenas uma grandeza numérica, relacionada com a intensidade das forças magnéticas.

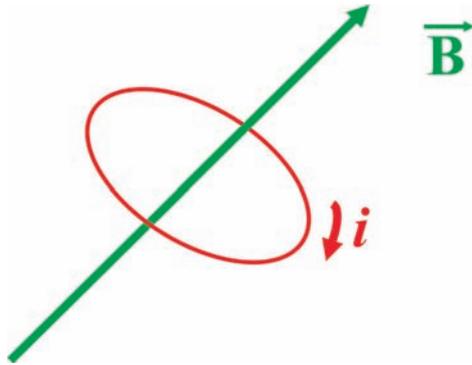


Fig. 4 Será que o campo magnético que atravessa uma espira provoca o aparecimento de uma corrente induzida nessa espira?

A 29 de Agosto de 1831 Faraday faz uma descoberta capital que está por detrás dos geradores e de muitos aparelhos eléctricos que utilizamos hoje em dia. Dado que a experiência de Oersted indica que uma corrente eléctrica provoca efeitos magnéticos, Faraday investiga se o contrário será verdade. Começa por criar um campo magnético muito forte que atravessa uma espira, como mostra a Fig. 4. Será que aparece uma corrente induzida na espira? A resposta é deprimente... Se mantivermos o campo constante, não aparece corrente na espira. Mas Faraday nota algo peculiar. Ao ligar ou desligar o campo  $\vec{B}$ , aparece fugazmente uma corrente na espira. Faraday compreende imediatamente o significado desta descoberta. Não é o campo magnético estacionário que gera uma corrente eléctrica, mas sim a variação desse campo magnético no tempo. Essa corrente eléctrica que aparece na espira pode ser associada a um campo eléctrico que aparece disposto circularmente ao longo dessa espira. Assim, podemos dizer que “a variação no tempo do campo magnético provoca um rotacional do campo eléctrico”, como se ilustra na frase:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{variação no espaço} \\ \text{tipo rotacional} \end{array} \right] \text{ campo eléctrico} = - \left[ \begin{array}{l} \text{variação} \\ \text{no tempo} \end{array} \right] \text{ campo magnético} .$$

O sinal menos nessa frase significa que a corrente induzida tentará opor-se à variação do campo magnético que lhe deu origem. Com efeito, se o campo magnético da Fig. 4 estiver a aumentar, a corrente induzida (a vermelho) dará origem a um campo que tende a opor-se a esse aumento. Assim, o sinal menos representa uma espécie de “não incomodar”, naquela que é a lei da Física de que mais gosto.

As primeira, segunda e quarta frases da Fig. 5 descrevem o que aprendemos com as experiências de Coulomb,

Faraday e Oersted, respectivamente. O conteúdo destas frases pode ser substituído pelas figuras 1, 4 e 3, respectivamente, ou pela linguagem matemática apresentada a seguir às frases na Fig. 5. Descrito por imagens, palavras ou matematicamente, o conteúdo é sempre o mesmo e facilmente compreensível.

$$\left[ \begin{array}{l} \text{variação no espaço} \\ \text{tipo divergência} \end{array} \right] \text{ campo eléctrico} = \left( \begin{array}{l} \text{carga} \\ \text{eléctrica} \end{array} \right) / \epsilon_0$$

$$\text{div } \vec{E} = \rho / \epsilon_0$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{variação no espaço} \\ \text{tipo rotacional} \end{array} \right] \text{ campo eléctrico} = - \left[ \begin{array}{l} \text{variação} \\ \text{no tempo} \end{array} \right] \text{ campo magnético}$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{variação no espaço} \\ \text{tipo divergência} \end{array} \right] \text{ campo magnético} = 0$$

$$\text{div } \vec{B} = 0$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{variação no espaço} \\ \text{tipo rotacional} \end{array} \right] \text{ campo magnético} = \mu_0 \left( \begin{array}{l} \text{corrente} \\ \text{eléctrica} \end{array} \right)$$

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

Fig. 5 As quatro belas frases de Maxwell, que descrevem todos os fenómenos electromagnéticos conhecidos até ao seu tempo.

Por uma questão de simetria, intuímos a necessidade de uma nova frase que descreva a variação espacial tipo “divergência” do campo magnético. Poderá parecer estranho que falemos de simetria, beleza ou arte no contexto das leis da Física, mas são efectivamente argumentos de simetria que estão na base de todo o modelo *standard* [7]. É novamente por uma questão de simetria que suspeitamos que essa frase deverá relacionar a divergência do campo magnético com a existência de cargas magnéticas, em analogia com o que a primeira frase nos diz sobre o campo eléctrico. No entanto, sabemos experimentalmente que não existem cargas magnéticas! Com efeito, um íman tem sempre dois pólos: pólo norte e pólo sul. Se partirmos um íman em dois (na esperança de separarmos os dois pólos, obtendo assim uma carga magnética) verificamos que ambos têm novamente pólo norte e pólo sul. Continuando este processo, continuaremos a obter sempre ímanes: os pólos norte e sul são inseparáveis. É este o conteúdo da terceira frase da Fig. 5: “não existe divergência do campo magnético”.

Maxwell mostra que o conteúdo de todas as experiências de electromagnetismo anteriores, incluindo o trabalho de

Faraday, se pode reduzir às quatro frases da Fig. 5. O que Maxwell faz em seguida constitui um dos momentos mais altos da história da Física. Maxwell percebe que a Fig. 5 não é suficientemente bela. Nem bela nem justa. Com efeito, a segunda frase diz-nos que uma variação no tempo do campo magnético provoca um campo eléctrico. Que o contrário não fosse verdadeiro seria pouco natural. Assim, Maxwell impôs que tal se verificasse, adicionando o termo

$$\mu_0 \epsilon_0 \left[ \begin{array}{l} \text{variação} \\ \text{no tempo} \end{array} \right] \text{ campo eléctrico}$$

à quarta frase, *sem que houvesse qualquer indicação experimental nesse sentido*. Isto é mais uma ilustração dos argumentos de simetria e do poder das equações. Com eles, Maxwell “inventou” um efeito físico.

Será que esse efeito tem consequências? Sim! Este efeito implica a existência de ondas electromagnéticas que se propagam no vazio com velocidade

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ km/s},$$

que é precisamente a velocidade da luz! Com isto Maxwell percebeu que a luz era apenas a parte visível dos inúmeros tipos de ondas electromagnéticas (hoje falamos de ondas de rádio, microondas, radiação infravermelha, luz visível, radiação ultravioleta, raios X, raios gama). Contudo, só passados 10 anos sobre a morte de Maxwell, Hertz demonstrou a existência de ondas electromagnéticas não visíveis.

Einstein tinha uma enorme admiração por Maxwell. E com boas razões. Com efeito, de alguma forma a relatividade restrita já está incluída nas quatro frases de Maxwell. Assim se compreende que o primeiro artigo de Einstein sobre a relatividade, publicado em Junho de 1905, se intitule “Sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento” e que a quinta palavra desse artigo seja “Maxwell”. Em Setembro de 1905, Einstein retoma o assunto, publicando uma “consequência interessante do trabalho anterior”:  $E = mc^2$ . Mas este é já assunto para outro artigo.

Em resumo: vimos que a Física está por toda a parte, em todas as escalas. Assim, gostar de alguma coisa, seja ela qual for (as partículas elementares, os átomos ou as moléculas; o ADN, as células, ou o sistema nervoso; a Terra, o sistema solar, as estrelas ou o Universo como um todo), é gostar de Física. Vimos que subjacentes a esta infinidade de fenómenos estão apenas quatro interacções. De entre elas, é a interacção electromagnética que domina (quase) todos os fenómenos do nosso dia-a-dia. E todos estes fe-

nómenos se podem descrever usando apenas quatro frases: as quatro frases de Maxwell. Esta síntese constitui uma das mais nobres criações do espírito humano.

### Agradecimentos

Estou grato à Fundação Calouste Gulbenkian, aos organizadores deste ciclo de palestras e, em especial, à Prof.<sup>a</sup> Ana Maria Eiró pelo convite para realizar este colóquio. Como sempre que o trabalho é muito, a Ana e a Sara é que orientam a nossa família, com um amor pelo qual lhes estou profundamente agradecido.

### REFERÊNCIAS

- [1] Ver os artigos de José Afonso e de Carlos Herdeiro, nesta revista.
- [2] A forma como a força forte influencia os núcleos e a sua utilização vem descrita no livro *Núcleo*, de R. Mackintosh, J. Al-Khalili, B. Jonson e Teresa Peña, Coleção Biblioteca Científica, Porto Editora, Porto, 2003.
- [3] Como este assunto é discutido abundantemente em livros de divulgação, remeto o leitor para CPEPweb.org, ww2.slac.stanford.edu/vvc, hands-on-cern.physto.se e, especialmente, ParticleAdventure.org que tem uma versão em português.
- [4] Todas as datas referidas nesta breve história são aproximadas.
- [5] Isto quer dizer que a força aumenta por um factor de quatro quando a distância diminui para metade. Este facto foi utilizado no início do texto, quando se discutiu a dificuldade que há em manter protões muito próximos, no interior do núcleo.
- [6] *Cinco equações que mudaram o mundo*, Michael Guillen, Coleção Ciência Aberta, Gradiva, Lisboa, 1998.
- [7] Isto vem explicado de forma muito elegante no capítulo “À procura da teoria de tudo”, escrito por Pedro Ferreira para o livro *O Código Secreto*, ed. M.T. Gama, Coleção Ciência Aberta, Gradiva, Lisboa, 2005.