



Gazeta de

# Física

Sociedade Portuguesa de Física



in light of Einstein 1905-2005

Número especial dedicado ao Ciclo de Colóquios  
"À LUZ DE EINSTEIN"

Editores

ANA MARIA EIRÓ E CARLOS MATOS FERREIRA



Volume 29 | Fascículo 3 | 2006 | Publicação Trimestral | 5,00



DIRECTOR Carlos Fiolhais  
DIRECTORAS ADJUNTAS Constança Providência e Lucília Brito  
EDITORA Paula Alexandra Almeida

CORRESPONDENTES Paulo Crawford (Lisboa),  
Joaquim Santos (Coimbra) e João Pedro Araújo (Porto)

COLABORAM NESTE NÚMERO

Ana Maria Eiró, Ana Simões, Carlos Fiolhais, Carlos Herdeiro,  
Carlos Matos Ferreira, João Paulo Silva, José Afonso, Luís Oliveira  
e Silva, Margarida Telo da Gama, Patrícia Faísca, Sílvia Estácio

SECRETARIADO

Maria José Couceiro (Lisboa)  
e Cristina Silva (Coimbra)

DESIGN

MediaPrimer - Tecnologias e Sistemas Multimédia Lda  
Rua Sanches da Gama, n.º 160  
3030-021 Coimbra  
E-mail info@mediaprimer.pt

PRÉ-IMPRESSÃO E IMPRESSÃO

Carvalho & Simões, Artes Gráficas, Lda  
Estrada da Beira 479 / Anexo  
3030-173 Coimbra

TIRAGEM 2000 exemplares

PREÇOS Número avulso 5,00 (inclui IVA).  
Assinatura anual 15,00 (inclui IVA).  
A assinatura é grátis para os sócios da SPF.

PROPRIEDADE DA SOCIEDADE PORTUGUESA  
DE FÍSICA

ADMINISTRAÇÃO E REDACÇÃO

Avenida da República 37-4º 1050-187 Lisboa  
Tel 217 993 665 Fax 217 952 349  
E-mail secretariado@spf.pt

NIPC 501094628

REGISTO ICS n.º 110856

ISSN 0367-3561

DEPÓSITO LEGAL n.º 51419/91

PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL

A Gazeta da Física publica artigos, com índole de divulgação, considerados de interesse para estudantes, professores e investigadores em Física. Deverá constituir também um espaço de informação para as actividades da SPF, nomeadamente as suas Delegações Regionais e divisões Técnicas. Os artigos podem ter índole teórica, experimental ou aplicada, visando promover o interesse dos jovens pelo estudo da Física, o intercâmbio de ideias e experiências profissionais entre os que ensinam, investigam ou aplicam a Física. As opiniões expressas pelos autores não representam necessariamente posições da SPF.

Os manuscritos devem ser submetidos em duplicado, dactilografados em folhas A4 a dois espaços (máximo equivalente a 3500 palavras ou 17500 caracteres, incluindo figuras, sendo que uma figura corresponde em média a 140 palavras). Deverão ter sempre um curto resumo, não excedendo 130 palavras. Deve(m) ser indicado(s) o(s) endereço(s) completo(s) das instituições dos autores, assim como o endereço electrónico para eventual contacto. Agradece-se o envio dos textos em disquete, de preferência "Word" para PC. Os originais de figuras devem ser apresentados em folhas separadas, prontas para reprodução, e nos formatos electrónicos jpg, gif ou eps.

PUBLICAÇÃO SUBSIDIADA

APOIOS:

Ministério da Educação - Sistema de Incentivos à Qualidade da Educação



## ÍNDICE

## ARTIGOS

## EINSTEIN: O HOMEM E A ÉPOCA

EINSTEIN, UM HOMEM DO SEU TEMPO? Ana Simões	4
ALBERT EINSTEIN – NOVO SÉCULO E NOVA FÍSICA Carlos Fiolhais	7
MAIS RÁPIDO, MAIS DENSO, MAIS INTENSO: NA FRONTEIRA DOS LASERS E DOS COMPUTADORES Luís Oliveira e Silva	10
EM BUSCA DAS GALÁXIAS PERDIDAS José Afonso	16
UMA BREVE HISTÓRIA DO UNIVERSO: DO BIG BANG AO UNIVERSO ACELERADO Carlos Herdeiro	22
AS FORÇAS DA NATUREZA: A IMPORTÂNCIA, BELEZA E SIMPLICIDADE DA FORÇA ELECTROMAGNÉTICA João Paulo Silva	28
O MISTÉRIO DA FORMA DAS PROTEÍNAS Patrícia F.N. Faísca	34
ESTADOS ESTRANHOS DA MATÉRIA: SUPERCONDUTORES E SUPERFLUIDOS Margarida M. Telo da Gama	40

## ENTREVISTA

SÓ PODIA SER A ESTRUTURA DA "BOLA DE FUTEBOL!" Entrevista a Harold Kroto, Prémio Nobel da Química em 1996	46
--	----

O ano de 1905 foi um marco histórico na fundação da física moderna. Com efeito, foi nesse ano, apropriadamente chamado *annus mirabilis*, que Albert Einstein publicou quatro artigos que vieram revolucionar a física: a teoria do efeito fotoelétrico, dando vida ao conceito de fóton como partícula de luz; a teoria do movimento browniano, que permitiu provar a realidade dos átomos; e, em dois artigos, a teoria da relatividade restrita, que alterou profundamente as concepções anteriores de espaço e de tempo e demonstrou a equivalência entre massa e energia, expressa na mais famosa fórmula da física,  $E=mc^2$ . A revolução desencadeada por todos estes trabalhos foi de tal forma profunda que a física mudou a partir daí. Foram as novas ideias expressas por Einstein que estiveram na base do desenvolvimento da ciência no século XX, que geraram grande parte da tecnologia actual, bem como em boa medida a nossa visão contemporânea do mundo.

Assinalando o centenário desse ano, 2005 foi declarado pela Organização das Nações Unidas Ano Internacional da Física.

Foi neste contexto mundial de celebração de uma obra genial e de homenagem à física, como uma espantosa realização da inteligência humana, que organizámos na Fundação Calouste Gulbenkian, em Lisboa, a exposição "À LUZ DE EINSTEIN: 1905 - 2005". Concebida em torno de dois grandes conceitos integradores – a luz e a matéria – a mostra ofereceu ao público interessado um percurso por vários espaços e tempos da física, levando-o desde a Antiguidade até ao presente, num trajecto realizado sempre à sombra, ou melhor, à luz de Albert Einstein.

Paralelamente, teve lugar um ciclo de colóquios, dirigidos especialmente aos jovens, para dar a conhecer alguns dos desenvolvimentos mais fascinantes da física actual e estimular o gosto pela ciência.

Este número da *Gazeta de Física* é um registo desses colóquios, que cobre domínios tão diversos como os novos lasers, a estrutura das galáxias, a história do Universo, as forças da Natureza, os sinais do cérebro, as formas das proteínas e alguns estados estranhos da matéria.

Numa altura em que a exposição se encontra de novo em exibição (com uma nova montagem) no Museu Nacional da Ciência e da Técnica, no Colégio das Artes, em Coimbra, é oportuno visitar estes temas, trazidos a público por físicos talentosos, fazedores e divulgadores de ciência, que nos mostram como a contribuição da física é essencial não só para conhecer o mundo em que vivemos mas também para resolver muitos problemas cruciais do desenvolvimento humano.

Ana Maria Eiró  
Carlos Matos Ferreira

A abrir o conjunto de colóquios sobre a física do século XX, que acompanharam a exposição “à luz de Einstein”, teve lugar uma mesa redonda dedicada ao tema “Einstein: o Homem e a Época”. Ana Simões abordou o tema “Einstein, um homem do seu tempo?”, Carlos Fiolhais falou sobre “Einstein – novo século e nova física”, enquanto Rui Mário Gonçalves deu uma perspectiva das relações entre a ciência e a arte, em particular na época de Einstein. Apresentam-se em seguida as duas primeiras dessas intervenções.

#### **Einstein, um homem do seu tempo?**

ANA SIMÕES

Centro de História das Ciências da Universidade de Lisboa - Departamento de Física, FCUL

Campo Grande, C8, Piso 6

1749-016 Lisboa

asimoes@fc.ul.pt

#### **Albert Einstein - novo século e nova física**

CARLOS FIOLHAIS

Centro de Física Computacional e Departamento de Física - Universidade de Coimbra

3004-516 Coimbra

tcarlos@teor.fis.uc.pt

# EINSTEIN: O HOMEM E A

#### **EINSTEIN, UM HOMEM DO SEU TEMPO?**

Falar de Albert Einstein não é fácil quando tanto se escreveu e se disse já sobre ele e, muito especialmente, depois de tudo o que se publicou no Ano Internacional da Física.

Einstein detém uma posição singular entre os cientistas. Tendo sido catapultado do mundo circunscrito da ciência para o vasto domínio público, foi várias vezes capa da revista *Time* e eleito por essa revista a figura do século XX. A utilização da sua imagem em anúncios de diversos tipos materializa o que todos sabemos – Einstein há muito que passou à galeria das figuras míticas. Exemplifica o cientista-génio, o cérebro por excelência, o físico teórico isolado da restante física e do universo, alheio às regras dos homens; o velho desgrenhado e mal arranjado que tocava violino e deitava a língua de fora aos jornalistas; o cientista conservador que perdeu o pé nos últimos vinte anos da sua



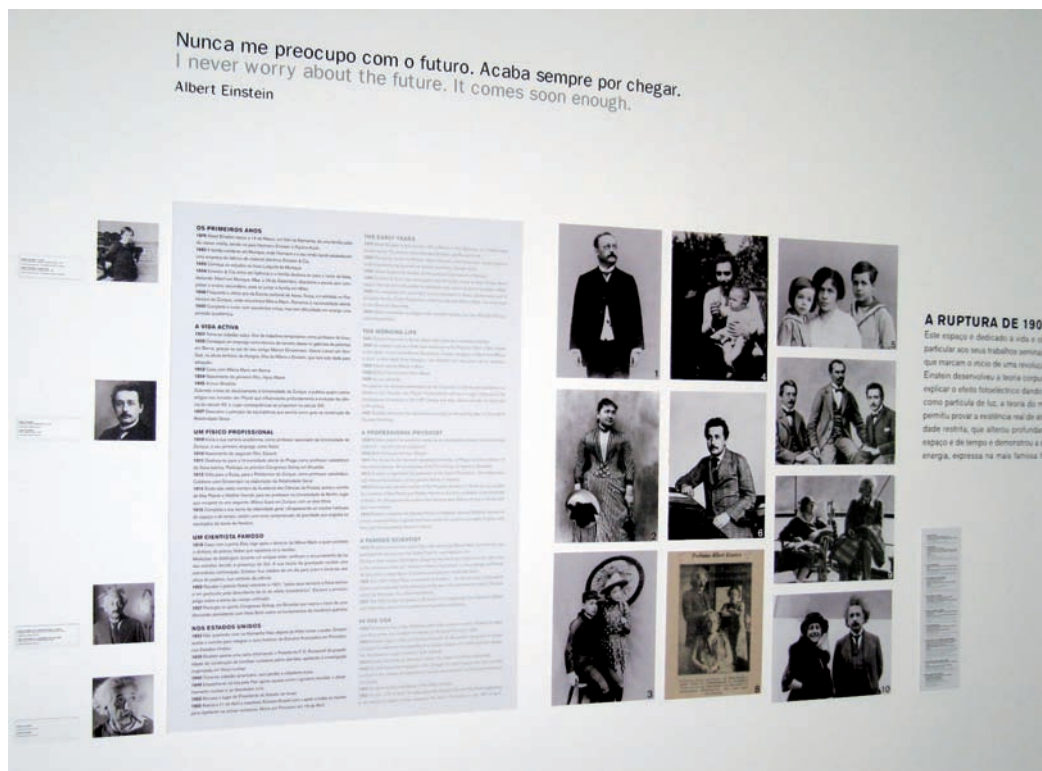


Fig. 1 - "Nunca me preocupo com o futuro". Painei da exposição "à luz de Einstein" no Museu Nacional da Ciência e da Técnica Dr. Mário Silva em Coimbra.

vida; o investigador que partilhava muitas características usualmente associadas aos artistas e que vivia arredado do mundo terreno.

Irei ilustrar algumas instâncias da construção do “mito Einstein”, referindo algumas facetas em que a sua figura se afasta radicalmente da construção mítica, aspectos que têm ficado na penumbra, por esquecimento ou por pretensão de produzir versões higienizadas, expurgadas, de Einstein.

Darei alguns exemplos no que respeita ao contexto físico e social para ilustrar quanto ele foi um homem do seu tempo. Na génese da relatividade restrita, Einstein soube aproveitar uma série de questões que estavam “no ar” e interpretar várias correntes em debate no mundo novo da física do século XIX. Reflectiu sobre os seus três grandes alicerces – a mecânica, o electromagnetismo, a termodinâmica (e a teoria cinética dos gases) – centrando-se na análise dos chamados problemas de fronteira, surgidos da articulação entre as novas áreas e a velha mecânica, que durante tantos anos se confundira com a própria física! Nesse processo de mapeamento de uma nova física, a hierarquia relativa das novas áreas face à mecânica foi tema de discussão inflamada: será que a termodinâmica ou o electromagnetismo se poderiam reduzir à mecânica e, qualquer que fosse a resposta à pergunta anterior, será que

se poderia provar a coerência e consistência dos alicerces em que assentava a já velha mecânica?

Com efeito, e paralelamente à exploração da termodinâmica, da electricidade e do magnetismo, o século XIX tinha trazido inflexões assinaláveis no programa mecanicista herdado do século XVII, que tinha apostado na explicação dos fenómenos físicos através da redução aos movimentos dos seus constituintes materiais e das forças que sobre eles actuavam. Tudo tinha começado com a “entorse” causada pelo próprio Isaac Newton, ao introduzir a força gravítica como uma força não-mecanicista por excelência. E, se o século XVIII tinha assistido ao desenvolvimento do programa newtoniano sem aparentes sobressaltos, o século XIX tinha contribuído decisivamente para acentuar o desconforto inicial, com o aparecimento de forças não-centrais, do desenvolvimento do conceito de energia, como alternativa à noção newtoniana de força, e da noção de campo que privava a matéria do seu lugar privilegiado na história da física. E o éter, esse actor que tinha tomado de assalto a física oitocentista e que vinha ocupando um lugar cada vez mais central nas preocupações da comunidade dos físicos, só veio precipitar esse anterior estado de coisas. Criação dos físicos, que não concebiam que as ondas luminosas pudessem propagar-se na ausência de um meio material, a procura do éter foi incansável e tor-

tuosa, vindo a desembocar nas expectativas depositadas na experiência de Michelson-Morley, que coroou uma já longa série, acrescentando às experiências anteriores (concebidas para pôr em evidência o éter através dos seus efeitos no movimento dos corpos) um grau de precisão nunca sonhado.

Nenhum dos físicos que acompanhou o desenvolvimento do trabalho experimental dos físicos americanos, nem mesmo o grande Hendrik Lorentz, foi capaz de interpretar o resultado negativo da experiência como revelador da inexistência do éter. Einstein, quer conhecesse ou não a experiência, trilhava um caminho bem diferente, embora assente na física do seu tempo. A análise de uma situação teórica muito simples – o movimento relativo de um ímã e de um condutor eléctrico – permitiu-lhe evidenciar uma incompatibilidade entre a mecânica e o electromagnetismo, convenceu-o da impossibilidade de detectar o movimento dos corpos através do éter, sugerindo-lhe que o éter realmente não existia. Depois, para salvar as equações de Maxwell, foi levado a afirmar que a velocidade da luz (a velocidade de propagação das ondas electromagnéticas) tem que ser constante em todos os referenciais de inércia. E a verificação de que os fenómenos são os mesmos independentemente do referencial de inércia em que os observamos – o exemplo do movimento do ímã e do condutor – conduziu-o a admitir que isso só podia significar que as leis da física são as mesmas em todos os referenciais de inércia.

Assim, o percurso que conduz Einstein ao artigo de 1905 sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento insere numa linha de reflexão que se enraíza na física do século XIX. O mesmo se passa com o artigo em que explica o movimento browniano recorrendo ao formalismo da teoria cinética dos gases. O mesmo já não se passa com o artigo em que explica o efeito fotoeléctrico, reintroduzindo na física a ideia de partículas de luz, não prescindindo, contudo, da sua natureza ondulatória. Mas todas estas incursões, só aparentemente díspares nos seus propósitos, estão unidas pela crença numa ligação harmoniosa entre as várias áreas da física do século XIX (mecânica e electromagnetismo, mecânica e termodinâmica) que se traduziu, entre outras, na articulação entre a descrição continuísta das ondas e a descrição descontínuísta da matéria.

Físico do seu tempo, sim, mas físico teórico ainda assim. Físico arredado do mundo material, que se socorreu de experiências de pensamento, se imaginava a cavalgar raios de luz e recorria a comboios e relógios como metáforas para ilustrar as ideias radicais que tinha para o tempo e o espaço. Físico em compasso de espera, no escritório de patentes em Berna, para uma tão almejada posição universitária. Será? Einstein viveu uma transição vertiginosa de século, acompanhada por mudanças enormes ao nível das comunicações e dos transportes, movida por novidades

tecnológicas cada vez mais surpreendentes (comboios cada vez mais velozes, telegrafia sem fios, electrificação progressiva das cidades, cabos submarinos, coordenação de redes de relógios distantes mas que tinham de estar sincronizados etc.) que permitiram a unificação dos impérios coloniais das potências europeias. E foi um homem do seu tempo por se mostrar sensível a elas, tanto por obrigação de ofício como por interesse genuíno, levando-as muito a sério na nova física teórica que ia tecendo. Por isso mesmo, só aparentemente se encontrava afastado do mundo circundante.

Einstein soube aproveitar todas estas oportunidades. Sensível ao contexto da ciência e da tecnologia do seu tempo, conseguiu ir mais além, rompendo afinal com ele. Do ponto de vista institucional, Einstein viveu no período em que surgiram na Alemanha as primeiras cátedras de Física Teórica. Foi professor de Física Teórica quando esta era a irmã pobre da Física Experimental e, mais tarde, no período demente da Segunda Guerra Mundial, quando esteve associada a uma “física judaica degenerada,” a eliminar do mapa juntamente com os seus representantes. O seu trabalho foi uma peça fundamental na alteração desta relação de forças. É fácil esquecermos que viveu um período em que a tradição universitária alemã, apadrinhada por físicos tão célebres quanto Max Planck ou Max von Laue, abraçava militantemente a ideia do físico apolítico. Recusando-se abertamente a vestir esta camisola, Einstein pugnou pela responsabilidade ética do cientista, mesmo quando esta atitude parecia conduzi-lo a posições contraditórias. Assistindo ao destruído da ordem da velha Europa, despedaçada por duas guerras mundiais, atravessando contextos sociais e políticos de extrema complexidade, Einstein teve sempre uma posição social e politicamente interventiva. Por isso tantas vezes incómoda, por isso tantas vezes esquecida!

Foi o cidadão de várias nacionalidades ou de nenhuma. O defensor do internacionalismo, apologista de um governo supra-nacional, de uma organização das nações mas, simultaneamente, promotor da criação do Estado de Israel, para onde, curiosamente não foi viver. Foi um pacifista intransigente que escreveu o contra-manifesto (1914) ao manifesto dos intelectuais alemães que defenderam a Primeira Guerra Mundial mas que, anos mais tarde, escreveu a carta ao Presidente Franklin Roosevelt (1939), exortando-o a tomar as medidas necessárias para evitar que uma bomba atómica caísse nas mãos do governo nazi. E, no período instável do pós-guerra e do início da *big science*, participou no movimento de desarmamento nuclear, liderou o Comité de Emergência de Cientistas Atómicos, investiu na cooperação pacífica entre nações e assinou um manifesto com Bertrand Russell.

Socialista ético, lutou contra o racismo e o linchamento dos negros americanos no período do terror mccartista. Aveso a condecorações aceitou, em 1946, um doutora-

mento *honoris causa* na Lincoln University na Pensilvânia, uma universidade americana para negros. O estilo do seu discurso, o seu conteúdo, o seu *timing* e a ausência de publicidade pelos *media* americanos, numa altura em que Einstein era tratado há muito como uma figura hollywoodesca, não são acidentais. A isto se juntou a sua defesa do grande cantor, actor e activista negro Paul Robeson, a protecção que ofereceu à diva Marian Anderson quando lhe foi negada guarida no hotel de Princeton e tantos outros casos. Por isso os ficheiros do FBI sobre Einstein, recentemente revelados, contêm perto de duas mil páginas!

Físico do seu tempo, sim, mas também homem e cidadão politicamente empenhado. Einstein era multifacetado, bem humano e, afinal, uma pessoa com os pés bem assentes na terra. Um físico que não se revia na imagem que dele se criou, um cientista isolado, aéreo e etéreo, ao ponto de afirmar no seu estilo humorístico tão habitual: “*Não sou nenhum Einstein*”. Revelou-se ainda, e principalmente, um cidadão solidário que levou a política tão a sério que, quando afirmou que “*para mim, a seguir às equações vem a política,*” esta não era, nem nunca poderia ser, uma frase de circunstância.

Ana Simões

## ALBERT EINSTEIN - NOVO SÉCULO E NOVA FÍSICA

Quando no ano de 1900, o século XIX terminava, havia em muitos físicos uma sensação do fim da sua ciência. É bem conhecido o título da conferência de William Thomson, Lord Kelvin, proferida no dia 27 de Abril de 1900 na Royal Institution de Londres: “Nuvens do século XIX sobre a teoria dinâmica do calor e da luz”. Segundo ele, a “*beleza e clareza da teoria*” só era obscurecida por “*duas nuvens*”, uma, referente ao calor, era a dificuldade de descrição da radiação do corpo negro e outra, referente à luz, era o resultado nulo da experiência de Michelson-Morley. Pois Lord Kelvin, um símbolo da física do século XIX, mostrou então uma extraordinária capacidade de antecipar a física do século XX...

As duas nuvens não eram coisas pequenas: a primeira deu origem à teoria quântica iniciada por Max Planck, ainda no ano de 1900, e a segunda à teoria da relatividade restrita de Albert Einstein, formulada no “ano milagroso” de 1905. Einstein, em 1905, num artigo que ele próprio classificou como o “*mais revolucionário*”, acrescentou uma ideia-chave à teoria de Planck: não apenas a radiação era emitida e absorvida em pequenas quantidades (os “*quanta*”) mas ela própria também existia na forma dessas pequenas quantidades, que mais tarde vieram a chamar-se fotões.

A teoria da relatividade restrita aproxima a mecânica do electromagnetismo ao afirmar que é válido um mesmo princípio da relatividade para os dois ramos da Física. Não há, portanto, para o electromagnetismo (e ao contrário do que supunha Kelvin) um sistema de referência privilegiado, o éter. Nesse processo de unificação, Einstein deixou intacto o electromagnetismo (ou melhor, apenas dispensou a necessidade do éter), mas viu-se obrigado a modificar a mecânica de Galileu e Newton, que tantas e tão boas provas tinha dado. A solução para manter a “velha mecânica” passou por construir uma “nova mecânica” que coincidissem com a primeira no domínio das pequenas velocidades (a ciência é cumulativa e o que se descobre de novo tem de incorporar o que já se sabe bem!). A experiência de Michelson-Morley, de 1887, que falhou estrondosamente na detecção do éter, não terá constituído no raciocínio do jovem Einstein uma peça importante, mas sim a assimetria que se verificava na observação de alguns fenómenos electromagnéticos e que se podia reconhecer em certas experiências mentais (diríamos hoje experiências virtuais). Einstein começa por falar das questões do electromagnetismo no famoso artigo “Sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento”, publicado na prestigiada revista *Annalen der Physik*. Nesse artigo, os conceitos de espaço e tempo absolutos de Galileu e Newton caíram: o espaço e o tempo deixaram de ser absolutos e passaram a depender do observador, tendo Einstein previsto dois fenómenos estranhos, mas hoje bem comprovados: a contracção das

### BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

1. Artigos incluídos na secção “FOCUS: The elusive icon: Einstein, 1905-2005”, *ISIS*, **95** (2004), 610-648.
2. David Cassidy, *Einstein and Our World*, Humanities Press International, New Jersey, 1995.
3. Paulo Crawford, “Albert Einstein e a ruptura de 1905” in “À Luz de Einstein 1905-2005”, Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2005, pp. 39-51.
4. Jorge Dias de Deus, Teresa Peña, *Einstein...Albert Einstein. Homem, cidadão, cientista*, Gradiva, Lisboa, 2005.
5. Peter Galison, *Os relógios de Einstein e os mapas de Poincaré*, Gradiva, Lisboa, 2005.
6. Gerald Holton, *A Cultura Científica e os seus Inimigos, o Legado de Einstein*, Gradiva, Lisboa, 1998.
7. Fred Jerome, *The Einstein File. J. Edgar Hoover's secret war against the world's most famous scientist*, St. Martin's Griffin, New York, 2003.
8. John S. Ridgen, *Einstein 1905, The Standard of Greatness*, Harvard University Press, 2005.



Fig. 2 - Cartoon retirado de *A Física em Banda Desenhada*, de Larry Gomick e Art Huffman, Gradiva, 2005.

réguas em movimento e a dilatação do tempo medido por observadores parados. Não há intervalos invariantes só no espaço ou só no tempo, mas há intervalos invariantes no espaço-tempo, uma nova entidade matemática que engloba o espaço e o tempo.

Foi ainda uma experiência mental sobre a emissão de luz vista de diferentes pontos que o levou, no mesmo ano, a enviar para a mesma revista uma adenda ao anterior artigo: “Dependerá a inércia de um corpo do seu conteúdo energético?”. A resposta era positiva: massa e energia, que pareciam conceitos distintos, passaram a ficar unidos para sempre. A fórmula  $E=mc^2$  passou a relacionar massa e energia de um modo espantosamente simples: há proporcionalidade directa entre as duas grandezas e a constante de proporcionalidade constrói-se com o invariante fundamental da teoria (a velocidade da luz). É ainda este facto que permite compreender por que razão um corpo com massa nunca poderá alcançar a velocidade da luz, ao passo que um objecto sem massa, como o fóton, viaja sempre a essa velocidade. Massa e energia passaram a ser convertíveis uma na outra, um processo que viria a ter enormes repercussões no curso da história do século XX...

A matemática da teoria da relatividade era e é simples. Mas foram dificuldades de ordem matemática as responsá-

veis pelo facto de a generalização do princípio da relatividade para observadores acelerados, a relatividade geral, ter demorado onze longos anos. O resultado final valeu bem o esforço. Se o espaço-tempo e a massa-energia tinham sido duas unificações conceptuais na relatividade restrita, a relatividade geral faz uma síntese final e grandiosa: a geometria do espaço-tempo é alterada pela presença da massa-energia. O encurvamento do espaço-tempo pode ser detectado pelo comportamento de réguas e relógios perto de corpos com grande massa. Uma previsão do encurvamento do espaço perto do Sol foi efectuada com base no comportamento dos raios de luz provenientes de estrelas localizadas por detrás do Sol, durante o eclipse solar de 1919. Felizmente que a nossa estrela tem massa suficiente para encurvar esses raios de luz (a luz comporta-se como se tivesse massa na vizinhança de um campo gravitacional suficientemente intenso!) e as observações realizadas por expedições britânicas à ilha do Príncipe e a Sobral, no Brasil, foram positivas. Com isso o problema da natureza da força gravitacional, que Newton não tinha conseguido resolver (ele pensava até que essa força podia ser instantânea), foi solucionado por Einstein, que descobriu que a gravitação era a manifestação directa da curvatura do espaço-tempo.

A equação que relaciona a métrica do espaço-tempo com a da massa-energia teve consequências cosmológicas. Foi possível, depois de algumas hesitações (Einstein, para manter o universo estático, introduziu à mão uma “constante cosmológica”, da qual mais tarde se viria a arrepender – foi, segundo ele, “o maior erro da sua vida”) descrever a expansão do Universo, que entretanto foi confirmada pela observação astronómica. O *Big Bang* estava “escondido” nas equações da relatividade geral!

Engane-se, porém, quem pense que Einstein abandonou a física quando chegou a esse cume do pensamento humano que é a teoria da relatividade geral. Ele passou a maior parte do resto da sua vida às voltas com um outro problema, um problema bem mais difícil, tão difícil que ainda hoje não está resolvido. Se a força gravitacional era uma deformação do espaço-tempo quadridimensional, não poderia a força electromagnética ser explicada do mesmo modo ou de um modo semelhante? Por outras palavras, não poderia haver uma teoria única da força gravitacional e da força electromagnética? Faraday e Maxwell já tinham unido a força eléctrica e a força magnética, com o bónus enorme de se ter feito luz sobre a luz, mas não poderia a força gravitacional e a força electromagnética serem juntas numa única teoria da força unificada? Este sonho, que Einstein não realizou, continua hoje a ser activamente perseguido por muitos físicos...

Os avanços no sentido da unificação das interacções seguiram, entretanto, caminhos que Einstein não con-



seguiu acompanhar, por ter, de algum modo, a certa altura, “perdido o comboio” da física moderna. Tudo tem a ver com a segunda nuvem... Com efeito, apesar de ser um dos autores da teoria quântica (ao ter avançado a explicação do efeito fotoeléctrico com base na natureza corpuscular da luz), ele foi uma espécie de pai que negou a sua filha. Foi ele quem encorajou o francês de Broglie a avançar a ideia, na altura ousada, de que não apenas a luz tinha um carácter de partícula como também as partículas de matéria tinham um carácter ondulatório. A dualidade onda-partícula está na base da teoria quântica. Contudo, Einstein não acompanhou os físicos jovens, como Heisenberg e Schroedinger, e um físico menos jovem, Born, que por volta de 1926, completaram o quadro da mecânica quântica. “*Deus não joga aos dados*” é a bem conhecida afirmação de Einstein (que era tão bom na criação de aforismos como na investigação científica), à qual Bohr, com sabedoria, retorquiu dizendo que “*não competia a Einstein dizer a Deus o que deve fazer*”.

Einstein contribuiu, todavia, para o desenvolvimento da teoria quântica ao formular todo um conjunto de críticas que foram sendo respondidas tanto pela teoria como pela experiência. Tinha contribuído também em 1917 ao formular uma teoria da emissão estimulada de luz que está na base dos lasers e ao apoiar em 1924 um jovem indiano, Bose, que previu um comportamento de partículas semelhantes aos fótons que diferia profundamente do dos electrões e que hoje está bem confirmado experimentalmente (condensação de Bose-Einstein).

Como se o que atrás se resumiu fosse obra pequena, Einstein conseguiu na sua juventude, numa altura em que se falava de “hipótese atómica” e não de realidade atómica, afir-

mar a existência real de átomos e moléculas. Serviu-se para isso da ciência termodinâmica (em parte, obra de Kelvin), que ele dominava, e do chamado movimento browniano, o movimento inusitado de um pequeno pólen sujeito a um constante bombardeamento de moléculas de água.

A maior parte destas (e doutras) contribuições prestou-as Einstein sozinho ou praticamente sozinho. É uma obra extraordinária, que só pedirá meças às obras de Galileu e Newton realizadas trezentos anos antes. Depois de Einstein, o espaço e o tempo, a massa e a energia, a força gravítica e a força electromagnética, a luz e a matéria passaram a ser vistos com outros olhos. Einstein deu uma revisão profunda a toda a física, reordenando algumas coisas e criando outras.

No início do século XXI há outras nuvens no horizonte da física, incluindo o problema da unificação das forças. Há ainda a questão da constante cosmológica (o Universo parece estar em expansão acelerada) e a questão da inflação (o Universo primitivo ter-se-á expandido muito rapidamente)... Mas, assim como Einstein subiu aos ombros de Galileu e Newton para ver mais longe, decerto que alguém um dia subirá aos ombros de Einstein para ver ainda mais além... Quando o fizer, não será nem o fim da física, nem, muito menos, o fim de Einstein. Continuar a física que os gigantes da Física fizeram é a maior homenagem que se lhes pode fazer. A descoberta do mundo é, para o homem, uma tarefa inesgotável e, nessa tarefa, o exemplo de Einstein permanecerá perene.

Carlos Fiolhais

# At the Edge of the Universe

LATEST RESULTS FROM THE DEEPEST ASTRONOMICAL SURVEYS

SINTRA, PORTUGAL, 9-13 OCTOBER 2006



A Física do século XX abriu o caminho para várias revoluções tecnológicas que tocam muitos aspectos da sociedade contemporânea, alterando dramaticamente a forma como vivemos e comunicamos. A Física, os seus métodos e os seus objectos de estudo também sofrem o impacto destas mudanças tecnológicas. Neste artigo, usando o exemplo das revoluções da tecnologia laser e dos computadores, mostra-se como alguns dos novos caminhos e dos novos desafios da Física estão a ser explorados, conduzindo ao estudo de condições extremas apenas existentes nos cenários astrofísicos mais violentos e levando-nos a conceber os novos desenvolvimentos tecnológicos para o século XXI.

LUÍS OLIVEIRA E SILVA  
GoLP/Centro de Física dos Plasmas,  
Instituto Superior Técnico,  
Av. Rovisco Pais  
1049-001 Lisboa

luis.silva@ist.utl.pt

# MAIS RÁPIDO, M MAIS INTENSO: TEIRA DOS LAS COMPUTADOR

Em 1896, as primeiras Olimpíadas da era moderna iniciaram-se sob o lema latino “*Citius, altius, fortius*”, ou “Mais longe, mais alto, mais forte”. Os primeiros sinais de mudança da Física, prenúncio das revoluções que se aproximavam, também se começaram a sentir na mudança do século. Apesar de serem actividades tão distintas, é interessante observar que encontramos no ideal olímpico um reflexo do que continua a ser também um pouco o ideal da ciência. Tentativa de compreendermos e de superarmos o nosso conhecimento sobre a Natureza, a ciência é também uma actividade em que, diariamente, os cientistas se superam e se ultrapassam no desafio permanente do conhecimento, procurando incessantemente ultrapassar a própria Natureza.

O laser, acrónimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, a luz especial do século XX, que existe apenas nos nossos laboratórios, é um excelente exemplo do modo como a ciência consegue superar a própria Natureza. Quando em 1916 Einstein propôs o conceito de emissão estimulada, ninguém conseguiria prever o alcance deste trabalho teórico. Até então, o processo de emissão espontânea de luz, apesar de não totalmente alicerçado nos princípios fundamentais da Mecânica Quântica, permitia descrever todas as luzes, das estrelas às lâmpadas. O conceito de emissão estimulada parecia apenas uma propriedade curiosa da emissão de luz pelos átomos em

# MAIS DENSO, NA FRON- TERS E DOS ES

que, com o auxílio de fótons de frequências bem definidas, é possível “obrigar” o átomo a radiar fótons sincronizados com uma energia e direcção bem definidas.

Do princípio teórico até à sua implementação passaram mais de quarenta anos. Como reconhece Charles Townes, Prémio Nobel da Física em 1964, a tecnologia para desenvolver o primeiro laser existia praticamente desde os anos vinte, mas

só no final dos anos cinquenta surgiram os primeiros lasers, aliando o processo de emissão estimulada a uma configuração que favorecia a amplificação da luz laser [1]. Richard Feynman afirmava que era uma ideia verdadeiramente brilhante porque todos sentem que a poderiam ter tido.

O primeiro laser – um laser de rubi –, devido a Maiman, contém todos os elementos fundamentais que continuam a estar presentes nos lasers actuais, desde os mais simples até aos mais complexos. O primeiro laser civil em Portugal, que esteve em exibição na exposição “À Luz de Einstein”, na Fundação Calouste Gulbenkian, é semelhante ao primeiro desenvolvido por Maiman e ilustra os componentes fundamentais de qualquer laser (cf. Fig. 1). Aí podemos reconhecer o meio activo – o cristal sintético de rubi de cor púrpura – onde se dá a emissão estimulada e a amplificação, colocado entre dois espelhos que formam a cavidade laser. A cavidade laser selecciona a frequência dos fótons aprisionados e amplificados no seu interior. Observamos ainda uma lâmpada de *flash* que envolve o cristal de rubi. Depois de disparada, contribui para excitar os átomos do cristal de rubi garantindo que o número de átomos excitados seja superior ao número de átomos num estado de energia mais baixa (fenómeno conhecido como inversão de população), preparando assim o meio activo para que a amplificação da luz laser possa ocorrer eficientemente.

A luz emitida pelos lasers apresenta propriedades únicas, sintetizada na frase de Townes “*A luz que brilha a direito*”. Esta frase tão simples acaba por conseguir descrever as propriedades específicas da luz laser. Falamos de radiação electromagnética, luz, com propriedades especiais em que todos os fótons têm a mesma cor e estão perfeitamente sincronizados, isto é, o processo de amplificação por emissão estimulada garante simultaneamente a cópia da frequência e da fase dos fótons contidos na cavidade laser. O feixe de luz laser é muito direccionado porque, ao contrário do que



Fig. 1 - O primeiro laser em Portugal, ilustrando os componentes principais de um laser. Cortesia de J. M. Dias e GoLP/IST.



se passa na emissão espontânea, os fótons são emitidos na mesma direcção. Estas propriedades tornam os lasers “fontes perfeitas de luz quase perfeita”, garantindo que a luz assim gerada pode ser facilmente focada em zonas de dimensões espaciais muito reduzidas, conduzindo a potências e intensidades luminosas muito elevadas.

Todas estas características de luz perfeita foram inicialmente consideradas apenas uma curiosidade, ou “uma solução à procura de um problema” [1]; uma excelente ideia da Física fundamental, com origem num trabalho teórico de Einstein, a que parecia faltar um objectivo e potenciais aplicações. Este cepticismo foi ultrapassado em poucos anos. A precisão associada à luz laser rapidamente se tornou uma característica explorada em todas as actividades envolvendo metrologia de precisão (o Prémio Nobel da Física de 2005 é mais um exemplo da utilização dos lasers para medirmos tempos e distâncias com precisões cada vez mais elevadas [2]). Actualmente encontramos lasers na tecnologia mais comum da vida moderna, dos sistemas de leitura de códigos de barras até aos leitores de CD.

A diversidade dos sistemas laser torna-os também importantes na indústria e na investigação científica em áreas tão distintas como a Medicina, a Biologia e a Física. Os avanços na tecnologia laser seguiram o padrão comum aos desenvolvimentos tecnológicos da segunda metade do século XX, como os computadores com a sua Lei de Moore. Algumas das especificações dos lasers variam exponencialmente em função do tempo. Os casos paradigmáticos são a potência e a duração dos impulsos laser dos sistemas mais avançados. Estes avanços têm sido realizados à custa de novas ideias, como a *Chirped Pulsed Amplification* ou a produção de impulsos de atosegundo ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ) por geração de harmónicas, ou como resultado da investigação em novos materiais e nas suas propriedades ópticas.

Os primeiros lasers apresentavam potências próximas do quilowatt (kW), enquanto os sistemas actuais mais sofisticados já atingem potências da ordem do petawatt ( $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$ ). Recentemente iniciaram-se os planos para construir a próxima geração de sistemas laser com potências próximas do exawatt ( $1 \text{ EW} = 10^{18} \text{ W}$ ). Quando estes números são apresentados, a primeira reacção é de perplexidade e descrença. Se as centrais termoeléctricas mais comuns produzem apenas alguns gigawatts ( $1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W}$ ) de potência eléctrica, como é possível construir lasers, alimentados por uma tomada de electricidade convencional, quase um milhão de vezes mais potentes do que as centrais que nos fornecem energia? Para respondermos a esta questão é importante regressar ao conceito de potência, na sua versão mais simples que aprendemos no Ensino Secundário. Existem duas maneiras de aumentar a potência instantânea associada a um feixe de luz laser: ou aumentamos a energia do feixe laser ou diminuímos a duração do

impulso. Nos lasers mais sofisticados, a duração pode ser tão curta como dez femtossegundo ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) e a energia armazenada nestes impulsos pode atingir 1 joule, o que corresponde ao armazenamento de uma energia luminosa apreciável numa zona de espaço com um comprimento de alguns micrometros. Por curiosidade, e para demonstrar que estamos na presença de intervalos de tempo muito pequenos, podemos verificar que a duração destes impulsos laser está para um piscar de olhos assim como o piscar de olhos está para a idade do Universo.

Um cálculo muito simples mostra-nos que a potência instantânea nestas balas de luz é 100 terawatts ( $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$ ). Até há poucos anos, apenas alguns laboratórios de grande dimensão nos Estados Unidos e na Europa podiam acolher sistemas com esta *performance*. Mas a evolução tecnológica nos lasers tem sido tão forte que hoje é possível instalar estes lasers em laboratórios universitários. O Laboratório de Lasers Intensos do Instituto Superior Técnico, em 2005, alberga um sistema capaz de gerar impulsos laser com cerca de 150 fs e mais de 10 J de energia (Fig. 2).

Estes lasers abrem a porta para regimes totalmente novos de interacção da luz com a matéria. A radiação electromagnética é tão intensa que até os átomos mais pesados são ionizados múltiplas vezes. Os alvos irradiados por estes lasers, comprimidos com pressões superiores a centenas de megabar ( $1 \text{ Mbar} = 10^6 \text{ bar}$ ) rapidamente se transformam numa “sopa” de electrões e iões, ou plasma, em que a dinâmica do sistema é dominada pelo comportamento colectivo e pelas ondas fortemente não lineares que são geradas no processo de interacção. Os electrões que oscilam no campo destes lasers movem-se com velocidades relativistas e os efeitos não lineares devido à variação da energia dos electrões, exclusivamente associados à relatividade restrita de Einstein, condicionam toda a dinâmica da própria luz laser e conduzem a fenomenologia inesperada. Todo o plasma se comporta como um meio não linear e a interacção da luz laser ultra intensa com a matéria é, muito apropriadamente, designada por Óptica Não Linear Relativista. Com os sistemas a desenvolver nos próximos anos, é plausível conceber a conversão de luz laser infravermelha em matéria (pares electrão-positrão), uma forma de ionização multifotão do vazio e uma ilustração directa da famosa equação de Einstein  $E = mc^2$ .

Os plasmas irradiados por lasers intensos apresentam um comportamento colectivo, fortemente não linear e complexo. A sua compreensão e exploração exige não só diagnósticos sofisticados mas também modelos numéricos que consigam simultaneamente reproduzir os resultados experimentais e fornecer informação pormenorizada sobre os sistemas e a sua dinâmica. Funcionando como autênticas experiências virtuais em que os físicos testam novas ideias e compreendem as experiências, as simulações numéricas

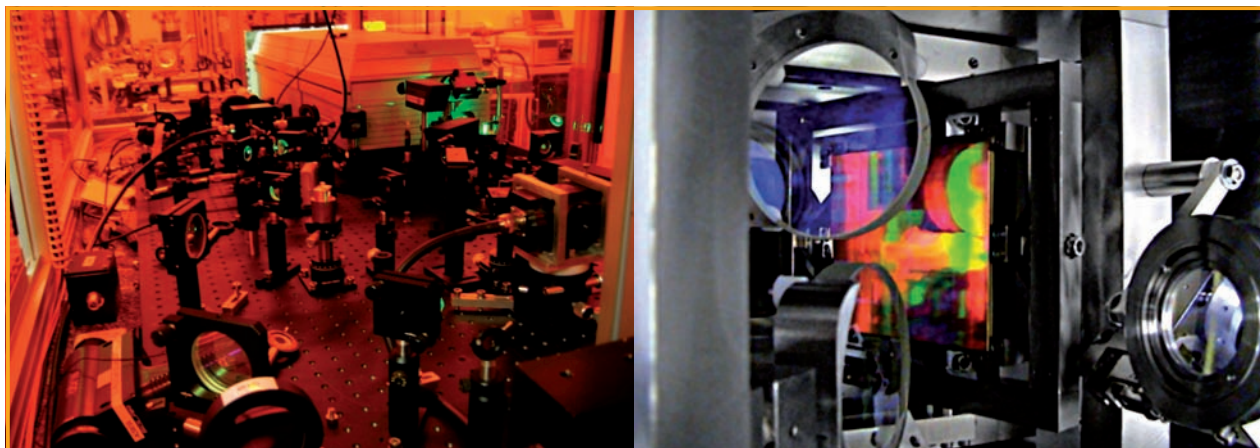


Fig. 2 - Pormenores do Laboratório de Lasers Intensos do IST, instalação experimental dedicada ao desenvolvimento e aplicação de lasers intensos. Cortesia de G. Figueira e GoLP/IST.

têm um papel cada vez mais importante na maneira como a Física é feita actualmente, complementando o binómio Física Teórica – Física Experimental usualmente associado ao desenvolvimento da Física. A Física dos Plasmas e, em particular, o estudo da interacção da luz com a matéria, é, historicamente, um domínio científico em que a simulação numérica e a computação avançada sempre tiveram um papel central, desde os anos 50.

O poder computacional, à disposição dos cientistas, tem avançado de forma radical, com todas as consequências que daí advêm para as aplicações que aproveitam este poder. A Lei de Moore (Fig. 3) ilustrada com o número de operações de vírgula flutuante por segundo (*flops*) demonstra esta tendência. Os computadores que temos actualmente nas nossas mesas de trabalho são equivalentes, em poder de cálculo, aos supercomputadores mais avançados dos anos 80 e muito mais poderosos do que os computadores que alguns dos projectos mais arrojados do século XX tiveram à sua disposição (o projecto Manhattan ou as missões Apollo).

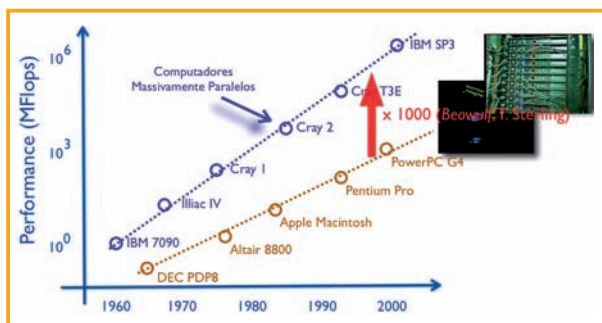


Fig. 3 - O poder de cálculo dos computadores: a lei de Moore, expressa em função do número de operações de vírgula flutuante, para os supercomputadores e os computadores pessoais. Fonte: Physics Today e <http://www.top500.org>.

Podemos compreender esta evolução fazendo uma estimativa muito simples, do custo, para um consumidor, de uma operação computacional tão simples como uma multiplicação. Um dos primeiros projectos científicos de grande dimensão exigindo cálculos avançados, o projecto da bomba atómica nos anos quarenta, recorria a um grande número de operadoras (mão-de-obra não especializada) de máquinas de calcular manuais, comandadas pelo então recém-doutorado Richard Feynman [3]. Supondo que cada operadora executa uma multiplicação por segundo, recebendo quatro euros por hora (para executar três mil e seiscentas multiplicações numa hora), concluímos que o custo de uma multiplicação nos anos quarenta era, a preços de 2005, de 0,001 euros, desprezando o custo da máquina. Actualmente, a situação é muito distinta. Um computador pessoal, com um custo de cerca de três mil euros e um tempo de vida de três anos, pode executar mil milhões de operações de vírgula flutuante por segundo. Hoje, uma multiplicação custa apenas cerca de  $10^{-13}$  euro, ou seja, é  $10^{10}$  vezes mais barata do que nos anos quarenta. Observamos salto idêntico na memória dos computadores, na capacidade dos discos rígidos e até na sua dimensão (basta verificar a dimensão e a capacidade dos leitores digitais de música nos últimos quatro anos). Esta mudança é, não apenas quantitativa, mas sobretudo qualitativa, permitindo-nos hoje fazer ciência, e física em particular, de uma forma radicalmente diferente.

É a combinação destas ferramentas de potencial excepcional – os lasers com capacidades inimagináveis há apenas uma década e os computadores cada vez mais rápidos – que permite actualmente a exploração de cenários físicos laboratoriais e astrofísicos associados a condições extremas. A esta nova área multidisciplinar foi dada a designação de Ciência das Densidades de Energia Elevadas, com o subtítulo sugestivo de Desportos Radicais da Ciência Contemporânea [4]. Tenta-se responder a questões centrais para

toda a Humanidade, como a produção de energia a partir da fusão nuclear, analisam-se aspectos fundamentais, associados a uma melhor compreensão de cenários astrofísicos violentos, ou exploram-se novas tecnologias, no domínio dos aceleradores de partículas.

Nas estrelas, como o Sol, a energia libertada é resultado das reacções exoenergéticas de fusão nuclear, que ocorrem no centro da estrela, em que núcleos leves se combinam em núcleos mais pesados (mas de massa total inferior à massa total dos elementos mais leves que participam na reacção). As condições de pressão e temperatura necessárias para a fusão nuclear são garantidas pela força gravítica na estrela. No laboratório, os cientistas caminham para uma fonte de energia praticamente inesgotável e muito limpa, baseada na fusão nuclear controlada, por dois percursos: a fusão nuclear por confinamento magnético e a fusão nuclear por confinamento inercial. No primeiro caso, são os campos magnéticos que aprisionam o plasma. No segundo caso, duas centenas de raios laser ultra intensos, gerados por sistemas do tamanho de pavilhões gimnodesportivos são focados numa esfera de raio da ordem de 1 mm, comprimindo o “combustível” (o mais comum é o deutério), de modo a criar as condições para se formarem “mini-estrelas” onde as reacções de fusão nuclear se tornam possíveis. Apesar de não ser uma tecnologia tão explorada como a fusão nuclear por confinamento magnético, principalmente na Europa, existem excelentes indicações de que será possível a curto prazo atingir a ignição destes alvos, abrindo assim novas possibilidades para a produção de energia por fusão nuclear em reactores.

Experiências em laboratório com lasers ultra-intensos ajudam-nos também a compreender o interior dos grandes planetas, como Júpiter, ou a forma como as estrelas explodem. Quando estes lasers são focados em alvos sólidos, a pressão e a temperatura são tão elevadas que as condições são idênticas às existentes no centro dos planetas. O conhecimento das propriedades dos materiais nestas condições é fundamental para a compreensão dos mecanismos de formação e evolução dos planetas. O material sofre acelerações tão fortes como as que se observam em explosões de supernovas, conduzindo a instabilidades hidrodinâmicas que apenas podemos observar com telescópios e estudar experimentalmente com lasers. Estas instabilidades e toda a turbulência associada são fundamentais para o processo de mistura nas explosões de supernovas e consequentemente para a produção de todos os elementos mais pesados do que o ferro. Compreendemos a nossa origem mais primordial, o pó das estrelas de que somos feitos e que nos rodeia, quando estudamos as explosões mais violentas do Universo e é apenas com os lasers mais intensos, em combinação com simulações numéricas de grande dimensão, que algumas das características mais intrigantes destas explosões podem ser estudadas.

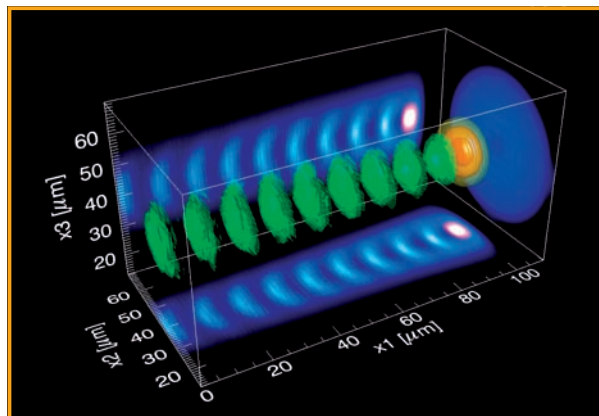


Fig. 4 - Rasto deixado por laser ultra intenso num plasma: o laser move-se da esquerda para a direita, deixando atrás de si oscilações de grande amplitude que podem ser utilizadas como estruturas para a aceleração de partículas até energias elevadas. Cortesia de S. Martins, R. Fonseca e GoLP/IST.

Os lasers ultra-intensos estão também a abrir novos caminhos tecnológicos, uma Engenharia Relativista. Com estes lasers podemos ionizar totalmente alvos gasosos, criando assim um plasma. A pressão de radiação do laser, ao propagar-se neste meio muito pouco denso e transparente, empurra os electrões à sua passagem, mas os iões, de massa muito superior, praticamente não se movem. O campo eléctrico, associado a este deslocamento de carga, gera oscilações movendo-se à velocidade da luz laser (que é muito próxima da velocidade da luz no vácuo), da mesma forma que um barco em movimento deixa atrás de si um rasto de oscilações na superfície da água. A estrutura de campo eléctrico assim gerada tem propriedades excepcionais para acelerar electrões até energias elevadas. É uma estrutura que acompanha os electrões, com um campo eléctrico várias ordens de grandeza superior aos campos eléctricos sustentados até pelos materiais mais sofisticados usados nos grandes aceleradores do CERN. Tal como um surfista apanha a onda e aumenta a sua velocidade à medida que mantém o contacto com a onda, é possível lançar electrões nestas ondas geradas pelo laser no plasma e, em teoria, desenhar aceleradores muito mais compactos. Experiências recentes, publicadas na revista *Nature* em Setembro de 2004, demonstram a viabilidade desta tecnologia para os novos aceleradores de partículas [5].

Em Portugal, as perspectivas para o desenvolvimento desta área de investigação em Física são excelentes. A par de uma tradição de mais de três décadas em Física dos Plasmas, existe um conjunto de investigadores fortemente internacionalizado, que colabora e realiza experiências nos sistemas laser mais sofisticados do mundo e utiliza os recursos computacionais mais avançados nos Estados Unidos e na Europa. Esta actividade teórica, de simulação numérica e experimental, é apoiada em laboratórios de laser e compu-



tadores paralelos de qualidade internacional instalados em Portugal e com uma componente de formação pós-graduada muito forte, garantindo-se assim a sustentabilidade e a longevidade em Portugal deste excitante novo domínio da Física.

#### Agradecimentos

Agradeço as frutuosas discussões com o João Mendanha Dias, o Gonçalo Figueira e o Ricardo Fonseca e com todos os elementos do Grupo de Lasers e Plasmas do IST. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através dos projectos POCTI/FIS/55905/2004 e PDCT/FP/FAT/50190/2003.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Charles H. Townes, *How the Laser Happened: Adventures of a Scientist*, Oxford University Press, 2002.
- [2] <http://www.nobel.se/>
- [3] Richard Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb*, Simon & Schuster, 1987.
- [4] National Research Council, *Frontiers in High Energy Density Physics: The X-Games of Contemporary Science*, National Academies Press, 2003.
- [5] Chandrashekar Joshi, "Plasma Accelerators", *Scientific American*, **294**, 2006, pp. 41- 47.

# EXPOSIÇÃO

# à luz de EINSTEIN 1905-2005

Coimbra

Museu Nacional  
da Ciência  
e da Técnica  
Doutor Mário Silva

16 de Maio  
a 24 de Novembro  
de 2006



Colégio das Artes [antigo Hospital UC] Praça D. Dinis | 10h > 18h • Segunda > Sábado | Tel: 239 851 940 | [mnct@mnct.pt](mailto:mnct@mnct.pt) | [www.mnct.pt](http://www.mnct.pt)



Programa Operacional Ciência e Inovação 2010  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

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

Espalhadas pela imensidão do Universo encontram-se galáxias, muitas galáxias. Durante décadas tentámos estudá-las, procurando compreender o nosso lugar no Cosmos. Justamente quando pensávamos que as peças do puzzle se iam encaixar, eis que surgem novos dados que põem em causa aquilo que se julgava correcto. Novas observações do Universo em comprimentos de onda para além do visível, nos raios X, no infravermelho, nas ondas de rádio, estão hoje a revelar uma realidade insuspeitada. Envoltas na escuridão óptica, encontram-se populações de galáxias que, muito mais do que meras curiosidades, parecem ser a chave para a compreensão do Universo. Discutiremos aqui os esforços mais recentes para detectar e estudar estas galáxias e compreender a sua origem e importância.

JOSÉ AFONSO

Observatório Astronómico de Lisboa

Tapada da Ajuda

1349 - 018 Lisboa

jafonso@oal.ul.pt

# EM BUSCA DAS PERDIDAS

Nos últimos anos temos assistido a um crescimento muito rápido da Astronomia, fruto de novos telescópios e tecnologias que colocam hoje ao alcance da observação directa a maior parte do Universo. Novos detectores, em particular em janelas do espectro electromagnético até há pouco tempo inacessíveis à observação humana, como é o caso dos raios X, dos infravermelhos ou do rádio, permitem hoje vislumbrar um Universo que é radicalmente diferente daquele que nos aparece em observações no visível, um Universo vibrante onde a poeira está omnipresente e forma uma barreira intransponível para os comprimentos de onda que os nossos olhos se aperfeiçoaram a detectar.

Em particular, a compreensão da formação e evolução de galáxias desde os tempos mais remotos parecia ainda recentemente estar prestes a ser alcançada, fruto de observações ópticas cada vez mais sensíveis que rapidamente atingiriam a detecção das primeiras galáxias do Universo. Teorias relativamente complexas foram desenvolvidas para explicar as observações, o que conseguiam com um sucesso apreciável. Contudo, a crescente acessibilidade de observações do Universo remoto em outros comprimentos de onda rapidamente revelou lacunas substanciais no nosso conhecimento. Por exemplo, a descoberta recente de um número considerável de galáxias remotas (cuja luz demorou cerca de 10 mil milhões de anos a chegar até nós), observadas num Universo relativamente jovem (com cerca de um quarto da idade actual, estimada em aproximadamente 13,4 mil milhões de anos), mas com características de galáxias idosas [1], coloca grandes problemas às teorias existentes. A formação das galáxias é necessariamente empurrada para o passado, para uma época em que se julgava que o Universo ainda não possuía estes objectos. Curiosamente, esta descoberta surge da selecção de galáxias

# GALÁXIAS

com base em observações astronómicas, não no visível, mas no infravermelho. É exactamente nos comprimentos de onda mais “recentes” na Astronomia que estamos a encontrar exemplos de galáxias que não entram nos censos realizados no visível, que não são de todo detectadas mesmo nas imagens mais profundas hoje possíveis. O que levanta sérias dúvidas sobre a validade de modelos de formação e evolução de galáxias elaborados, em grande parte, com base em observações no visível. Se até há pouco tempo as galáxias “invisíveis” eram vistas como curiosidades, em número insuficiente para modificar a percepção óptica, hoje a situação inverte-se. Fruto de um número cada vez maior de levantamentos noutras bandas do espectro electromagnético, começamos a perceber que estas galáxias não são casos raros e que, pelo contrário, temos ignorado vastas populações de objectos com propriedades extremas, no mínimo importantes e provavelmente mesmo fundamentais para a compreensão da formação e evolução das galáxias no Universo.

Nas secções seguintes, usando os resultados de um dos levantamentos mais profundos e completos jamais realizados, procura-se mostrar o que é investigado actualmente no âmbito da detecção e estudo de populações de galáxias invisíveis. É certamente um dos campos mais exigentes da investigação astronómica actual, mas sem dúvida também um dos mais surpreendentes e recompensadores.

## GREAT OBSERVATORIES ORIGINS DEEP SURVEY

Conhecer a história das galáxias necessita de observações extremamente sensíveis, capazes de detectar estes aglomerados de estrelas, gás e poeira às maiores distâncias. Já que

não conseguimos seguir a vida de uma galáxia desde a sua formação até ao seu eventual desaparecimento, pois as escalas de tempo envolvidas podem mesmo ser maiores que a idade do Universo, há que detectar um número significativo (e representativo) de indivíduos, varrendo todas as etapas importantes da vida desta população. Contudo, identificar e caracterizar galáxias requer a sua detecção no maior número possível de bandas do espectro electromagnético, já que diferentes comprimentos de onda nos fornecem perspectivas diferentes de um determinado objecto. O *Great Observatories Origins Deep Survey* (GOODS) é um projecto cujo objectivo é reunir as observações astronómicas mais sensíveis, obtidas quer a partir do espaço, quer a partir da superfície terrestre, para fornecer a primeira (e por enquanto única) visão pancromática do Universo distante capaz de desvendar muitos dos mistérios do passado das galáxias [2]. Duas regiões do céu, já observadas intensivamente num ou noutro comprimento de onda no passado recente, foram seleccionadas para este ambicioso programa de investigação: o *Hubble Deep Field North* (HDFN) e o *Chandra Deep Field South* (CDFN). No total, uma área de 0,1 grau quadrado tem vindo a ser observada com o telescópio espacial *Hubble* (no visível), o telescópio espacial *Spitzer* (infravermelho), o observatório de raios X *Chandra*, e com telescópios terrestres de última geração como o *Very Large Telescope*, o *Subaru*, os *Keck* (no visível e no infravermelho próximo), o *Very Large Array*, o *Australia Telescope Compact Array* e o *Giant Metrewave Radio Telescope* (em radiofrequências). No âmbito do GOODS, o uso de qualquer um destes telescópios exige apenas que ele seja levado até próximo dos seus limites operacionais.

As observações com o GOODS têm permitido reunir a amostra mais representativa de galáxias invisíveis, a partir das suas observações profundas em raios X, infravermelho e rádio.

## Os raios X: perfurando o casulo de um buraco negro

No domínio dos raios X, o alvo principal das observações astronómicas extragalácticas reside, sem dúvida, nas galáxias que albergam buracos negros supermassivos em grande actividade. Pensa-se hoje que a maior parte das galáxias possui, no seu centro, um buraco negro com massa de muitos milhões de massas solares. Não sendo brilhante em si mesmo, este buraco negro gigantesco provoca frequentemente uma actividade intensa em seu redor, capturando gás e matéria na sua forte atracção gravitacional, e forçando-os a órbitas de raio cada vez menor e com velocidade cada vez maior. Choques mútuos dentro deste fluido de matéria provocam o seu aquecimento, atingindo temperaturas tais que toda a região emite profusamente raios X. As galáxias nas quais esta actividade é mais intensa designam-se por Núcleos Galácticos Activos (NGA).



Vários modelos foram desenvolvidos para explicar as observações de raios X. Essencialmente, espera-se que a maior parte das galáxias reveladas num levantamento profundo em raios X mostre NGA, sendo que a maior parte deles se encontrarão muito obscurecidos pelas quantidades enormes de poeira que rodeiam o buraco negro central e que podem mesmo impedir a detecção destas galáxias no visível. Os levantamentos mais profundos efectuados em raios X revelaram uma grande variedade de fontes, entre as quais os já esperados NGA, com graus variados de obscurecimento e situados até distâncias muito elevadas, galáxias opticamente normais mas luminosas em raios X (o que revela porventura um NGA completamente escondido no visível) e fontes de raios X opticamente fracas ou mesmo inexistentes.

As observações de raios X do GOODS, obtidas pelo *Chandra*, são as mais sensíveis jamais efectuadas. A existência de observações ópticas que são igualmente as mais profundas que a astronomia pode actualmente obter tornam este projecto indicado para identificar galáxias de raios X literalmente invisíveis.

No CDFS, por exemplo, sete detecções inequívocas em raios X não são detectadas nas observações ópticas do *Hubble* [3]. Na Fig. 1 podemos ver as imagens destas

fontes, no visível segundo as observações do *Hubble* e no infravermelho próximo a partir de observações com o *New Technology Telescope* do Observatório Europeu do Sul (ESO). Apesar de serem inexistentes no visível, algumas destas fontes são detectadas no infravermelho próximo. Lembra-se que, no caso de galáxias ricas em poeira, a emissão no visível será bastante atenuada mas que, graças aos maiores comprimentos de onda, o infravermelho próximo é bastante menos obscurecido. É, pois, provável que estas sete fontes sejam NGA extremamente obscurecidos por poeira. De algum modo, mesmo as regiões destas galáxias mais afastadas do NGA não são suficientemente intensas no visível (ou são também obscurecidas) para serem detectadas. Uma distância elevada poderá ajudar a compreender este mistério, mas infelizmente, sem indicações do visível, torna-se extremamente difícil estimar uma distância a estas galáxias.

#### Os infravermelhos e a universalidade da poeira

Desde a missão do *Infrared Astronomical Satellite* (IRAS) em meados da década de 80, que sabemos da existência de galáxias opticamente normais que apresentam um brilho extraordinário nos infravermelhos. Muitas destas galáxias ultraluminosas no infravermelho (conhecidas como ULIRG<sup>1</sup>) devem o seu brilho a uma formação de estrelas

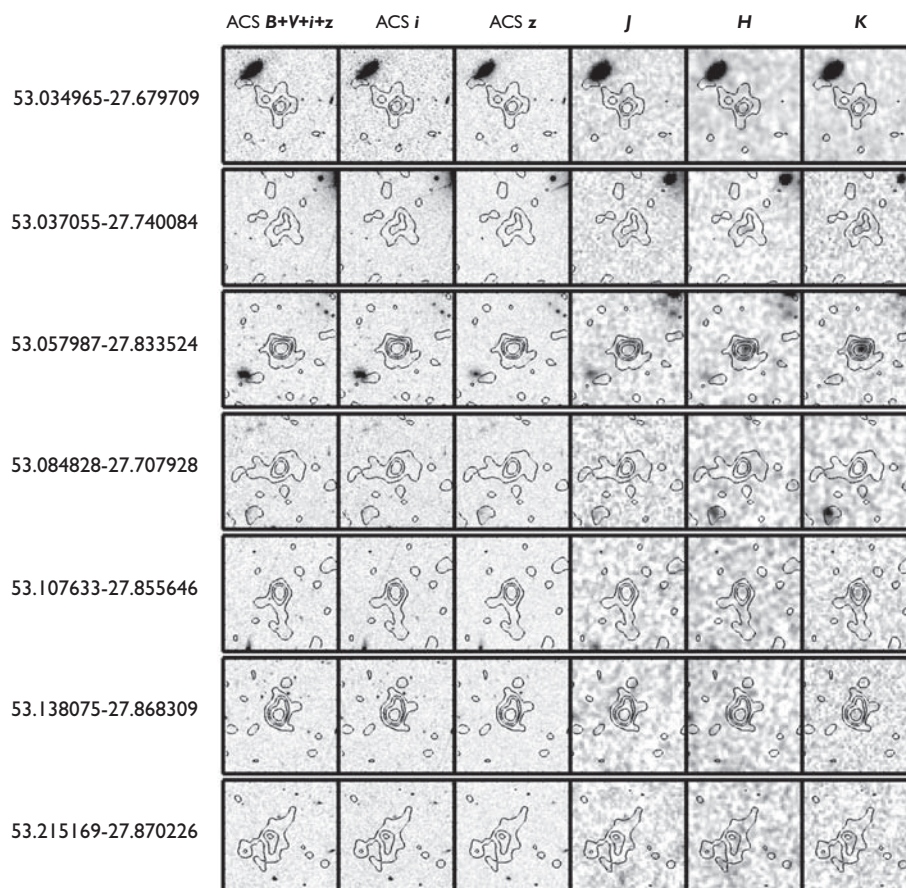


Fig. 1 - A visão no visível e infravermelho próximo das sete fontes de raios X do CDFS não detectadas pelo telescópio espacial *Hubble*. Cada imagem mostra uma região de 15"×15". Os contornos representam o brilho em raios X (0,5-8 keV) revelado pelas observações do observatório de raios X *Chandra*. As três primeiras colunas mostram a visão fornecida pelo telescópio espacial *Hubble* (instrumento ACS), em primeiro lugar a imagem conjunta nas bandas B (4350 Å), V (6060 Å), i (7750 Å) e z (8500 Å), depois a imagem na banda i seguida da imagem na banda z. As três colunas seguintes mostram a imagem obtida no *New Technology Telescope* do ESO nas bandas do infravermelho próximo J (1,25 µm), H (1,65 µm) e K (2,2 µm) (de Koekemoer et al. 2004).

intensa, centenas ou milhares de vezes superior à da Via Láctea, cuja taxa de formação estelar média é de cerca de uma massa solar por ano. Esta tremenda actividade é, na quase totalidade dos casos, despoletada por uma colisão com uma galáxia vizinha [4]. Tal formação de estrelas, que tem lugar em ambientes extremamente ricos em poeira, pode ser totalmente obscurecida no visível, sendo revelada no infravermelho devido à emissão própria desta poeira aquecida a temperaturas de dezenas de kelvin. A lei do deslocamento de Wien justifica então uma elevada luminosidade no infravermelho longínquo ( $\sim 50\text{-}200\ \mu\text{m}$ ). Algumas das galáxias reveladas nestes comprimentos de onda mostram também um NGA; neste caso, a emissão no infravermelho continua a ser essencialmente devida a poeira, mas que pode atingir, nas proximidades do NGA, temperaturas de centenas de kelvin, o que resulta num aumento do brilho no infravermelho médio ( $\sim 5\text{-}20\ \mu\text{m}$ ).

Na década de 90, o *Infrared Space Observatory* (ISO) revelou que estas galáxias ricas em poeira não só existem no Universo local, mas são comuns no Universo longínquo. O grau de poeira que contém é tal que podem não ser detectadas no visível mesmo nas observações mais sensíveis que se fazem na actualidade.

As observações em infravermelho estão neste momento a ser efectuadas no GOODS. Para tal está a ser utilizado o telescópio espacial *Spitzer*, o terceiro grande observatório de infravermelhos, em funcionamento desde Agosto de 2003. Uma particularidade deste telescópio é que, ao contrário do que sucedeu com o IRAS e o ISO, que foram colocados em órbita terrestre, o *Spitzer* encontra-se mais distante, numa órbita heliocêntrica e afastando-se lentamente da Terra. Esta localização é benéfica para observações no infravermelho, já que os instrumentos devem ser arrefecidos até poucos graus acima do zero absoluto, e qualquer missão em órbita geocêntrica encontra temperaturas superiores a 250 kelvin. Na sua órbita, o *Spitzer* atingiria, sem arrefecimento, 30 a 40 kelvin, pelo que a criogenia necessária para arrefecer os instrumentos é menos exigente do que para uma missão em órbita terrestre.

Os primeiros resultados das observações do CDFS com o *Spitzer*, a 3,6, a 4,5, a 5,8 e a 8,0  $\mu\text{m}$  (infravermelho médio) são já bastante impressionantes. Foram encontrados vários exemplos de fontes sem qualquer correspondente nas imagens do telescópio espacial *Hubble* (Fig. 2). Em particular, as fontes de raios X indicadas na secção anterior aparecem, na quase totalidade, reveladas nestas observações no infravermelho. Enquanto se espera pela divulgação das observações do *Spitzer* a comprimentos de onda mais elevados, mais sensíveis a galáxias com formação intensa de estrelas, parece de facto ganhar consistência a hipótese de estar a ser revelada a existência no Universo de uma população apreciável de NGA completamente obscurecidos. Mais

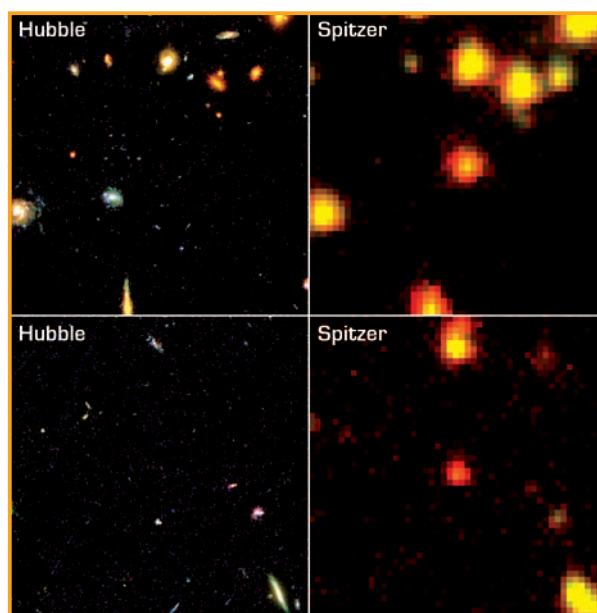


Fig. 2 - Duas das fontes identificadas no infravermelho médio pelo *Spitzer* no CDFS (à direita, no centro das imagens) e sem qualquer detecção no visível nas observações obtidas com o telescópio espacial *Hubble* (à esquerda). Cortesia da NASA, JPL-Caltech e STScI.

ainda, mesmo as eventuais populações estelares nas galáxias que albergam estes NGA encontram-se para além da detecção óptica: será um caso de distância extremamente elevada, de presença generalizada de poeira e conseqüente obscurecimento, ou talvez de inexistência destas populações estelares, eventualmente pela inibição da formação estelar provocada pelo NGA?

### Radiofrequências e os primeiros “monstros” do Universo

Apenas nos últimos 40 anos a radioastronomia se tornou uma verdadeira ferramenta para a compreensão do zoo de galáxias distantes. Foram efectuados levantamentos em rádio com limites de detecção cada vez menores, tendo-se revelado um número elevado de quasares<sup>2</sup> e galáxias elípticas gigantes frequentemente exibindo jactos que se estendem muito para além do volume ocupado pela própria galáxia. A emissão de ondas de rádio por estes objectos provém da sua região central, onde existe um NGA. A turbulência resultante do influxo de matéria para esta região origina jactos relativistas na direcção do eixo de rotação do buraco negro; a aceleração destas partículas energéticas no campo magnético produzido pelo NGA provoca emissão de sincrotrão que é observada no rádio.

Nas densidades de fluxo mais baixas, no regime de sub-mJy<sup>3</sup>, começam também a ser detectadas galáxias sem um NGA mas com formação intensa de estrelas [5], porventura ULIRG despoletadas numa colisão entre galáxias. O facto



de a formação de estrelas acontecer em regiões muito ricas em poeira e as radiofrequências não serem afectadas pelo obscurecimento resultante tem suscitado um interesse cada vez maior em levantamentos de rádio ultra-profundos para detectar galáxias (ópticamente) obscurecidas.

Face ao tipo de galáxias que os levantamentos de rádio mais sensíveis podem revelar, quer NGA, quer galáxias com formação intensa de estrelas, eventualmente afectadas por obscurecimento elevado no visível, surge como natural o interesse de associar observações no rádio ao projecto GOODS, como meio de identificar populações de galáxias invisíveis, detectadas no rádio mas não nas imagens ópticas mais profundas.

Recorrendo ao *Australia Telescope Compact Array* (ATCA), o CDFS foi recentemente observado durante cerca de 120 horas a 1,4 GHz (comprimento de onda de 20 cm). O limite de detecção atinge os 63  $\mu$ Jy, sendo uma das observações mais sensíveis a estas frequências. Na região mais central do CDFS, onde foram efectuadas as observações ópticas com o *Hubble*, são detectadas 64 radiogaláxias que, recorrendo à informação proveniente das observações nos outros comprimentos de onda disponíveis, são identificadas como galáxias com formação estelar intensa ou NGA com graus de obscurecimento variável [6]. Contudo, sete destas radiogaláxias não mostram qualquer correspondente no visível (Fig. 3), sendo apenas uma delas identificada nos raios X e três identificadas nas observações do *Spitzer*

no infravermelho médio. Novamente uma população de galáxias “invisíveis” aparece numa observação profunda do Universo em comprimentos de onda para além do visível. Neste caso, as possibilidades para a natureza destas galáxias são várias: tal como anteriormente, podem ser galáxias com formação estelar e/ou NGA, mas com um grau de obscurecimento tal e/ou a uma tal distância que a sua detecção óptica é impossível. A detecção nos raios X de uma destas fontes aponta de facto para um NGA obscurecido, podendo as outras seis ser semelhantes mas a distâncias tão elevadas que a detecção no visível e mesmo nos raios X não é possível com os telescópios e instrumentação actual. Recorde-se que a sensibilidade dos radiotelescópios actuais aliada à luminosidade que os NGA podem atingir permitiriam detectar um destes objectos no rádio a qualquer distância. A dificuldade consistiria em reconhecer uma tal galáxia recorrendo unicamente a observações no rádio. O visível ou o infravermelho próximo, em particular através de espectroscopia, são hoje ainda essenciais para estimar a distância a uma galáxia, algo necessário para a sua caracterização. Neste ponto das observações apenas podemos dizer que cerca de 10% das galáxias detectadas no rádio com fluxos entre alguns microjansky e os milijansky não são detectadas opticamente até magnitudes ópticas extremamente baixas e que, potencialmente, poderemos estar a observar os primeiros NGA do Universo.

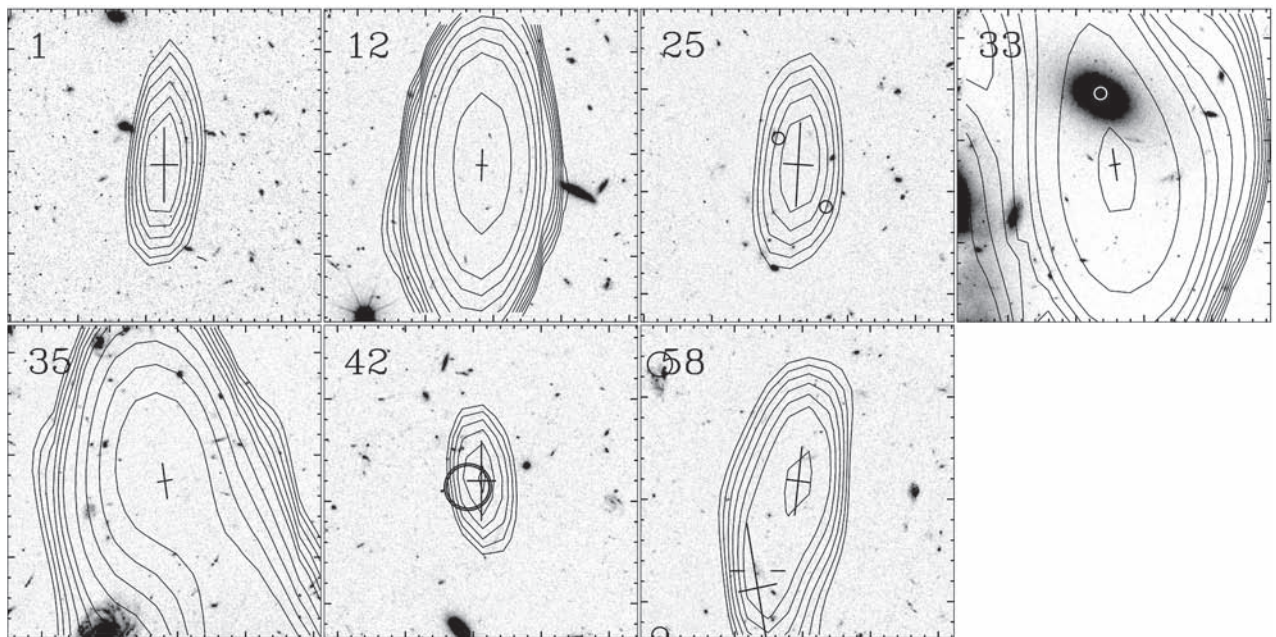


Fig. 3 - As sete radiogaláxias no CDFS sem identificação óptica. Nas imagens conjuntas B+V+i+z construídas a partir das observações do *Hubble*, que compreendem uma região de 30"×30", encontram-se indicadas as posições das fontes de rádio (cruz), fontes de raios X (círculos) e a emissão em rádio (diagramas de contorno). O número no canto superior esquerdo corresponde ao do catálogo presente em Afonso *et al.*, 2006.



## O FUTURO

Embora as populações de galáxias invisíveis reveladas nos raios X, infravermelhos e rádio pareçam ter alguma sobreposição (como seria de esperar), esta não é completa. Há pois que considerar números de galáxias que escapam aos nossos levantamentos ópticos (mesmo os mais sensíveis) que podem ser apreciáveis. Por terem características extremas (elevadas luminosidades, por exemplo), estas populações contribuirão significativamente para o cômputo geral de quantidades tão representativas como a formação estelar global ou a actividade de buracos negros supermassivos ao longo da história do Universo. A contribuição para a radiação cósmica de fundo em todos estes comprimentos de onda deve também ser substancial.

O problema, contudo, persiste na caracterização destas galáxias. O próprio facto que as torna interessantes – não serem detectadas no visível – impossibilita que as estudemos com ferramentas que se encontram desenvolvidas nestes comprimentos de onda. A espectroscopia óptica, por exemplo, permite distinguir claramente entre um NGA e a formação estelar, quando estes fenómenos são detectados, e mesmo quantificar o grau de obscurecimento que afecta uma galáxia (no caso de valores não muito elevados). Ainda assim, existem actualmente vários programas de estudo destas galáxias, limitados às detecções que podem de facto ser efectuadas. O CDFS encontra-se neste momento a ser observado pelo *Giant Metrewave Radio Telescope*, na Índia, a uma radiofrequência de 327 MHz (90 cm). Esperamos que a comparação do brilho nas várias radiofrequências com os raios X e infravermelhos possa fornecer indicações sobre a natureza destas galáxias. Contudo, a questão apenas poderá ser resolvida com a próxima geração de telescópios e instrumentação astronómica.

Dois telescópios surgem no horizonte próximo. Na próxima década o telescópio espacial *James Webb*, um telescópio com um espelho principal de 6 metros optimizado para o infravermelho próximo e médio, será suficientemente poderoso não só para detectar muitas destas galáxias mas para realizar espectroscopia da radiação por elas emitida. A partir do ponto de Lagrange L2 do sistema Terra-Sol, este telescópio funcionará durante alguns anos detectando e estudando as galáxias mais distantes do Universo.

Já daqui a dois ou três anos começarão a ser instalados os primeiros telescópios de milímetro do projecto *Atacama Large Millimetre Array* (ALMA). Por volta de 2014, mais de 50 destas “antenas” varrerão o céu em busca de galáxias invisíveis, detectando o seu brilho na região do espectro electromagnético entre o infravermelho e o rádio. O ALMA será mesmo capaz de realizar espectroscopia de alta resolução destas galáxias no milímetro, uma região do espectro electromagnético rica em transições de elementos

como o carbono, ou moléculas como o monóxido de carbono. Estas observações mostrarão de imediato as condições físicas nestas galáxias, revelando quer a sua distância quer a sua natureza.

E então, finalmente, as galáxias perdidas serão encontradas...

## REFERÊNCIAS

- [1] Cimatti *et al.*, “Old galaxies in the young Universe”, *Nature*, **430**, (2004), 184.
- [2] Giavalisco *et al.*, “The Great Observatories Origins Deep Survey: Initial Results from Optical and Near-Infrared Imaging”, *Astrophysical Journal*, **600**, (2004), 93.
- [3] Koekemoer *et al.*, “A possible new population of sources with extreme X ray/optical ratios”, *Astrophysical Journal*, **600**, (2004), 123.
- [4] Sanders and Mirabel, “Luminous Infrared Galaxies”, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, **34**, (1996), 749.
- [5] Afonso *et al.*, “The Phoenix Deep Survey: Spectroscopic Catalog”, *Astrophysical Journal*, **624**, (2005), 135.
- [6] Afonso *et al.*, “Optical and X-ray identifications of faint radio sources in the GOODS-S ACS field”, *Astronomical Journal*, **131** (2006), 1216.

## NOTAS

<sup>1</sup> *UltraLuminous Infrared Galaxy*

<sup>2</sup> Quasares (*quasi-stellar radio sources*) são fontes muito brilhantes no rádio que apresentam um aspecto pontual, semelhante a uma estrela, no visível. A luminosidade destes objectos é tão elevada que podem ser detectados até aos limites do Universo observável.

<sup>3</sup> 1 jansky (Jy) =  $10^{-26}$  W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup>

Discute-se o modelo físico-matemático usado para descrever o Universo: o *Modelo Cosmológico Padrão* ou *Modelo do Big Bang*. Descrevem-se os seus sucessos. Mostra-se como o modelo se pode compatibilizar com observações recentes. Especula-se sobre a natureza do *Big Bang*.

CARLOS HERDEIRO  
Departamento de Física  
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto  
Rua do Campo Alegre, 687  
4169-007 Porto

crherdei@fc.up.pt

# UMA BREVE HISTÓRIA DO UNIVERSO: DO BIG BANG AO UNIVERSO ATUAL

## ALGUMAS ESCALAS NO UNIVERSO

Por definição, pensamos no Universo como tudo o que existe. Planetas, estrelas, galáxias, enxames de galáxias, etc. Porque estão envolvidas escalas verdadeiramente gigantescas, usamos uma régua própria: o tempo que a luz demora a percorrer essas escalas. Nestas unidades, a distância Terra-Lua é aproximadamente 1 segundo luz. Pelo mesmo diapasão, a distância Terra-Sol é aproximadamente 8 minutos luz. O tamanho do sistema solar é da ordem de 5 horas luz, aproximadamente o raio médio da órbita de Plutão. A estrela mais próxima do Sol é a *Proxima Centauri*, a cerca de 4,2 anos luz, que é parte de um sistema estelar triplo. A nossa galáxia, a Via Láctea, tem um diâmetro de cerca de 100000 anos luz, uma dimensão que começa a parecer gigantesca, mas que é insignificante quando comparada com a dimensão estimada do Universo observável: cerca de 13,7 mil milhões de anos luz!

## O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO

Os leitores mais cépticos estarão a interrogar-se sobre como é que podemos estimar a última dimensão dada na secção anterior. Estarão também a interrogar-se como será possível modelar um sistema tão complexo como o Universo, ou mesmo sobre o que significa *modelar* o Universo. As respostas a estas perguntas têm um factor comum, cuja história começa em Novembro de 1915. Nesse mês, Albert Einstein chegou à forma final da sua Teoria da Relatividade Geral, uma teoria da gravitação compatível com os princípios da Relatividade Restrita, introduzida em 1905, o que não acontecia com a velha Teoria da Gravitação Newtoniana. A teoria de Einstein previa alguns efeitos

# TÓRIA DO BIG BANG ACCELERADO

diferentes dos previstos pela teoria newtoniana, que viriam a confirmar a primeira. Conceptualmente, Einstein compreendera que podia modelar a interação gravítica como a *geometria do espaço e do tempo*. Isso significa, em particular, que o espaço e o tempo podem ser *dinâmicos*. O que permitiu compreender que o Universo, que é feito de espaço e de tempo e do que neles vive, pode ser dinâmico; pode ter tido um princípio e pode vir a ter um fim. Essa dinâmica é descrita pelas equações matemáticas da Relatividade Geral que, ainda que sem explicação, vale a pena contemplar:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1)$$

Na expressão anterior  $R_{\mu\nu}$  é o tensor de Ricci,  $g_{\mu\nu}$  o tensor métrico,  $R$  é o escalar de Ricci,  $T_{\mu\nu}$  designa o tensor energia-momento,  $G$  é a constante de gravitação universal e  $c$  a velocidade da luz no vázio.

Modelar o Universo significa compreender a dinâmica do espaço-tempo a que nós chamamos Universo, o que pode ser feito usando as equações (1). Mas, apesar do formalismo matemático bem definido, é necessário simplificar o problema para se tornar tratável. Esta simplificação chama-se *Princípio Cosmológico*. O conteúdo deste princípio é que o Universo é *homogéneo e isotrópico*. Isto é um princípio extremamente democrático! Significa que, em larga escala – e a Cosmologia debruça-se sobre a estrutura do Universo em larga escala – o Universo é semelhante em todos os locais e em todos os locais todas as direcções são equivalentes. Essencialmente, isto diz-nos que o Universo tem uma enorme simetria, e deixa (quase) como único grau de

liberdade para a dinâmica do Universo um *factor de escala*, que se representa como  $a(t)$ , e que nos informa do modo como o *tamanho* do Universo varia com o tempo cósmico. Com esta simplificação, a única liberdade que resta ao cosmólogo é escolher vários tipos de conteúdo material para o modelo do Universo; isto é, escolher se são electrões, quarks, fotões ou outras formas mais exóticas de matéria-energia os constituintes do Universo a incluir no modelo e em que quantidades. Fixando-as, as equações (1) dizem-nos como se comporta o factor de escala, ou seja, como é que o tamanho do Universo evolui no tempo.

No *Modelo Cosmológico Padrão* o conteúdo do Universo é escolhido de um modo conservador: a matéria e a radiação que bem conhecemos. Calculando o conseqüente factor de escala, obtemos um modelo que descreve apropriadamente três observações fundamentais, que se denominam os *pilares do Modelo Cosmológico Padrão*.

## Primeiro pilar: a expansão cósmica

Em 1924, o astrónomo norte-americano Edwin Hubble fez um estudo sistemático do desvio para o vermelho da radiação recebida de outras galáxias e da distância às mesmas. Com base neste estudo publicou, em 1929, um diagrama – *o diagrama de Hubble* (Fig.1) – em que obtinha uma relação linear entre estas duas quantidades: quanto maior é a distância a uma determinada galáxia, maior é o desvio para o vermelho (*redshift*) da radiação proveniente dessa galáxia. Interpretando o desvio para o vermelho como *efeito Doppler*, isto é, devido ao movimento relativo entre o emissor e o receptor de radiação, concluiu-se das observações de Hubble que, genericamente, *todas as galáxias se estão a afastar de nós!* E quanto maior a distância à galáxia em questão, maior a velocidade de recessão da mesma relativamente a nós. Ora, pelo Princípio Cosmológico, a nossa posição no Cosmos nada tem de especial; logo todas as galáxias devem estar a afastar-se umas das outras.

Esta observação era facilmente integrável na teoria da Relatividade Geral, que trata o espaço-tempo como dinâmico. O holandês Willem de Sitter em 1917, o russo Alexander Friedmann, em 1922 e 1924, e o belga George Lemaître, em 1927, já haviam, antes da descoberta de Hubble, estudado modelos de universos em expansão usando a teoria de Einstein. Na descrição desta teoria, o movimento de recessão das galáxias não resulta de nenhuma velocidade peculiar das mesmas; é, literalmente, o espaço que estica, e as galáxias têm um movimento natural, co-móvel com esta dinâmica do espaço. Tal como pontos na superfície de um balão que é insuflado. Invertendo a seta temporal, o espaço contrai. Se no passado nada tiver invertido o processo, o espaço terá contraído tanto, que o factor de escala se terá reduzido a zero. Alexander Friedmann

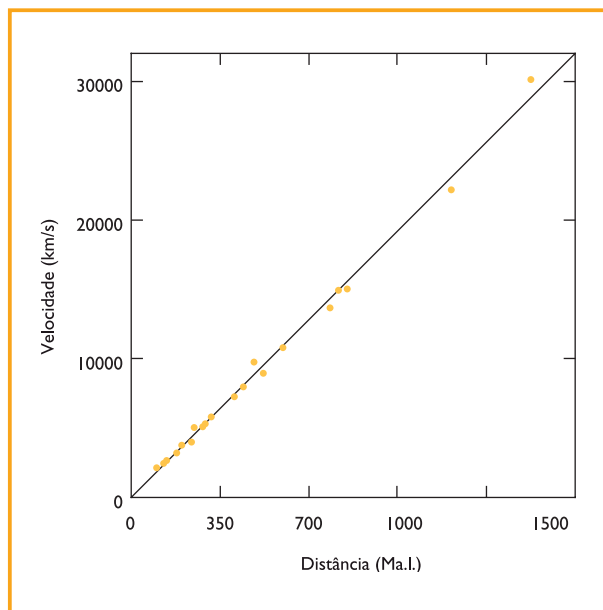


Fig. 1 - Lei de Hubble: existe uma relação linear entre a velocidade de recessão das galáxias e a distância às mesmas. A distância é apresentada em megaparsecs.

introduziu, em 1922, a ideia de um estado inicial com uma densidade muito elevada, se não infinita. Mas foi George Lemaître que popularizou a ideia de um átomo primordial – aquilo a que hoje chamamos o *Big Bang* – o popular termo cunhado em 1949 por Fred Hoyle.

### Segundo pilar: a radiação cósmica de fundo

O Universo primitivo deverá ter sido não só extraordinariamente denso, mas também extraordinariamente quente. Um estudo quantitativo da temperatura do Universo foi feito em 1948, por um grupo de cientistas liderados por George Gamow, da Universidade George Washington, nos EUA. Gamow e colaboradores concluíram que deverá ter existido uma era primordial em que a densidade de energia da radiação terá sido superior à da matéria. Apesar de a densidade de energia da radiação diminuir mais bruscamente com a expansão do que a densidade de energia da matéria – pelo que eventualmente na evolução cósmica a densidade de energia da matéria começou a dominar – deverá existir ainda hoje um vestígio dessa radiação primordial, a inundar todo o Universo em equilíbrio térmico. Gamow e os seus colaboradores estimaram que esta *Radiação Cósmica de Fundo (RCF)* deveria ter presentemente uma temperatura entre os 5 e os 40 graus kelvin.

Num desenvolvimento paralelo, rádioastrónomos tinham encontrado, em estudos sobre emissões de baixa energia por moléculas no espaço interestelar, um ruído persistente e sem explicação óbvia. Em 1965, Arno Penzias e Robert

Wilson, dos Laboratórios Bell, sistematicamente eliminaram todas as possíveis fontes de ruído do seu receptor rádio em Holmdell, New Jersey, tendo chegado a um nível de ruído irremovível, aparentemente com origem extraterrestre, com a temperatura de cerca de 3 graus kelvin. No mesmo ano, Robert Dicke, James Peebles e colaboradores, refizeram a análise do grupo de Gamow e identificaram a radiação encontrada por Penzias e Wilson como a *RCF*, a assinatura de um *Big Bang* quente. Pela sua importantíssima descoberta, ainda que algo fortuita, Penzias e Wilson receberam, em 1978, o prémio Nobel da Física.

A *RCF* é mais do que uma relíquia do Universo primordial. É uma fotografia do Universo bebé, não na altura do parto, mas sim com a tenra idade de cerca de 300 000 anos. Com esta idade, a temperatura do Universo desceu o suficiente para que a maior parte dos electrões e protões – que até aí se encontravam livres formando um plasma – se tivessem associado em hidrogénio neutro. Este acontecimento, o *desacoplamento matéria-radiação*, marca uma transição. Para trás fica um nevoeiro luminoso em que os fotões da *RCF* estavam constantemente a ser absorvidos e emitidos por electrões livres. Para a frente fica um Universo transparente onde os fotões da *RCF* têm um enorme livre percurso médio. Alguns chegam mesmo até aos nossos olhos, hoje.

Apesar de esta radiação ser essencialmente isotrópica, há pequenas anisotropias – cerca de 1 parte em 10000 – que reflectem as flutuações de densidade da matéria-energia no Universo bebé. São estas pequenas perturbações de densidade, estudadas pelos satélites COBE (1992) e WMAP (2003), que irão evoluir para se tornarem as galáxias, estrelas e planetas do nosso Universo (Fig. 2).

### Terceiro pilar: a nucleossíntese primordial

A partir do *Big Bang*, o Universo expande-se. Ao expandir-se as condições físicas tornam-se mais “amenas”: a densidade de matéria-energia diminui, tal como a temperatura. Da sopa primordial de partículas fermiónicas elementares – quarks e leptões, de acordo com o modelo padrão da física de partículas –, começam a emergir estados ligados, à medida que a energia disponível nesta sopa deixa de ser suficiente para vencer energias de ligação. Formam-se nucleões – protões e neutrões – como estados ligados de quarks e, entre 1 e 200 segundos depois do *Big Bang*, alguns núcleos de elementos leves são sintetizados. Para além do prótio  $^1\text{H}$ , formam-se dois outros isótopos do hidrogénio, o deutério  $^2\text{H}$  e o trítio  $^3\text{H}$ , formam-se dois isótopos do hélio,  $^3\text{He}$  e  $^4\text{He}$ , dois isótopos do lítio,  $^6\text{Li}$  e  $^7\text{Li}$ , e um isótopo do berílio,  $^7\text{Be}$ .

Em particular, cerca de 25% dos nucleões são convertidos em núcleos de  $^4\text{He}$ . Estima-se que nos restantes cerca de 13,7 mil milhões de anos do Universo, milhões de estrelas



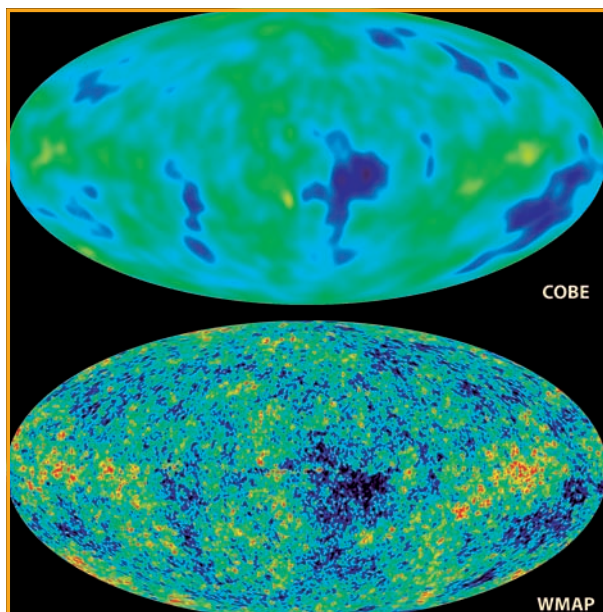


Fig. 2 - Mapa das anisotropias da radiação cósmica de fundo feita pelo satélite COBE e refinada pelo WMAP.

têm trabalhado arduamente, para converter cerca de 2% do restante hidrogénio do Universo em hélio. Assim só a nucleossíntese primordial, extremamente natural à luz do modelo do *Big Bang* quente pode explicar a abundância de hélio-4 e de deutério no Universo. É interessante observar que, na nucleossíntese primordial, nenhum elemento com número atómico superior a quatro foi formado. Os elementos com número atómico superior foram formados nas estrelas. Assim sendo, o Universo teria de esperar até à morte da primeira geração de estrelas para, numa segunda geração de estrelas e planetas, poder existir carbono, oxigénio e vida como a conhecemos.

### O QUE FICA EM ABERTO NO MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO ?

Consideremos uma experiência simples. Atiremos uma pedra ao ar. O que observamos? Ela cai, obviamente. Contudo, existe, ainda que teoricamente, um desfecho diferente. Se lançarmos a pedra ao ar com uma velocidade inicial superior à velocidade de escape da Terra, a pedra escapa à gravidade da Terra e não volta a cair. A questão pode ser reformulada: a pedra cai (não cai) se a força da gravidade da Terra for (não for) suficiente para travar a sua ascensão. Note-se que, em qualquer dos casos, o movimento ascendente é desacelerado.

A evolução do Universo é análoga. Existem duas possibilidades. Ou o Universo expandirá para sempre ou a sua expansão será travada e ele começará a contrair, voltando eventualmente a colapsar num ponto. A questão pode ser

formulada de uma maneira análoga à experiência da queda dos graves: a explosão inicial do Universo transmite-lhe um movimento de expansão que terminará (não terminará) se a força gravítica for suficiente (insuficiente) para travar a expansão. Note-se que, em qualquer dos casos, o facto de a força da gravidade ser atractiva implica que a expansão é desacelerada. No caso de parar, ao que se seguirá uma época de contracção, o Universo denomina-se *fechado*, e prevê-se uma nova singularidade cósmica – por vezes denominada *Big Crunch*. No caso de não parar, o Universo denomina-se *aberto*, e prevê-se uma morte térmica, quando todo o hidrogénio for convertido em hélio e todo o hélio em elementos mais pesados; a determinada altura terminará o combustível e dar-se-á, sem apelo nem agravo, a crise energética universal, para a qual não se vislumbra recurso a energias alternativas...

Até 1998, a questão que se colocava era em qual destes dois tipos de Universo é que nós vivemos. Mas estava uma surpresa, ainda por cima carregada de ironia, à nossa espera ao virar da esquina.

### UMA MUDANÇA DE PARADIGMA: A ACELERAÇÃO PRESENTE DO UNIVERSO

Dois anos depois de ter formulado a Teoria da Relatividade Geral, Einstein dedicou-se à Cosmologia, tendo chegado à insatisfatória conclusão (do seu ponto de vista) de que as equações (1) não admitiam um universo estático como solução. Einstein tinha o preconceito filosófico de que o Universo era estático, e decidiu alterar as suas equações, da única maneira que, em quatro dimensões espaço-temporais, era possível fazê-lo consistentemente. Incluiu um *termo cosmológico* que contém uma constante,  $\Lambda$ , denominada, *constante cosmológica*. As equações (1) foram substituídas por

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (2)$$

O problema de Einstein era análogo a conseguir colocar uma pedra em equilíbrio a uma determinada altitude no planeta Terra. A pedra quer cair devido à força gravítica. Para a manter em equilíbrio a uma certa altitude é necessário uma outra força, com sentido oposto, que equilibre a força gravítica. Para manter um universo em equilíbrio com um determinado factor de escala, é necessário equilibrar a atracção que as partes do universo exercem umas sobre as outras, por nelas existir matéria-energia. O termo cosmológico é interpretado fisicamente como uma pressão, ou “anti-gravidade”, e pode equilibrar o universo com um determinado factor de escala. Desta maneira, Einstein

descobriu uma solução estática (mas instável), hoje denominada Universo estático de Einstein. Mas, na década de 1920, Hubble descobre a expansão do Universo e Einstein classifica a constante cosmológica como “o seu maior erro”...

Em 1998, duas equipas (Riess *et al.* e Perlmutter *et al.*) obtiveram dados relativos à observação de supernovas extremamente longínquas. Das suas observações podia-se deduzir o desvio da linearidade da relação *redshift*-distância e deduzir não a velocidade, mas a aceleração do Universo. Os resultados mostraram que, ao contrário do que era geralmente aceite, a expansão do Universo é acelerada. O significado físico desta conclusão é que o tipo de matéria-energia dominante no Universo origina gravidade repulsiva. Embora impossível à luz da gravitação newtoniana, “gravidade repulsiva” é possível na teoria da gravitação relativista. A constante cosmológica de Einstein é um exemplo de matéria-energia que origina gravidade repulsiva e o mais forte candidato ao papel de “acelerador” do Universo.

Mas, fisicamente, a que corresponde este tipo de “matéria-energia”? Ou, mais genericamente, qual é o conteúdo de matéria-energia que existe no Universo? Acreditamos hoje que no Universo existe matéria bariónica, matéria escura e energia escura. Matéria bariónica é tudo o que “vemos”, isto é, que emite/reflecte radiação electromagnética. Matéria escura é algo que não “vemos”, mas inferimos dinamicamente a sua presença. O mais conhecido exemplo desta inferência dinâmica é dado pelas curvas de rotação galácticas. Imaginemo-nos num carrossel em andamento, com uma velocidade angular elevada, de modo a que, para não sermos “cuspidos” pela força centrífuga, temos de nos agarrar fortemente (criar uma força centrípeta) a um varão. Sabendo a velocidade angular do carrossel podemos calcular a força centrífuga e, como tal, a força centrípeta necessária para não sermos ejetados. Estudos de curvas de rotação galácticas demonstraram que a matéria visível presente na galáxia não consegue justificar a força gravítica (centrípeta) necessária para explicar a não ejeção das estrelas na periferia da galáxia, cujas velocidades de rotação podem ser calculadas. É necessária mais matéria – a matéria escura. Qual é a sua natureza? Há vários candidatos, desde neutrinos massivos a buracos negros ou ainda partículas exóticas, nenhum dos quais reúne consenso da comunidade científica. Há ainda quem advogue que poderão existir alterações às leis da gravidade a grandes distâncias.

Finalmente, a *energia escura*, que acelera o Universo. O folclore na comunidade é que a sua origem estará na energia de ponto zero de campos quânticos, que é uma consequência directa do princípio da incerteza de Heisenberg. Contudo, as dificuldades no tratamento da gravitação quântica têm impedido estimativas quantitativas; e as que se podem fazer diferem da magnitude da constante cosmológica necessária para explicar a aceleração do Universo

por dezenas de ordens de grandeza. O problema está, pois, completamente em aberto. O que sabemos, à luz dos dados do satélite WMAP, é que cerca de 73% do conteúdo matéria-energia do Universo é energia escura, 23% matéria escura e apenas 4% matéria visível ou bariónica. Para além da nossa ignorância, concluímos que, de facto, o Universo é dominado pelo “lado escuro”...

## E O QUE PODEMOS DIZER À CERCA DO BIG BANG?

Será o *Big Bang* a criação? Ou haverá um pré-*Big Bang*? Modelos cosmológicos onde existe um pré-*Big Bang* têm surgido em duas classes. Numa primeira classe, à medida que caminhamos para o passado, o factor de escala nunca chega a zero, isto é, o Universo nunca colapsa num ponto. A determinada altura ele volta a expandir, num “ressalto cosmológico” ou *bounce* cosmológico. A razão é que algum tipo de matéria-energia que origina gravidade repulsiva começa a dominar a evolução do Universo, exactamente como na época presente. Numa segunda classe de modelos, o factor de escala torna-se zero, mas esta singularidade tem uma interpretação física. Existem modelos baseados em teoria de cordas deste tipo. Relativamente aos modelos em que o *Big Bang* é a criação do nosso Universo há grandes dificuldades; existiram algumas tentativas, na década de 1980, inspiradas em física das partículas e lideradas por Stephen Hawking que argumentavam a possibilidade de “nucleação” do nosso Universo. Mas estas ideias requerem implicitamente a existência de um hiper-espaço onde o nosso Universo é criado e nesse sentido não é a criação de *tudo*.

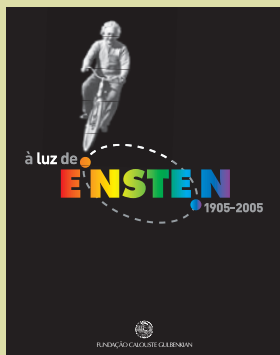
O desafio é, obviamente, enorme. Mas, dado o espantoso sucesso do modelo cosmológico padrão, também é enorme o estímulo de ir mais longe na nossa compreensão do Universo. Certamente o futuro trará muitas surpresas. E, provavelmente, citando Arthur C. Clarke, “*a realidade será, como sempre, bem mais estranha do que a ficção*”.

## REFERÊNCIAS

[1] Para saber mais sobre o Modelo Padrão da Cosmologia, recomenda-se o livro *Cosmology: the science of the Universe*, Edward Harrison, Cambridge University Press, segunda edição, 2000, que faz a ponte entre um livro de divulgação científica e um livro técnico.

[2] Para saber mais sobre a aceleração presente do Universo, recomenda-se o artigo “Astronomy: Cosmic Motion Revealed”, James Glanz, *Science*, vol. 282, 1998, p.2156-2157; também disponível em <http://www.sciencemag.org/cgi/content/full/282/5397/2156a>.

## EXPOSIÇÃO "À LUZ DE EINSTEIN" EM COIMBRA



"à luz de Einstein 1905-2005"

Coordenação de Ana Maria Eiró e Carlos Matos Ferreira  
Fundação Calouste Gulbenkian, 2005.

Depois de exibida em Lisboa, na Fundação Calouste Gulbenkian, entre Outubro de 2005 e Janeiro deste ano, a exposição "**à luz de Einstein 1905-2005**" está agora patente ao público em Coimbra, nas instalações do Museu Nacional da Ciência e da Técnica Doutor Mário Silva, no Colégio das Artes (antigo hospital da Universidade), até ao dia 24 de Novembro de 2006.

Esta exposição foi organizada no âmbito do Ano Internacional da Física que, em 2005, assinalou o centenário de 1905, ano em que Einstein publicou quatro trabalhos que vieram a revolucionar a física, sendo, por isso, um marco histórico da física moderna.

A exposição inicia-se com um percurso histórico, que ilustra a evolução do conhecimento da Natureza ao longo de 2400 anos, desde a Grécia Antiga, berço da filosofia natural, até aos finais do século XIX, quando a nova ciência física triunfou plenamente. Segue-se uma referência à vida e obra de Einstein, em particular aos seus trabalhos de 1905, após o que a exposição se desenvolve em torno de temas da luz e da matéria, mostrando importantes progressos científicos dos últimos cem anos. Percorre-se o caminho desde a descoberta do electrão à moderna microelectrónica e desde a descoberta do fóton até à óptica dos lasers, mostrando como estas realizações permeiam as tecnologias da vida contemporânea. Mostra-se ainda como a física permitiu aprofundar o conhecimento sobre a vida e o corpo humano, e os benefícios que daí têm resultado na nova qualidade de vida. Finalmente, apresenta-se a visão actual do Universo e da sua evolução, tal como é revelado pela física actual.

Explicar os conceitos e realizações da física que estão por detrás da exposição, descrevendo cada um dos módulos, é o objectivo do catálogo, com o mesmo título da exposição, que está à venda para acompanhar o visitante durante e depois da visita. Nele, cada um dos responsáveis científicos pelas diversas áreas expositivas escreveu a respectiva história.

Na **Biblioteca do Saber**, Ana Simões conduz o leitor/visitante por um percurso através de 2400 anos de interrogações sobre o mundo físico, dos gregos até ao tempo de Einstein. Apresentam-se seis espaços, associados a seis filósofos da natureza/cientistas, e um conjunto de objectos emblemáticos da forma de fazer ciência associada a esses lugares. Os espaços seleccionados conduzem-nos do liceu aristotélico à universidade

de medieval, a uma corte renascentista, a uma sociedade científica, a um gabinete de física e, finalmente, a uma universidade do século XIX.

Depois deste percurso histórico, entra-se na descoberta do "novo mundo", que começa com a **Ruptura de 1905**, espaço/artigo dedicado à vida e obra de Albert Einstein, em particular aos seus trabalhos revolucionários de 1905. Das novas ideias apresentadas, Paulo Crawford destaca a dualidade onda-corpúsculo, que está na base da física quântica, e o conceito de espaço-tempo que vem substituir as velhas noções de espaço e tempo absolutos.

O espaço/artigo seguinte, o **Mundo dos Electrões** criado por Pedro Brogueira e Luis Viseu Melo, desenvolve-se em torno do electrão, descoberto no final do século XIX. Com ele, e com a mecânica quântica, se iniciou a revolução electrónica, fortemente impulsionada a meio do século XX com a invenção do transistor e do circuito integrado. Essa minúscula partícula carregada, "operário incansável" dos nossos dispositivos electrónicos, é também a onda que permite a observação nos microscópios electrónicos.

A natureza da luz, que Einstein também ajudou a compreender; deu lugar a grandes revoluções, como a invenção do laser nos anos 50. Esta nova luz, tornou-se uma ferramenta fundamental no desenvolvimento tecnológico das sociedades modernas. Na **Câmara da Luz**, Luís Oliveira e Silva e João Mendanha explicam as propriedades da luz, desde a geração de luz laser; passando pela detecção e transmissão de luz visível ou invisível, até ao armazenamento e codificação da informação que a luz pode transportar:

O século XX trouxe uma nova luz sobre o mundo. Vivemos de um modo diferente porque a **Física está em toda a parte**, como explica Gonçalo Figueira no seu artigo. Nele se mostra como as actividades comuns da vida moderna seriam impossíveis se a física não estivesse por detrás delas. O leitor é convidado a partir à descoberta da física numa viagem pelo quotidiano e a investigar as suas aplicações na cultura e nas comunicações.

A nossa qualidade de vida está também relacionada com o que foi possível conhecer sobre nós próprios. Com luzes visíveis ou invisíveis e aparelhos de medida que a física moderna permitiu desenvolver; conseguimos hoje observar a anatomia e a actividade de órgãos, tecidos e artérias no interior do corpo humano, perceber as suas funções, diagnosticar doenças, por vezes tratar e curar. Isto nos explica Teresa Peña no seu artigo **Luz sobre a Vida**, dando-nos pistas do modo como, a partir de medições de sinais eléctricos, estamos a aprender como é que os sentidos captam informação e o cérebro a processa.

No último espaço/artigo Rui Agostinho lança **Luz sobre o Cosmos**. Hoje podemos desvendar a verdadeira estrutura e composição do Universo, medir a abundância primordial dos elementos, a radiação cósmica de fundo e a velocidade e aceleração das galáxias. Aprendemos que o Universo está em expansão, desde o *Big Bang*, que foi origem do espaço-tempo, entendemos a formação e a composição das estrelas assim como a estrutura das galáxias, descobrimos planetas extra-solares, etc.

O catálogo é um convite à aventura da ciência, uma aventura sem fim. Esperamos que a sua leitura proporcione o prazer da descoberta e também um conhecimento adicional que permita olhar o mundo com os olhos mais abertos.

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 D 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

$$\text{neutrão} \rightarrow \text{protão} + \text{electrão} + \text{antineutrino.}$$

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.

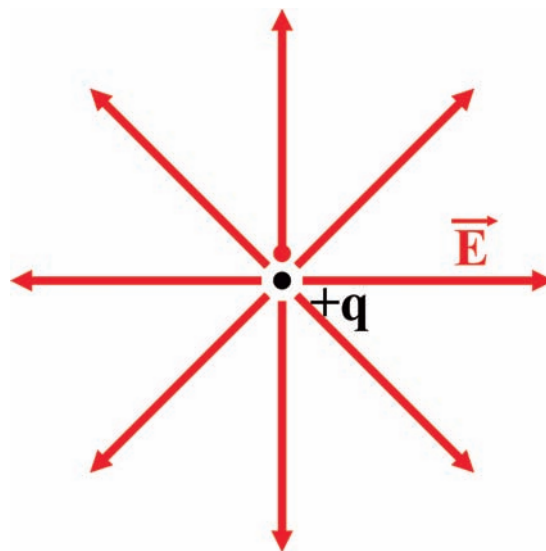


Fig. 1 Campo eléctrico criado por uma carga positiva, fornecendo uma representação visual da lei de Coulomb.

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:

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

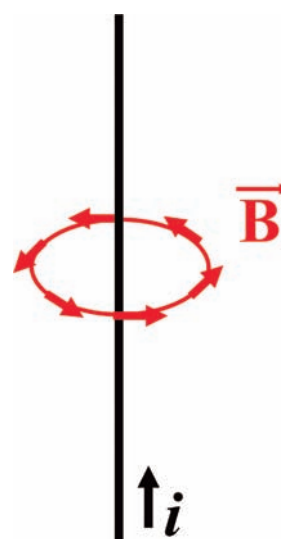


Fig. 3 Campo magnético criado por um fio percorrido por corrente eléctrica, permitindo uma representação esquemática da experiência de Oersted.

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

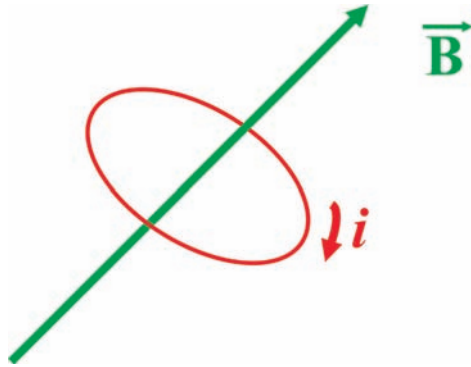


Fig. 4 Será que o campo magnético que atravessa uma espira provoca o aparecimento de uma corrente induzida nessa espira?

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.

Chama-se *fold*ing de proteínas ao processo espontâneo a partir do qual uma cadeia linear de aminoácidos adquire uma estrutura tridimensional biologicamente activa. A compreensão deste fenómeno, considerada por muitos um dos problemas mais importantes da ciência actual, terá um grande impacto não só ao nível da saúde e do bem-estar humanos como também ao nível da ciência fundamental, na aprendizagem e aquisição de novas leis e conceitos da física dos sistemas complexos. Tendo surgido no contexto da biologia molecular, este problema é hoje claramente interdisciplinar, necessitando de ferramentas de várias áreas do conhecimento, e para o qual o contributo da física tem sido determinante. O objectivo deste artigo é mostrar como a utilização de metodologias da física, incluindo o recurso à simulação computacional de modelos simples, permitiu criar uma estrutura conceptual (a chamada "paisagem de energia") sobre a qual uma sinergia exemplar entre a teoria e a experiência tem gerado avanços muito significativos.

PATRÍCIA F. N. FAÍSCA

Centro de Física Teórica e Computacional da  
Universidade de Lisboa  
Av. Prof. Gama Pinto 2,  
1649-003 Lisboa

patnev@cii.fc.ul.pt

<http://alf1.cii.fc.ul.pt/~patnev>

# O MISTÉRIO DA DAS PROTEÍNAS

## Experiências *in vitro*: a hipótese termodinâmica

As proteínas são robôs celulares, máquinas moleculares construídas à escala do nanómetro, capazes de executar de uma forma espontânea e programada todas as tarefas essenciais à manutenção da vida. Por exemplo, as enzimas aceleram reacções químicas que de outro modo seriam demasiado lentas, os anticorpos são moléculas responsáveis pela identificação e eliminação de agentes invasores e as hormonas asseguram a transmissão de informação entre as células.

Para que possa funcionar correctamente, cada proteína deve exibir uma estrutura tridimensional **única** que determina a sua função biológica. É a chamada estrutura nativa, que emerge como produto final de um processo complexo envolvendo o enrolamento e a dobragem (*fold*ing, em inglês) da cadeia de aminoácidos que compõe a proteína, designada por estrutura primária. Christian Anfinsen foi dos primeiros cientistas a interessar-se pela compreensão dos princípios físicos envolvidos no processo de *fold*ing de proteínas. Por que razão se dobra a proteína para a estrutura nativa? Por que é única essa estrutura? Estas foram duas das questões fundamentais para as quais procurou resposta durante toda a década de 1950. Com a ajuda dos seus alunos de pós doutoramento Fred White e Michael Sela, Anfinsen dirigiu uma série de experiências que culminaram com a elaboração da chamada hipótese termodinâmica (HT), trabalho que foi galardoado com o Prémio Nobel da Química de 1972. A HT é baseada na observação de que o processo de *fold*ing ocorre de uma forma espontânea conduzindo, por isso, a um estado – o estado nativo – que é o mais estável (de mais baixa energia) do ponto de vista termodinâmico. Por outro lado, Anfinsen também

# FORMA

FGRCELAAAMKRHGLD  
 RGYSLGNWVCAAKFES  
 NTQATNRNTDGGSTDYG  
 QINSRWWCNDGRTPGS  
 LCNIPCSALLSSDITA  
 NCAKKIVSDGNMNAW  
 WRNRCKGTDVQAWIRG  
 FRTHYUWVLIJMMRTY  
 WRNRCKGTDVQAWIRG  
 OINSRWWCNDGRTPGS

?

→

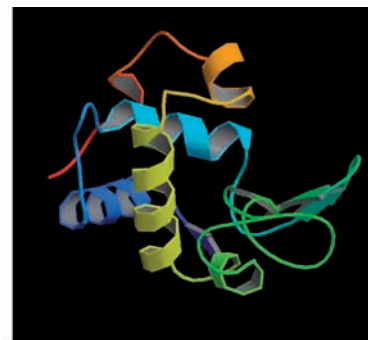


Fig. 1 - Como determinar a estrutura nativa de uma proteína a partir do conhecimento da sua estrutura primária?

concluiu que a estrutura nativa tem necessariamente de ser determinada pela sequência de aminoácidos (ou mais rigorosamente, pela totalidade de interações entre os aminoácidos que compõem a proteína) já que, para além da própria proteína, não é necessária a participação de nenhuma outra molécula no processo.

Os resultados das experiências de Anfinsen foram o ponto de partida para um novo problema, para o qual ainda hoje procuramos uma solução: como determinar a estrutura tridimensional de uma proteína partindo apenas do conhecimento da sequência de aminoácidos que constitui a estrutura primária? É claro que este problema (conhecido como *protein folding problem*) pode ser tomado como corolário da questão fundamental que consiste em compreender os mecanismos envolvidos neste importante processo biológico.

### Folding de proteínas: um problema importante

A vida depende largamente da existência e do funcionamento correcto de uma quantidade enorme de proteínas. Às vezes, muitos dos processos celulares de controlo e regulação em que essas proteínas estão envolvidas falham, ou porque o organismo não é de todo capaz de as produzir, ou porque são fabricadas com defeito. Como a função da proteína depende estritamente da sua estrutura nativa, basta que esta última exiba uma pequena falha para que a proteína passe a não funcionar correctamente. Patologias comuns, como a diabetes de tipo I e a hemofilia, ocorrem porque o organismo é incapaz de produzir a insulina e o factor VIII, respectivamente. Já certos tipos de cancro resultam da produção defeituosa de uma proteína

que participa na regulação da divisão celular, o factor p21Ras. Outras patologias, como as encefalopatias espongiiformes, entre as quais a BSE ou doença das vacas loucas, estão na origem de um processo de *folding* defeituoso do qual resultam proteínas (na realidade, agentes infecciosos chamados príões) que, tendo uma grande afinidade entre si, se agregam para formar uma espécie de fibras. Estas fibras actuam sobre o tecido neuronal do sistema nervoso central e o desfecho pode ser dramático. Estas patologias têm sido denominadas “doenças dos tempos modernos” porque resultam em parte da existência de condições completamente novas, criadas pelas actividades desenvolvidas pelo homem, que são capazes de desafiar e pôr em risco a homeostase (ou controlo) dos processos bioquímicos normais. A solução para problemas deste tipo passa por sermos capazes de fornecer a proteína em falta ao organismo, de uma forma artificial, ou por inactivar a proteína infecciosa, através da administração de uma droga para a qual a primeira tenha uma grande afinidade, quer de um ponto de vista estrutural quer energético. Encontrar uma droga que se “encaixe” numa certa proteína da melhor forma possível é um problema típico no *design* de drogas. É claro que se compreendermos a relação sequência-estrutura, poderemos “desenhar” qualquer proteína (ou qualquer outra droga que seja específica para uma certa proteína). Mas, para que isto seja possível, precisamos primeiro de compreender a questão fundamental de como se processa o *folding* de proteínas. À frente veremos como é que a física e o recurso à simulação computacional têm tido um papel fundamental na elucidação deste processo.

### O paradoxo de Levinthal e os caminhos de *folding*

Em 1968, Cyrus Levinthal, um físico de formação que se converteu ao estudo da biologia molecular, levantou uma séria objecção à ideia de que a procura do estado nativo possa ser feita de forma aleatória, tal como era sugerido pela HT. O argumento de Levinthal, simples e eficaz,



baseava-se na seguinte experiência conceptual (*gedanken experiment*). Consideremos uma pequena proteína com 100 aminoácidos e suponhamos que cada aminoácido só pode estar num de dois estados possíveis (por exemplo, só pode tomar duas orientações diferentes). Nestas condições, a proteína tem acesso a um total de  $2^{100} \approx 10^{30}$  conformações, total esse que inclui obviamente a estrutura nativa. Como a molécula não pode passar de uma conformação para a outra em menos de 1 picossegundo (ps), que é o tempo de uma vibração térmica, seriam precisos  $2^{100}$  ps, ou seja,  $3,9 \times 10^{10}$  anos, no mínimo, para explorar exaustivamente todo o espaço conformacional e encontrar a conformação (que é apenas uma!) correspondente ao estado nativo. Ora, acontece que esta escala de tempo é da ordem de grandeza da idade do Universo, estimada em  $1,4 \times 10^{10}$  anos. Estamos assim perante um problema, já que o *foldings* de proteínas deste tamanho leva no máximo alguns segundos, e tipicamente ocorre na escala temporal do nanossegundo ou do segundo. A conclusão que daqui se tira é que a HT não consegue explicar a escala de tempo característica do processo de *foldings* de proteínas.

Por razões óbvias, este problema ficou conhecido como o paradoxo de Levinthal e foi o próprio Levinthal o primeiro a sugerir uma solução. Levinthal teorizou a existência de um “caminho” de *foldings* específico (*foldings pathway*), composto por vários estados intermediários – um pouco à semelhança do que se passa numa reacção química vulgar – no fim do qual se encontra o estado nativo. No entanto, e ao contrário do sugerido pela HT, o estado nativo na proposta de Levinthal não corresponde necessariamente ao mínimo global da energia, não tem que ser o estado termodinamicamente mais estável. Corresponde, isso sim, ao estado de energia mínima mais acessível de um ponto de vista cinético.

Como consequência da proposta de Levinthal, a investigação experimental em *foldings* de proteínas até ao início da década de 1990 foi em grande parte dominada pela procura de produtos intermediários de *foldings* suficientemente estáveis para que pudessem ser isolados e devidamente caracterizados. No entanto, a descoberta em 1991 de uma pequena proteína, com cerca de 100 aminoácidos, que se dobra rapidamente sem passar por quaisquer intermediários, mostrou que a existência de intermediários estáveis não é de todo um requisito essencial para a rapidez do processo.

A perspectiva clássica do *foldings* de proteínas baseia-se na dicotomia termodinâmica *versus* cinética e na abordagem tradicional da bioquímica, que considera cada molécula um sistema único, sendo por isso necessária uma descrição detalhada, à escala atómica, do seu caminho de *foldings*. Como veremos adiante, uma das contribuições mais importantes da física para a compreensão deste fenómeno foi precisamente a de reconciliar as perspectivas de Anfinsen e

Levinthal no quadro de uma teoria unificada, que se baseia na natureza estatística do processo.

### Folding in silico I: dinâmica molecular

De acordo com Christian Anfinsen, se conhecermos a totalidade das interacções que se estabelecem entre os átomos de uma proteína, devemos, em princípio, poder prever qual será a estrutura tridimensional adoptada pela cadeia de aminoácidos que contém esses átomos. Mas será fácil essa tarefa? De uma forma simplificada, podemos dizer que as interacções entre os átomos são de natureza electrostática e quântica. É claro que, dentro das interacções electrostáticas, temos que distinguir várias categorias (interacções de Lennard-Jones, de van der Waals, pontes de hidrogénio, de solvatação com as moléculas de água, etc.). Uma proteína como a hemoglobina, que transporta o oxigénio aos alvéolos pulmonares, contém cerca de 4000 átomos que podem, em princípio, interagir durante o processo de *foldings*. Para todos os pares de interacção possíveis é então preciso saber quanto valem os “parâmetros” de interacção correspondentes. O cálculo rigoroso destas quantidades requer um tratamento quântico e não é de todo trivial. Para além disso, há que ter em conta que o resultado do cálculo depende não só do tipo de átomo mas também do ambiente químico em que se encontram os átomos participantes na interacção, o que gera complicações adicionais. Geralmente, este tipo de cálculo faz-se no contexto das simulações por dinâmica molecular (DM). Trata-se de simulações deterministas que modelam a proteína como sendo um sistema newtoniano de  $N$  átomos ligados por molas. Para além das interacções electrostáticas entre os átomos, há ainda a considerar o cálculo dos parâmetros relativos às energias de alongamento, de torção e de dobragem da ligação química. Tudo isto implica o cálculo de um número extraordinariamente grande de parâmetros, que devem ser testados e refinados através de simulações que reproduzam a dinâmica do *foldings*. Se o conjunto de parâmetros for bom, a molécula, que na simulação é lançada numa conformação inicial arbitrária, deverá ser capaz de encontrar a sua estrutura nativa ao fim de um certo tempo.

As simulações por DM são extremamente exigentes do ponto de vista computacional. Se pensarmos que precisamos de um dia de CPU para simular um nanossegundo do processo de *foldings*, o que é uma estimativa razoável tendo em conta as capacidades de cálculo dos computadores de que dispomos actualmente, se uma proteína consumir  $10^4$  nanossegundos para encontrar o seu estado nativo, então precisaríamos de  $10^4$  dias de CPU, ou seja cerca de 30 anos, para simular o processo de *foldings* na totalidade. Isto é obviamente muito tempo para se esperar por apenas um resultado! É claro que existem super-com-

putadores capazes de simular mais do que um nanossegundo por dia e foi a eles que os dois cientistas americanos Yong Duan e Peter Kollman recorreram, em 1998, para fazerem a simulação por DM que é ainda hoje considerada “o estado da arte” nesta área. Estes investigadores simularam, ainda que apenas parcialmente, o processo de *folding* de uma pequena proteína com 36 resíduos e doze mil átomos, na presença de água, durante 1000 ns, o que correspondeu, na prática, à utilização de quatro meses de cálculo de CPU.

### Folding *in silico* 2: modelos de rede e o conceito de paisagem de energia

Do que foi exposto anteriormente fica claro que se uma simulação por DM for bem sucedida, conduzindo a proteína para o estado nativo, então ficamos a conhecer a relação sequência-estrutura para aquela proteína específica. Para qualquer outra proteína, teremos que fazer um estudo semelhante se quisermos modelar as interações reais entre os átomos que a compõem. Apesar de ser importante, este tipo de estudo tem a desvantagem de não permitir identificar os princípios gerais (universais) envolvidos no *folding* de proteínas, para além de ser muito exigente do ponto de vista computacional. Para tal devemos recorrer a modelos muito mais simples do que os usados em DM, os chamados modelos de rede. Nestes modelos, a proteína é representada apenas pela cadeia principal de aminoácidos e cada um destes por uma “esfera” que o identifica do ponto de vista químico. As esferas ocupam os nodos de uma rede e as ligações covalentes entre os aminoácidos, ao longo da cadeia, dispõem-se segundo as arestas desta rede (Fig. 2).

Dentro da classe dos modelos de rede, o modelo H-P (em inglês, *Hydrophobic-Polar*), que é um dos mais simples, tem como objectivo principal explorar o papel das interações entre os aminoácidos e as moléculas de água durante o processo de *folding*. Os aminoácidos podem ser classificados, de acordo com a sua afinidade para a água, em hidrofóbicos – que “não gostam” de água – ou polares – que “gostam” de água. No que se segue, veremos que, até mesmo sem fazer qualquer simulação computacional,

conseguimos perceber alguns aspectos importantes do problema do *folding* recorrendo a este modelo numa rede bidimensional. Uma diferença fundamental em relação aos modelos e simulações por DM é que neste caso não estamos interessados no detalhe à escala atómica; a proteína é modelada simplesmente como uma cadeia de esferas de diferentes cores conforme a sua espécie química. No caso do modelo H-P, essas esferas são de apenas duas cores diferentes. Na Fig. 2 os aminoácidos hidrofóbicos são representados a branco e os polares a preto. A energia de interacção,  $\epsilon$ , entre aminoácidos é igual a zero, excepto entre pares de aminoácidos hidrofóbicos, para os quais vale -1. Além disso, e como as ligações entre os aminoácidos ao longo da cadeia não se quebram nunca durante o *folding*, apenas as interações ditas “de contacto” (a tracejado na Fig. 2) contam para a energia total de uma certa conformação, ou seja, de um certo arranjo geométrico da cadeia de aminoácidos sobre a rede. A energia total de uma conformação é assim a soma das energias de todos os pares de contacto que a conformação contém.

Na Fig. 3 estão representadas cinco conformações diferentes e as respectivas energias. Conformações diferentes podem ter energias diferentes (como é o caso de  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ ) mas também podem ter a mesma energia, por exemplo,  $\Gamma_4$  e  $\Gamma_5$ . Quando duas conformações diferentes apresentam a mesma energia dizem-se degeneradas.

Para além da degenerescência, estes exemplos servem para ilustrar um fenómeno ainda mais interessante, o fenómeno da “frustração”. Consideremos os aminoácidos 5 e 7 e os seus vizinhos, nas conformações  $\Gamma_4$  e  $\Gamma_5$ , respectivamente. Em  $\Gamma_4$ , o aminoácido 5, que é hidrofóbico, está em contacto com o aminoácido 8 da mesma espécie, numa interacção que é favorável a ambos, já que se trata de uma interacção que é estável do ponto de vista energético. Já os aminoácidos 6 e 7 não estabelecem qualquer interacção de contacto, e o aminoácido 4 estabelece uma interacção de contacto neutra (com energia igual a zero) com o aminoácido 1. Por outro lado, na conformação  $\Gamma_5$ , de certa forma os papéis invertem-se, e é o aminoácido 7 que passa a interagir favoravelmente com o aminoácido 4,

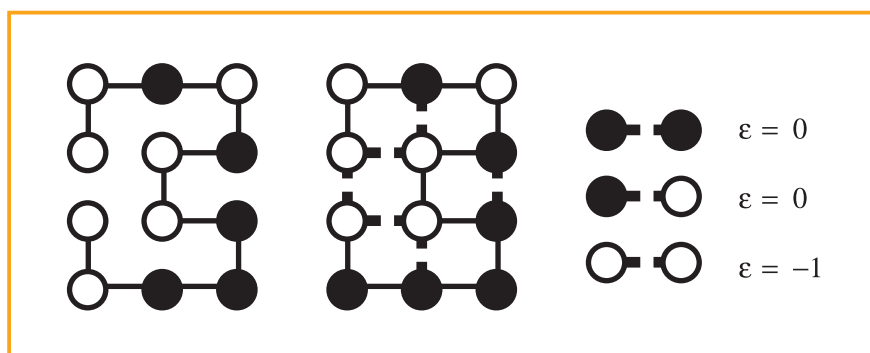


Fig. 2 Conformação de uma pequena proteína (péptido) e parâmetros de interacção no modelo H-P. Apenas as interações representadas a tracejado na figura do meio, contribuem para a energia total  $E$  da conformação representada, que é  $E=-3$ .

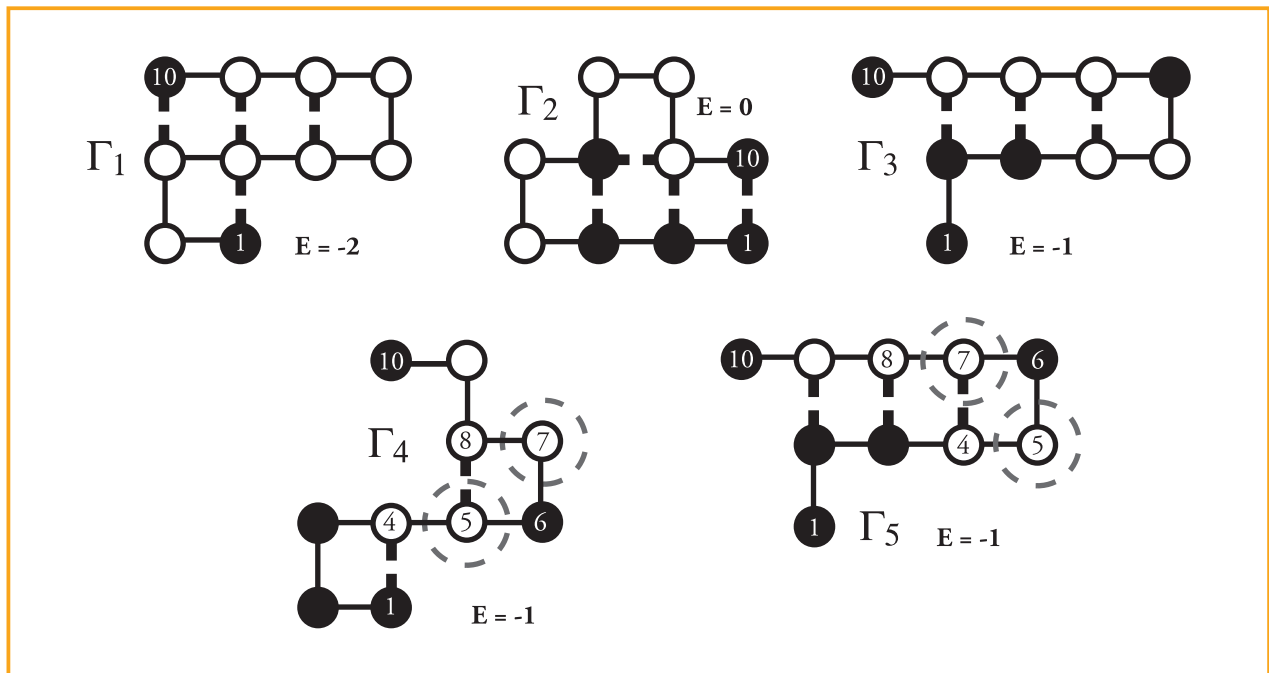


Fig. 3 Exemplo de cinco conformações diferentes e respectivas energias.

passando os aminoácidos 5 e 8 a estar desestabilizados. Diz-se que existe frustração, porque ao competirem entre si pelas posições que minimizam a energia de interação com os seus vizinhos, os aminoácidos não conseguem ficar todos igualmente estabilizados – não ficam igualmente “satisfeitos” com os seus parceiros de interação – em conformações que têm a mesma energia total. Ou seja, sem fazermos qualquer conta analítica ou simulação computacional o modelo H-P mostra que a degenerescência e a frustração são dois ingredientes fundamentais da energética do *fold*ing [2,3].

Chama-se paisagem de energia à dependência da energia na conformação,  $E=E(\Gamma)$ . Conformações de baixa energia, ou mínimos locais, encontram-se separadas umas das outras por barreiras de energia. A topografia desta paisagem de energia será tanto mais acidentada quanto maior for a frustração exibida pela proteína.

Um argumento simples mostra que, para uma proteína com  $N$  aminoácidos na rede quadrada, qualquer conformação fica completamente descrita por  $(N-2)$  graus de liberdade (que são os vectores que fixam a posição dos aminoácidos) e que o número total de conformações acessíveis é  $3^{(N-2)}$  [1]. Por exemplo, o peptídeo de 10 aminoácidos representado na Fig. 3 pode apresentar-se em  $3^8=6651$  conformações possíveis (das quais apenas 5 estão representados na figura), o que quer dizer que a sua paisagem de energia contém 6651 pontos. Mas esse número sobe para  $3^{98} \approx 6 \times 10^{46}$  conformações, se considerarmos uma proteína com  $N=100$ . Se, em vez da rede, estivermos no espaço

contínuo tridimensional, que é onde “vivem” as proteínas reais, os graus de liberdade necessários para descrever uma conformação – que neste caso passam a ser os comprimentos e os ângulos de ligação – deixam de tomar apenas valores discretos para passar a variar de uma forma contínua. Daqui resulta que, mesmo para proteínas pequenas, o número de conformações é *a priori* infinito e a função  $E(\Gamma)$  toma valores num espaço cuja dimensão é ainda da ordem do número de aminoácidos da proteína. Todos os pontos desse espaço, em vez de apenas um número grande mas finito, correspondem, em princípio, a conformações possíveis. Apesar desta diferença, também neste caso temos degenerescência e frustração, sendo os mecanismos que as explicam os mesmos que os do modelo discreto.

#### Folding de proteínas: a perspectiva moderna

Resultados de estudos analíticos e de simulações computacionais com modelos de rede mostraram que as escalas de tempo biológicas são apenas compatíveis com frustração mínima e que a topografia global da paisagem de energia deve ser em forma de funil. A largura do topo do funil reflecte o conjunto de todas as conformações acessíveis a uma proteína no início do *fold*ing. Estas são as conformações menos estáveis – de maior energia. É possível atingir o estado nativo partindo de qualquer uma dessas conformações iniciais e percorrendo um dos muitos caminhos de *fold*ing alternativos. Cada um desses caminhos corresponde a um conjunto de conformações diferentes, pelas quais a proteína passa até chegar à conformação nativa. À medida que

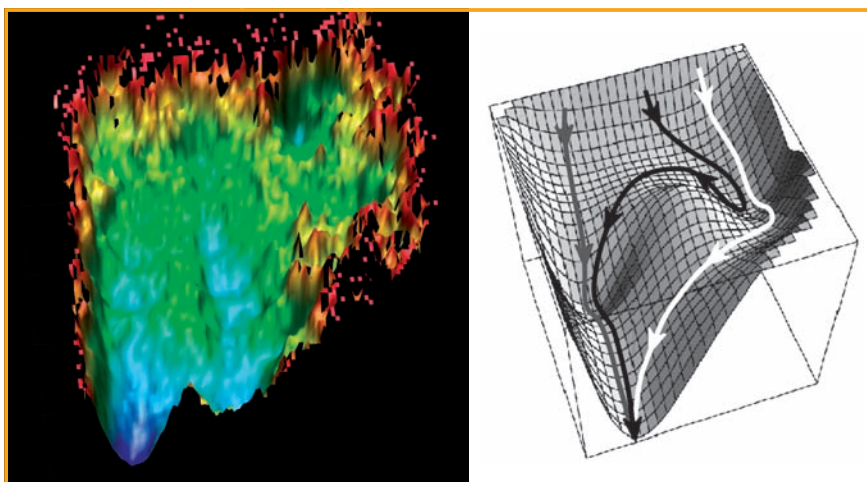


Fig. 4 Ilustração do conceito de paisagem de energia (esquerda) e paisagem de energia determinada experimentalmente (direita).

o *foldings* progride, não só a energia das conformações vai diminuindo, até atingir o mínimo global na conformação nativa, como também o próprio número de conformações acessíveis vai diminuindo até ser apenas um. Na realidade, a partir de certa altura, todas as trajectórias coalescem num caminho de *foldings* único, no final do qual se encontra o estado nativo (Fig. 4, esquerda).

Na Fig. 4 (direita) mostra-se a paisagem de energia de uma proteína real que foi determinada experimentalmente. Note-se que, neste caso, a proteína dispõe de três caminhos de *foldings* alternativos que conduzem todos ao estado nativo de forma diferente. A trajectória cinzenta é a trajectória ideal; é a que conduz mais rapidamente ao estado nativo. Já a trajectória branca envolve a transposição da maior barreira de energia desta paisagem, o que consome mais tempo e conduz a um *foldings* mais lento. Se seguir pela trajectória preta, a proteína ver-se-á a certa altura forçada a voltar atrás, passando por uma conformação que está mais longe da conformação nativa, para só depois “apanhar” o caminho rápido, ou seja a trajectória cinzenta.

Os conceitos de paisagem de energia e de funil de *foldings* conduziram àquilo a que se costuma chamar a “nova perspectiva do *foldings* de proteínas”, em oposição à perspectiva clássica que, como vimos, opunha Anfinsen (e a termodinâmica) a Levinthal (e a cinética). Na realidade, esta nova perspectiva reconcilia os pontos de vista daqueles dois cientistas. O estado nativo é realmente o estado termodinâmico mais estável – é o mínimo global da paisagem de energia – e a procura desse estado não é aleatória, embora não exista apenas um único caminho, como propôs Levinthal, mas sim vários, muitos caminhos de *foldings* possíveis.

A utilização de modelos de rede simples e a nova perspectiva do *foldings* de proteínas, que resultou largamente da aplicação destes modelos, foram sem dúvida ideias que, nos últimos dez anos, revolucionaram a nossa maneira de

pensar no mecanismo do *foldings*. Esta nova perspectiva, para além de conduzir a interpretações alternativas dos resultados experimentais clássicos, estimulou também, o que é talvez mais importante, o desenho de novas estratégias experimentais que têm permitido, a pouco e pouco, desvendar os detalhes destes complexos processos biológicos. Na realidade hoje em dia já sabemos muita coisa (os mais optimistas diriam até que se calhar já sabemos quase tudo) sobre o mecanismo do *foldings* de proteínas pequenas [4]. O mecanismo do *foldings* de proteínas grandes, esse, ainda permanece um grande mistério...

#### Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito dos projectos SFRH/BPD/21492/2005 e POCI/QUI/58482/2004.

#### BIBLIOGRAFIA

1. P. F. N. Faísca, “O mistério da forma das proteínas”, *O Código Secreto: À Descoberta dos padrões da Natureza*, Coordenação de Margarida Telo da Gama, Guilherme Valente, Ed., Gradiva, 2005, pp. 301-326.
2. Hue S. Chan e Ken A. Dill, “The protein folding problem”, *Physics Today* **46**, 1993, pp. 24-32.
3. Hans Frauenfelder e Peter G. Wolynes, “Biomolecules: Where the physics of simplicity and complexity meet”, *Physics Today* **47**, 1994, pp. 58-64.
4. P. F. N. Faísca e M. M. Telo da Gama, “Folding of small proteins: a matter of geometry?”, *Molec. Phys.* **103**, 2005, pp. 2903-2910.



A condensação de Bose-Einstein é um fenómeno surpreendente e as propriedades do estado da matéria que dela resulta – o condensado de Bose-Einstein (BEC) – são ainda mais “estranhas”, quando as comparamos com as propriedades dos sistemas macroscópicos com que lidamos na nossa experiência quotidiana.

Apesar de ter sido previsto por Einstein em 1925, só em 1995 foi possível observar o BEC, tendo para isso sido necessário produzir em laboratório um sistema à temperatura mais baixa do Universo. A descoberta experimental deste novo estado da matéria foi galardoada com o Prémio Nobel da Física de 2001.

Neste artigo, serão descritas as dificuldades associadas à descoberta do BEC e as singulares propriedades deste estado, assim como a sua relação com os fenómenos da supercondução e da superfluidez.

MARGARIDA M. TELO DA GAMA

Departamento de Física e Centro de Física Teórica e Computacional

da Universidade de Lisboa,

Av. Prof. Gama Pinto, 2, 1649-003, Lisboa

margarid@cii.fc.ul.pt

# ESTADOS ESTRANHOS DA MATÉRIA: SUPERCONDUTORES E SUPERFLUIDEZ

## BEC: um estado quântico à escala macroscópica

A Mecânica Quântica descreve a matéria e a luz em todos os seus detalhes, e, em particular, o seu comportamento à escala atómica. Nesta escala, o comportamento da matéria e da luz é bizarro, e afasta-se das imagens clássicas de “partículas” e “ondas”: a luz comporta-se por vezes “como a matéria”, e a matéria comporta-se também “como luz”. Contudo, estas novas ideias trazem consigo uma surpreendente simplificação. A matéria e a luz comportam-se exactamente da mesma forma, umas vezes como partículas e outras como ondas. Apesar de “estranho”, este comportamento pode ser previsto quantitativamente, e medido com grande precisão.

Richard Feynman defendia que todo o mistério da Mecânica Quântica é revelado na experiência da fenda dupla, que põe em evidência padrões de interferência para fótons e electrões. Versões virtuais desta experiência, inspiradas numa descrição do próprio Feynman, podem ser realizadas em [www.colorado.edu/physics/2000/index.pl](http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl).

# ANINHOS DA RCONDU- FLUIDOS

O princípio da sobreposição descreve a interferência de ondas e o padrão observado na experiência da fenda dupla (experiência de Young). Duas fendas são iluminadas pela mesma fonte e a luz é projectada num alvo colocado mais à frente. Se a distância entre as fendas for adequada (da ordem do comprimento de onda da luz) observa-se um padrão de interferência no alvo. Quando a crista de uma onda se sobrepõe à cava da outra, os seus efeitos anulam-se (interferência destrutiva); por outro lado se as duas ondas forem sobrepostas em crista (ou em cava) o efeito ondulatório é reforçado (interferência construtiva); a sucessão periódica destes dois tipos de interferência, em função da distância percorrida pelas ondas, dá origem ao padrão de interferência observado no alvo, formado por riscas alternadamente claras (onde a intensidade da luz é máxima) e escuras (onde a intensidade é mínima).

Nada deste tipo acontece se a barreira que antecede o alvo for bombardeada por partículas clássicas, isto é, “bolinhas”: classicamente o padrão formado por partículas que passam

através de uma fenda dupla é a soma dos padrões correspondentes a cada uma das fendas isoladas, e não há interferência. Por isso, a observação da interferência de electrões feita por C. J. Davisson e L. H. Germer no final dos anos 20, foi, do ponto de vista clássico, muito surpreendente, e demonstrou experimentalmente que os electrões não são “bolinhas”. Na experiência, os electrões (tal como as ondas de luz) sobrepõem-se e dão origem a um padrão de interferência muito semelhante ao observado na experiência de Young. A existência destas “ondas de matéria” tinha sido proposta por L. de Broglie em 1923 (Prémio Nobel da Física em 1929).

Ao contrário do que acontece com uma bolinha, que pode ter uma energia qualquer, os estados quânticos são discretos. A energia das partículas quânticas não pode tomar valores arbitrários. A natureza discreta do espectro (conjunto de estados) de energia de uma partícula tem, como veremos, efeitos dramáticos a baixas temperaturas.

A temperatura absoluta é uma medida da agitação térmica dos átomos ou moléculas, ou da sua energia cinética média, e a probabilidade de ocupação de um estado quântico depende da temperatura. No zero absoluto ( $T = 0$  K) o movimento térmico cessa, e os átomos estão no estado fundamental, o estado de energia mais baixa.

A temperaturas finitas, os átomos estão distribuídos por todos os estados acessíveis, com uma probabilidade que decresce exponencialmente com a energia do estado, medida em termos da energia térmica,  $kT$ , onde  $k$  é a constante de Boltzmann e  $T$  a temperatura absoluta.

À temperatura ambiente, as leis quânticas coincidem com as leis clássicas e podemos imaginar os átomos de um gás como bolas de bilhar que chocam entre si e com as paredes do recipiente que os contém, isto é, tudo se passa como se os átomos fossem, de facto, “bolinhas” (Fig. 1). A estas temperaturas, a energia média dos átomos é elevada, e o seu comprimento de onda é tão pequeno (muito menor do que a distância média entre dois átomos) que fenómenos de interferência quântica não ocorrem na prática. Neste regime, a energia térmica é muito maior do que a diferença de energia entre dois estados consecutivos e as partículas estão distribuídas por muitos estados quânticos, com uma probabilidade dada pela famosa distribuição de Maxwell, de acordo com a teoria clássica.

Quando a temperatura baixa, a energia média dos átomos diminui e o comprimento de onda térmico (o comprimento de onda de uma partícula com energia igual à energia térmica) aumenta. A temperaturas suficientemente baixas este comprimento é da ordem da distância inter-atómica, os fenómenos de interferência quântica tornam-se relevantes e as propriedades do sistema mudam

radicalmente (Fig. 1). Neste regime, as leis clássicas falham e um sistema de partículas exhibe uma transição de fase para um novo estado condensado.

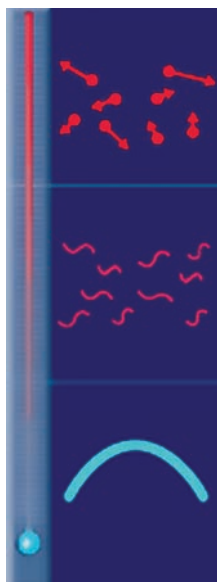


Fig. 1 À medida que a temperatura baixa o comprimento de onda de De Broglie aumenta e os fenómenos de interferência quântica tornam-se cada vez mais importantes. Abaixo de uma determinada temperatura crítica, as ondas individuais ligam-se formando uma única onda de matéria.

No estado condensado, as ondas dos átomos individuais ligam-se formando uma única onda de matéria: esta é a “assinatura” do novo estado da matéria (Fig. 1) previsto, em meados dos anos 20, por Einstein e conhecido por condensado de Bose-Einstein.

De facto, em 1924 um jovem desconhecido físico indiano, S. Bose, escreveu e enviou a Einstein um artigo onde apresentava uma derivação inovadora da distribuição de equilíbrio de fótons. Bose supôs que o número de fótons num determinado estado quântico (definido pela energia ou frequência das partículas) podia variar entre zero e infinito e, usando resultados conhecidos da Física Estatística, reproduziu a famosa lei da radiação do corpo negro, derivada originalmente por M. Planck (Prémio Nobel da Física em 1918).

Einstein entusiasmou-se com a ideia de Bose e publicou quase imediatamente dois artigos onde desenvolvia a teoria quântica para partículas que, como os fótons, podem ocupar o mesmo estado quântico. A contribuição decisiva de Einstein consistiu em notar que se o número de partículas for conservado, como acontece com átomos, o sistema de partículas independentes exhibe uma transição de fase a baixas temperaturas. Este aspecto escapou totalmente a Bose porque este considerou apenas o caso dos fótons que, como

não são conservados (podem desaparecer quando a energia do sistema é reduzida), não condensam.

A condensação de partículas independentes é, por si só, um fenómeno surpreendente, mas a surpresa teria sido muito maior se Einstein tivesse suspeitado das propriedades do novo estado da matéria – o condensado de Bose-Einstein (BEC). Contudo, passaram muitos anos sem que se chegasse a conhecer qualquer sistema com estas características, e o próprio Einstein parecia não acreditar que o BEC pudesse ser observado. Talvez por esta razão não tenha voltado a trabalhar neste problema.

As propriedades do BEC são estranhas e totalmente contra-intuitivas. Uma das mais surpreendentes é a superfluidez, ou escoamento sem atrito. O condensado tem uma rigidez colectiva que o “protege” dos processos de interacção partícula a partícula responsáveis pela viscosidade fluida ou resistência ao fluxo, daí resultando a superfluidez do BEC.

#### Observação do BEC: um estado proibido

Um cálculo exacto mostra que a transição de Bose-Einstein ocorre quando o número de átomos num cubo de lado igual ao comprimento de onda térmico excede ligeiramente 2,6. Isto significa que, quanto mais denso for o gás, mais alta será a temperatura crítica.

Contudo o BEC é um estado metastável, ou seja, que compete com outras fases, e a sua observação requer que o gás seja ultra-diluído, o que por sua vez implica temperaturas de transição ultra-baixas. A diluição é necessária para evitar que o sistema condense no estado líquido normal ou congele, antes de ocorrer a condensação de Bose-Einstein. É preciso manter o gás ultra-rarefeito, com densidades da ordem de  $10^{12}$  átomos por  $\text{cm}^3$  (10 ordens de grandeza inferiores à da densidade do líquido ou do sólido), o que implica um arrefecimento até 0,000 000 1 K, ou seja, até um décimo de milionésimo de grau acima do zero absoluto. A esta temperatura os átomos movem-se muito devagar, com velocidades da ordem dos milímetros por segundo.

Outra condição para observar o condensado é ter os átomos confinados no espaço durante e depois do arrefecimento. Como o BEC é metastável, o confinamento não pode envolver qualquer tipo de contacto, para evitar a nucleação do líquido ou do sólido. Isto elimina todos os métodos convencionais de baixas temperaturas (criogenia), e deixa como única opção a utilização de campos eléctricos e magnéticos, tanto para arrefecer como para aprisionar os átomos.

A primeira fase do arrefecimento utiliza lasers. A alta intensidade e direcionalidade de um feixe de laser disponibilizam uma densidade de energia e de momento que

permite a sua utilização para alterar o movimento dos átomos. Estes podem ser arrefecidos porque, ao absorverem um fóton, têm que “acomodar” o seu momento linear. Se as condições forem adequadas (absorção próxima de uma ressonância atómica numa colisão frontal), o resultado final é a redução da velocidade do átomo. A emissão do fóton pelo átomo excitado transporta momento numa direcção arbitrária, deixando o átomo, em média, com uma velocidade mais baixa.

Esta imagem simples de um “bilhar” de átomos e feixes de fótons dá uma ideia do princípio geral deste processo. Mas como o arrefecimento envolve trocas de energia e de momento selectivas entre a luz e os átomos, esse “bilhar” tem que ser cuidadosamente controlado para que se produza o efeito desejado. As condições necessárias para o arrefecimento são obtidas usando o efeito de Doppler e o facto de a interacção entre a luz e átomos neutros ser amplificada muitas vezes perto de uma ressonância atómica.

A segunda condição que a observação do condensado exige é o aprisionamento dos átomos arrefecidos numa pequena região do espaço. Tal como num problema à nossa escala, o confinamento no espaço é conseguido usando forças que variam com a posição, e, neste caso, essas forças resultam de campos magnéticos com perfis adequados de modo a criar uma armadilha, ou seja, uma região do espaço onde os átomos tendem a ficar presos. Da mesma maneira que uma bola no fundo de uma taça fica presa num mínimo do campo gravítico, o confinamento é conseguido criando um campo em que a energia potencial depende da posição e é mínima no centro da armadilha. As armadilhas magnéticas são facilmente integradas no equipamento de arrefecimento com lasers, e o conjunto dos dispositivos deste tipo é conhecido como armadilhas ópticas e magnéticas.

Esta técnica de arrefecimento atingiu os 10 microkelvin com  $10^{11}$  átomos por centímetro cúbico. Estas condições, se bem que extraordinárias, estão ainda muito longe das condições necessárias para observar o BEC. Mas a técnica foi de tal maneira importante neste contexto, que o Prémio Nobel da Física foi atribuído a S. Chu, C. Cohen-Tannoudji e W. D. Phillips em 1997, dois anos depois de o BEC ter sido observado.

Era evidente que a observação do BEC viria também a ser reconhecida com o prémio Nobel, porque, se ninguém duvidava da existência do BEC, as condições necessárias para o observar eram tão formidáveis que exigiam novas técnicas de arrefecimento. Para os átomos se verem uns aos outros, as ondas de matéria têm que ser suficientemente estendidas para se sobreporem. O “tamanho” destas ondas é dado pelo comprimento de onda térmico, que tem que ser maior do que a distância inter-atómica para permitir que a estatística quântica se faça sentir. Como vimos, isto

implica baixas energias (isto é, baixas temperaturas) e densidades de partículas elevadas, condições em que todas as espécies atómicas formam moléculas ou condensam. O desafio que se punha era passar dos microkelvin aos nanokelvin, mantendo o gás no estado metastável.

A ideia (genialmente simples!) consistiu em desligar os lasers e arrefecer os átomos na armadilha magnética por evaporação forçada. Neste processo, átomos com energias acima da média saem por cima da barreira de potencial, deixando na armadilha a maioria dos átomos a uma temperatura mais baixa. Nos passos seguintes, a altura da armadilha é diminuída gradualmente, deixando na armadilha átomos a temperaturas sucessivamente mais baixas. A fracção de energia removida é muito maior do que a fracção de átomos que escapam da armadilha em cada passo, e o processo de arrefecimento é eficaz. É também extremamente simples e muito semelhante ao que acontece quando deixamos arrefecer uma chávena de café: as moléculas mais energéticas evaporam, deixando na chávena as moléculas menos energéticas e o café frio.

Foi em Junho de 1995 que E. Cornell e C. Wieman anunciaram a observação de um condensado de átomos de  $^{87}\text{Rb}$ . A equipa identificou o condensado de Bose-Einstein através da observação de um pico, que aumentava à medida que a temperatura diminuía (Fig. 2). Para temperaturas perto dos 10 nK, quase todos os átomos de  $^{87}\text{Rb}$  se concentravam no pico correspondente ao estado condensado.

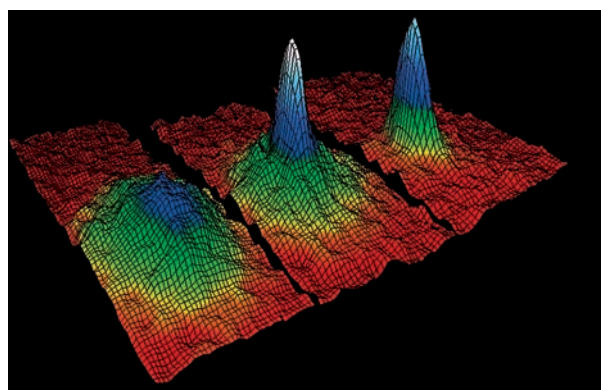


Fig. 2 BEC de  $^{87}\text{Rb}$  observado por Cornell e Wieman em 1995. A temperatura decresce da esquerda para a direita, de centenas a dezenas de nK ( $10^{-9}$  K). À temperatura mais baixa, quase todos os átomos (cerca de  $10^7$ ) de  $^{87}\text{Rb}$  estão no estado condensado, indicado pelo pico na figura. A densidade do gás é da ordem de  $10^{12}$  por  $\text{cm}^3$ , correspondente a um confinamento da ordem das dezenas de micrometros, numa armadilha com dimensões da ordem do centímetro.

O grupo de W. Ketterlee, que prosseguia estudos paralelos com  $^{23}\text{Na}$ , observou uns meses mais tarde um condensado com um número de átomos duas ordens de grandeza



superior, o que lhes permitiu estudar as propriedades do BEC. Ketterle verificou que todos os átomos estavam realmente ligados numa única onda de matéria. Separou o condensado em dois e observou um padrão de interferência muito claro (Fig. 3), pondo em evidência a coerência da onda macroscópica do BEC.

O prémio Nobel da Física foi atribuído a Cornell, Ketterle e Wieman em 2001.

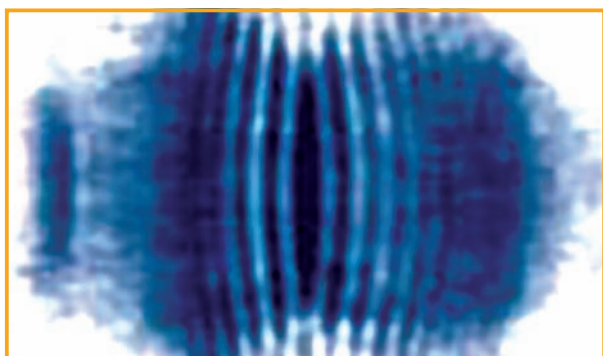


Fig. 3 Padrão de interferência de ondas de BEC do  $^{23}\text{Na}$ .

### Supercondutores e superfluidos

Em 1911, H. Kamerlingh Onnes observou que a resistência eléctrica do mercúrio desaparece à temperatura do hélio líquido. Onnes chamou ao fenómeno supercondutividade (Prémio Nobel da Física em 1913). Apesar de Onnes ter também notado a superfluidez do  $^4\text{He}$ , a sua descoberta é atribuída a P. Kapitza, que, em 1938, observou que a viscosidade do  $^4\text{He}$  líquido cai abruptamente ( $10^8$  vezes) à temperatura de 2,17 K (Prémio Nobel da Física de 1978).

Supõe-se que a superfluidez, observada na fase líquida do  $^4\text{He}$  por Onnes e Kapitza, é uma manifestação da condensação de Bose-Einstein, isto é, a tendência das partículas de condensarem no estado de uma partícula de energia mais baixa.

A transição do  $^4\text{He}$  superfluido ocorre a 2,18K, uma temperatura surpreendentemente próxima da estimativa de 3,2 K obtida para um sistema de partículas independentes, com massa e densidade idênticas às do  $^4\text{He}$  líquido.

A supercondutividade é o desaparecimento total da resistência eléctrica, abaixo de uma temperatura crítica, característica do material. Um supercondutor é um condutor perfeito onde, uma vez estabelecida, a corrente eléctrica persiste indefinidamente.

Para entendermos a supercondução temos que perceber a que se deve a resistência eléctrica num condutor “normal”.

Os metais são bons condutores da electricidade, mas mesmo os melhores condutores (como o cobre, o ouro ou a prata) oferecem resistência à passagem da corrente. É devido a esta resistência que os fios condutores aquecem e há perdas de energia eléctrica na transmissão.

A resistência decresce à medida que a temperatura baixa, porque é devida em grande parte ao movimento térmico dos átomos, que perturba o movimento dos electrões. Na condução de corrente “normal”, os portadores de carga são os electrões livres dos metais (cerca de  $10^{23}$  por cada centímetro cúbico de metal). Em equilíbrio e na ausência de campo eléctrico, o movimento dos electrões é aleatório e há, em média, tantos electrões a deslocar-se num determinado sentido como no sentido oposto, pelo que não há corrente. Na presença de um campo eléctrico aplicado, esta simetria é quebrada e o excesso de electrões num dos sentidos constitui a corrente eléctrica. As vibrações térmicas dos átomos da rede cristalina dispersam estes electrões em todas as direcções, o que se manifesta globalmente como uma resistência ao movimento dos electrões, limitando o fluxo de carga quando o campo eléctrico está ligado, e anulando a corrente eléctrica logo que este é desligado.

Quanto mais baixa for a temperatura, menores serão as vibrações térmicas e, por isso, a resistência diminui à medida que a temperatura diminui. Mas esta variação é suave, e, idealmente, a resistência devia desaparecer apenas no zero absoluto, onde toda a agitação térmica pára. Mesmo isto é verdade apenas para cristais perfeitos, porque os cristais reais têm imperfeições ou defeitos (impurezas, sítios vazios, átomos no sítio errado) que contribuem para a resistência eléctrica independentemente das vibrações térmicas, e esta contribuição não desaparece quando  $T=0$  K.

Contudo, Onnes notou que o mercúrio perde toda a resistência abaixo de 4,2 K. A esta temperatura, ainda há agitação térmica e, claro, (quase todos) os defeitos da rede. Nem as vibrações térmicas nem os defeitos parecem ter qualquer efeito na condução dos electrões no mercúrio abaixo de 4,2 K. Portanto, o que está em jogo na “supercondução” é um mecanismo novo e diferente do que acabámos de descrever. Este mecanismo é robusto e deve-se em última análise à condensação dos electrões (ou melhor de pares de electrões) num estado quântico macroscópico semelhante ao condensado de Bose-Einstein.

Um supercondutor não é apenas um condutor perfeito. É também caracterizado pela expulsão de campos magnéticos estáticos do seu interior, um fenómeno conhecido como efeito de Meissner que joga um papel fundamental em muitas aplicações. Consideremos um supercondutor acima da temperatura crítica (Fig. 4 (a)). O metal (não magnético) comporta-se como o vácuo, e as linhas do campo magnético atravessam-no sem sofrer alterações. Consideremos agora

o mesmo material abaixo da temperatura crítica (Fig. 4 (b)). O campo magnético é expulso do interior do supercondutor. O processo é reversível: se aquecermos o supercondutor acima da temperatura crítica, as linhas de campo magnético voltam a atravessar o metal. O efeito de Meissner explica-se facilmente com base no fenómeno das correntes induzidas: na presença de um campo magnético, quando a temperatura desce abaixo da temperatura crítica, são geradas supercorrentes permanentes que produzem um campo magnético tal que anula o campo externo no interior do supercondutor.

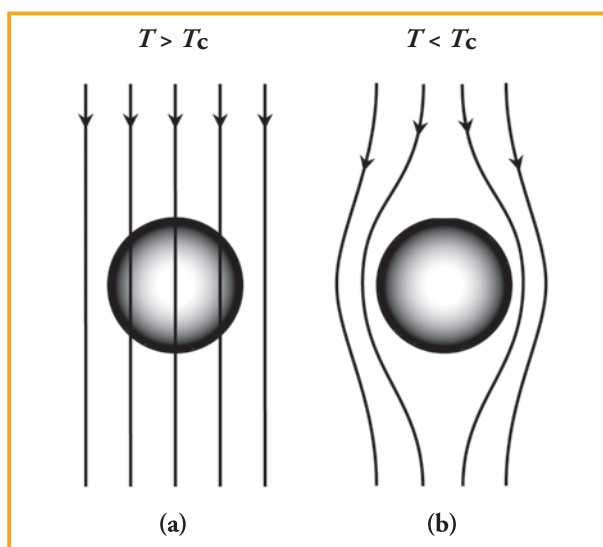


Fig. 4 Efeito de Meissner: acima de  $T_c$  as linhas do campo magnético atravessam o material. Abaixo de  $T_c$  o campo magnético é expulso do interior da amostra.

O efeito de Meissner dá origem à repulsão entre os supercondutores e magnetes permanentes. As correntes que cancelam o campo exterior criam um campo magnético que é uma imagem no espelho do campo do magnete, e que a distâncias curtas pode ser suficiente para equilibrar o seu peso. A este fenómeno chama-se levitação magnética e uma das suas aplicações mais conhecidas (e espectaculares) consiste na construção de comboios ultra-rápidos que deslizam sem atrito sobre uma almofada magnética.

As aplicações dos supercondutores na construção de magnetes supercondutores são já comuns: magnetes supercondutores capazes de criar campos magnéticos muito intensos são usados na técnica de imagem por ressonância magnética (MRI) em medicina, na investigação da estrutura de moléculas complicadas através da ressonância magnética nuclear (NMR), ou no confinamento de plasmas no âmbito do reactor de fusão. A descoberta dos supercondutores de alta temperatura torna viáveis, na opinião de alguns, aplicações da supercondutividade em larga

escala: cabos supercondutores e comboios levitados magneticamente, apesar de uma teoria satisfatória desta classe de supercondutores ainda não existir. E termino com as palavras de um cientista contemporâneo de Einstein

*“... A ciência tem tido aplicações maravilhosas, mas uma ciência que tenha como único objectivo as aplicações, não é ciência, é apenas culinária.”* H. Poincaré

## REFERÊNCIAS

- [1] [www.colorado.edu/physics/2000/index.pl](http://www.colorado.edu/physics/2000/index.pl)
- [2] [www.superconductors.org](http://www.superconductors.org)
- [3] [www.nobel.se/physics/laureates/index.html](http://www.nobel.se/physics/laureates/index.html)

[www.mtbrandao.com](http://www.mtbrandao.com)

**mb**  
m. t. brandão, lda.

A M.T.Brandão, Lda., é uma empresa com 20 anos de experiência na distribuição de equipamentos de Alta Tecnologia. Dispomos de uma equipa com formação adequada para um eficiente Apoio ao Cliente.



**Newport**

Orgulhamo-nos de possuir a mais completa gama de Lasers e produtos para Optoelectrónica, sendo a sua qualidade reconhecida mundialmente.



Rua de Serralves, 599 - 4150-708 Porto - Portugal | Tel. 226 167 370 - Fax 226 167 379  
e-mail: [mtb@mtbrandao.com](mailto:mtb@mtbrandao.com) | [www.mtbrandao.com](http://www.mtbrandao.com)



Harold Kroto, Prémio Nobel da Química em 1996, esteve recentemente em Portugal, tendo encerrado o ciclo de colóquios associado à exposição "à luz de Einstein" com a palestra "2010: a nanospace odyssey". A *Gazeta* aproveitou a sua estadia para o entrevistar sobre a sua carreira científica. Recorde-se que Harold Kroto, da Universidade de Sussex, em Inglaterra, integrou a equipa de investigadores que em 1985 descobriram a molécula de C<sub>60</sub>.

Entrevista de

PATRÍCIA FAÍSCA

Centro de Física Teórica e Computacional da  
Universidade de Lisboa  
Av. Prof. Gama Pinto 2, 1649-003 Lisboa  
patnev@cii.fc.ul.pt

SÍLVIA ESTÁCIO

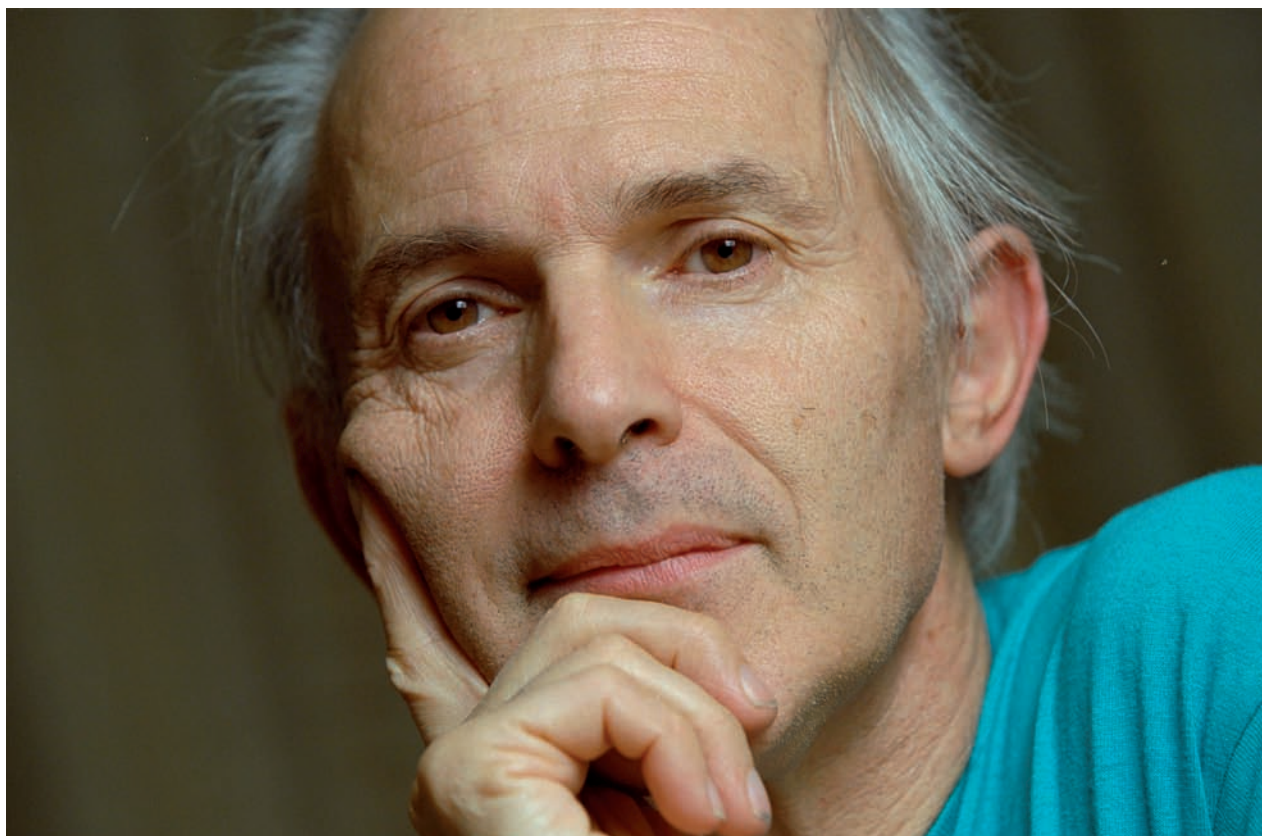
Grupo de Física Matemática da Universidade de Lisboa  
Av. Prof. Gama Pinto 2, 1649-003 Lisboa  
silvia@cii.fc.ul.pt

Entrevista a Harold Kroto

# SÓ PODIA SER A ESTRUTURA DA "BOLA DE FUTEBOL"!

P. - Quando decidiu ser cientista?

R. - Penso que nunca decidi, aconteceu assim. Eu estava interessado em design gráfico, em ciências e também em jogar ténis e tocar guitarra. Não era particularmente bom a tocar guitarra porque comecei tarde demais, e no ténis estava sempre a perder e certamente nunca chegaria a ser campeão de Wimbledon. Mas tinha jeito para as artes e para o design gráfico. Depois fui para a Universidade, onde estudei ciências, e esse pareceu-me um caminho mais seguro para começar uma carreira, já que era importante assegurar a sobrevivência. A arte passou para segundo plano, embora fosse o meu principal interesse. Acabei por fazer um doutoramento em Química, porque queria continuar na Universidade – estava a divertir-me bastante! –, e como quis depois experimentar viver noutro país, fui fazer um *post-doc* no Canadá, e estive também nos Estados Unidos durante algum tempo. Então tive uma oferta de emprego e regressiei a Inglaterra. Pensei nessa altura que iria experimentar durante cinco anos e que, se as coisas não corressesem bem, mudaria para uma escola de artes e passaria a dedicar-me ao design gráfico. Mas as coisas correram razoavelmente bem, de modo que nunca cheguei a dedicar-me ao que realmente sempre quis fazer. Por isso, comigo nunca houve a decisão de “Quero ser um cientista!”, e mesmo hoje não tenho a certeza de querer ser cientista. Quero é



<http://www.kroto.info/>

estar interessado no que em cada momento estou a fazer. Também nunca pensei que queria ser um professor, queria, isso sim, ganhar a minha vida, e à medida que o meu trabalho de investigação ia progredindo, procurava fazer as coisas o melhor que podia, ensinar o melhor que podia, e fazer investigação o melhor que podia. Enfim, pensei que devia seguir a carreira académica e isso satisfez-me. A certa altura estive mesmo para passar a fazê-lo só em *part-time*, para ter tempo para me dedicar às artes e ao design gráfico, mas esse projecto “evaporou-se” com a descoberta do C60. Talvez a minha carreira como artista gráfico comece dentro de um ou dois anos... Nunca se sabe! Mas tenho muitas coisas pela frente e nunca faço grandes planos, deixo que as coisas aconteçam.

P. - Na sua nota autobiográfica no *site* do Nobel pode ler-se que a certa altura da vida os seus interesses foram a Química, a Física e a Matemática, por esta ordem. O que o atraiu mais na Física?

O que mais me fascinou na Física foi a Mecânica Quântica. Acho que a Mecânica Quântica é o maior avanço intelectual do século XX, porque revela o mundo microscópico em que tudo se baseia. De facto, eu sou um químico-físico. Há a Química e a Física e na fronteira das duas está a espectroscopia, que ainda é o que me interessa. Trata-se de

compreender a espectroscopia molecular e atómica com base na Mecânica Quântica. Embora eu não seja um matemático particularmente bom, sou bom... mas não sou especialmente bom como físico. Acho que para se ser um bom físico é preciso ter uma compreensão maior e mais profunda da Matemática, do que a que eu tenho. Mas para a Química e para a Química-Física basta perceber a Mecânica Quântica só até um certo nível.

P. - O seu *background* em Física foi importante para a descoberta do C60?

Não, acho que não foi. A descoberta do C60 aconteceu, do meu ponto de vista, porque eu estava interessado na Química no espaço. Trabalhei um pouco nisso nos anos 70, interessou-me o facto de o espaço estar cheio de moléculas e átomos, e fiz alguns trabalhos interessantes nessa área. Foi na sequência desse interesse que, por sugestão de Bob Curl, durante uma visita minha a Rice, contactei Rick Smalley, que tinha desenvolvido um aparelho fantástico para vaporizar metais. Pensei que esse aparelho também poderia vaporizar carbono e mostrar-me coisas interessantes sobre as moléculas no espaço. Foi então que surgiu aquela enorme surpresa, numa experiência em relação à qual eu não tinha expectativas especiais, e que tinha deixado em “banho-maria” durante vários anos.



A história da descoberta do C60 é fascinante, quase parece um conto de fadas. Posso pedir-lhe que nos faça um resumo do que foram esses dias em 1985? O que é que aconteceu?

Estavam em jogo duas experiências, uma muito simples que me interessava particularmente a mim, e outra realmente mais complicada que me interessava tanto a mim como a Bob Curl e a Rick Smalley. Esta segunda experiência apresentava tais dificuldades que a certa altura eles propuseram começar por fazer a experiência simples. Telefonaram-me e arranjei imediatamente uns dias para ir a Rice fazer essa experiência. Trabalhei sobretudo com os estudantes, em particular com Jim Heath, mas também com Sean O'Brien e com a estudante chinesa Yuan Liu. Ao fim de alguns dias, a experiência estava a correr muito bem, mas havia um aspecto inesperado e muito evidente nos resultados. Podemos fazer uma analogia entre vaporizar uma substância e atirar ao ar um baralho de cartas. O que estava a acontecer era como se, de cada vez que atirássemos as cartas, elas caíssem sempre numa determinada ordem. Atirávamos um monte de átomos de carbono para o ar, e eu estava à espera de ver aparecer cadeias lineares de vários tamanhos. Mas o número 60 aparecia com muito maior frequência de que os outros números. Isso era muito estranho, e fomos forçados a pensar numa maneira de interpretar o resultado, até que chegámos à conclusão de que podia ser a estrutura da “bola de futebol”. A surpresa foi enorme, e ficámos todos eufóricos com a descoberta, mesmo antes da confirmação, porque estávamos convencidos de que tínhamos razão. Lembro-me de estar tão eufórico que na viagem de regresso pensei, sentado no avião, que nem faziam falta os motores para eu voar por cima do Atlântico. E pensava em todos aqueles que, em Inglaterra, me iriam perguntar se a viagem tinha corrido bem, e a quem eu iria responder “Sim! Sabes o que descobrimos?”, e contaria a história.

Depois houve algumas dores de cabeça porque uma meia dúzia de artigos contestaram as nossas conclusões. Foram tempos difíceis. Decidi que iria dedicar cinco anos a tentar provar que a conclusão era correcta e que, se não fosse correcta, queria ser eu próprio a mostrá-lo. Não estou de acordo com os cientistas que sugerem uma teoria e que depois deixam a outros o trabalho de demonstrar se está certa ou errada. Esse não me parece um comportamento ético em ciência, embora haja pessoas que o adoptam, e já o tenho criticado antes, em particular em relação a Fred Hoyle, um cientista britânico famoso, um físico e cosmólogo. Hoyle sugeriu uma data de teorias que eram disparates puros, e a sua atitude era a de dizer “Então, demonstrem lá, se forem capazes, que eu não tenho razão!” Ora eu posso dizer, por exemplo, que há um *hamster* do outro lado do Universo, não há maneira de refutar isso. Enfim, voltando ao C60, dediquei-me então a demonstrar a nossa interpretação dos resultados, mas foi duro. Fiz alguns estudos sobre o assun-

to, assim como o grupo do Rick, e as conclusões desses estudos batiam certo com o que tínhamos sugerido, de modo que fomos gradualmente fornecendo provas de que tínhamos de facto razão.

Concorda que existe um certo grau de acaso em todas as grandes descobertas científicas?

Sim, até certo ponto isso é verdade. Eu diria que existem grandes descobertas que não aconteceram por acaso. Há pessoas que procuram descobrir algo mas que sabem, *a priori*, que existe uma forte possibilidade de que a sua descoberta funcione realmente. O laser (ou o próprio maser) é um exemplo de uma descoberta desse tipo porque o Charles Townes concluiu a possibilidade da existência do laser a partir da análise das equações de Einstein. Já as consequências do resultado dessa descoberta – a forma como revolucionou a tecnologia e o mundo em que vivemos – essas sim, foram totalmente imprevistas. Por outro lado, a nossa descoberta foi casual no sentido em que não estávamos à espera de encontrar o C60. Os avanços científicos não são todos do mesmo tipo. Não sei muito sobre o caso do transistor, mas é natural que Bardeen, Shockley e Brattain já tivessem pensado na possibilidade de descoberta do transistor, em que se baseou depois a construção dos computadores. Contudo, penso que podemos dizer que algumas das grandes descobertas não foram de facto previstas. Estas descobertas são muito mais importantes porque mudam o paradigma, mudam a nossa visão do mundo. Um exemplo de uma destas descobertas é a da existência de antipartículas a partir das equações de Dirac da Mecânica Quântica. É um pouco como a raiz quadrada de -1. Posso estar errado, mas é assim que vejo este exemplo. Se pegarmos no teorema de Pitágoras, tomamos só a raiz positiva da equação ainda que existam duas raízes possíveis. No entanto, alguém com uma mente brilhante como a de Dirac diria “Alto! Não deitemos fora a raiz negativa. Qual é o significado desta raiz?” E Dirac identifica-a com uma energia negativa e conclui que existem antipartículas. Penso que esta descoberta de Dirac pode servir como exemplo de uma descoberta que se deu por acaso. Acho que as descobertas casuais como esta são provavelmente as mais importantes de um ponto de vista fundamental uma vez que mudam a nossa compreensão das coisas. A descoberta do laser não mudou a nossa compreensão do mundo porque a sua existência já estava prevista nas equações de Einstein. Só que ninguém se tinha dado conta disso até Townes ter construído o maser. Mas Townes não alterou a teoria. As descobertas ocasionais, essas sim, mudam a nossa compreensão das coisas de uma forma fundamental.

Como avalia o impacto da vossa descoberta?

Ainda é muito cedo para avaliar. Penso que, para já, mudou a nossa visão dos chamados materiais “em folha”

(“*sheet materials*”). Existem cristais uni-, bi- e tridimensionais e a grafite é um cristal bidimensional. A nossa descoberta do C60 mostra que, em escalas pequenas, as folhas bidimensionais se encurvam para formar “gaiolas”, e isto é um facto importante. A química do C60 só agora é que está a começar. Isso deve-se em parte ao facto de a nossa ciência estar tão desenvolvida que mesmo as grandes descobertas vão demorar muito tempo até surgirem aplicações nos campos em que já existem tecnologias de sucesso. Um exemplo disto são as tecnologias baseadas em silício. O GaAs (arsenito de gálio) poderia ser uma alternativa ao silício mas existe tanta investigação em silício (que por isso mesmo é cada vez melhor) que outros materiais, para se imporem, teriam que ser muito melhores do que o silício. Passa-se o mesmo com o C60. O C60 vai impor-se em áreas onde as tecnologias conhecidas não estejam tão desenvolvidas e tão amadurecidas. Eu diria que se o C60 se tornar no constituinte principal de dispositivos úteis, tal acontecerá na electrónica molecular, que é uma área onde a investigação ainda não começou realmente e para a qual o C60 tem propriedades muito interessantes. Já se investiram milhões na investigação em silício e, a não ser que a electrónica molecular apareça como uma alternativa claramente melhor, a investigação em C60 não será impulsionada.

**Acha que a descoberta do C60 – possivelmente a molécula mais bonita do Universo – foi uma recompensa pela sua paixão pela arte e design?**

Nunca pensei nisso nessa perspectiva. Talvez... não sei. É uma ideia engraçada!

**O que pensa da investigação interdisciplinar?**

Sei o que é a investigação multidisciplinar. Sou um químico-físico e, por isso, cubro as áreas da física e da química. Penso que o futuro irá juntar biólogos, físicos e químicos e que a troca de ideias entre as várias áreas será muito proveitosa. Quando “encalharmos” num problema, uma pessoa de outra área pode dar uma contribuição diferente para ultrapassar o obstáculo, se trabalharmos em conjunto. Além disso, para avançar em ciência é preciso alguma ingenuidade e nós somos muito mais ingénuos numa área que não seja a nossa.

**E qual é a sua opinião sobre a investigação baseada em trabalho computacional?**

O trabalho computacional tem de andar de mãos dadas com o trabalho experimental. Se os resultados computacionais estiverem demasiado longe de uma confirmação experimental, então acho que não têm grande valor. Preocupa-me o trabalho computacional que está demasiado à frente da tecnologia experimental disponível. Mas esta é a minha opinião pessoal. Para mim as experiências são extraordinariamente importantes.

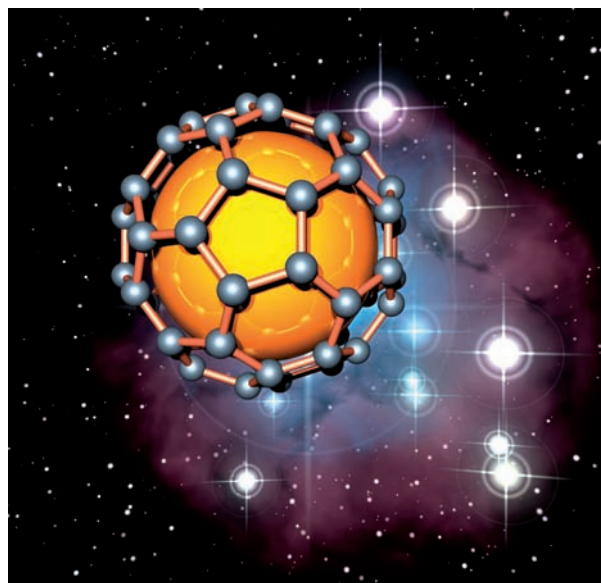


Imagem artística do C60.

**Qual é o seu livro de divulgação científica preferido?**

Para mim o livro de divulgação científica mais importante é do Carl Sagan e chama-se *The Deamon Haunted World: science as a candle in the dark* (*Um Mundo Infestado de Demónios*). Recomendo a sua leitura, não só a cientistas, mas a toda a gente. Trata de assuntos que me preocupam bastante: a irracionalidade no tempo presente e o sentido místico que se atribui às coisas. Em geral, também gosto muito dos livros do Feynman.

**Em 1995 criou o Vega Science Trust com o objectivo de fazer filmes sobre ciência para serem passados na televisão. Porquê?**

Começou como tudo o resto. Dei uma aula em Londres que quis gravar, e a gravação ficou um desastre. Contactei então um produtor da BBC que estava interessado em gravar conferências do tipo daquela que vou dar aqui na Fundação Gulbenkian, e propus-lhe fazer uma nova gravação da minha aula. Ele disse-me que, como este tipo de iniciativas não fazia parte das grandes apostas da BBC, um trabalho decente nos ia custar uma certa quantia. Arranjei financiamento para a gravação da minha aula, e depois fizemos uma segunda gravação de uma aula do Bill Clempner, um professor de Harvard que é um grande orador pelo qual tenho uma grande admiração, e que estava de visita ao Reino Unido, e depois ainda uma terceira. Foi então que decidimos criar uma fundação, a *Vega Science Trust* ([www.vega.org.uk](http://www.vega.org.uk)), para levar a cabo este tipo de projectos. Entretanto, o meu colega, que tinha um cargo na BBC, abandonou a equipa devido a conflito de interesses, e eu fiquei sozinho com a criança nos braços. A participação dele foi muito importante nos primeiros dois

ou três programas mas agora já temos mais de 100... Além disso, a ideia original evoluiu porque passámos a utilizar a Internet para difundir os nossos programas – mais de 50% dos quais ainda passam na BBC – de graça pelo mundo inteiro. E agora esse é o meu principal objectivo. Na minha opinião, a televisão acabou como veículo de transmissão cultural e educacional. Noventa por cento do que passa na televisão é disparatado, de má qualidade e não vale a pena ver. Penso que a *Internet* é o veículo de transmissão do futuro porque cada pessoa pode transmitir pela *Internet*, através do seu sítio, algo que qualquer pessoa pode ver em qualquer parte do mundo. Essa é uma diferença fundamental.

Acha que, nessa altura, em 1995, os jovens já começavam a perder o interesse pelas ciências duras? Na sua opinião qual pode ser a causa dessa perda de interesse?

Sim, existe um problema com as ciências duras apesar de no Reino Unido a situação ter melhorado ligeiramente nos últimos anos. Acho que existem imensas razões que explicam isso e uma delas é a seguinte. No Ocidente a vida é demasiado fácil, mas não há uma forma fácil de penetrar na tecnologia moderna. Por exemplo, hoje em dia nós não sabemos reparar um telemóvel, mas antigamente era possível reparar o telefone quando este deixava de funcionar. Passámos de uma tecnologia em que as reparações tinham um lugar importante para uma tecnologia orientada pelo princípio do “deitar fora”, e essa é, na minha opinião, uma das barreiras mais importantes. Eu tornei-me um cientista por ter reparado aparelhos na fábrica do meu pai. Dessa forma aprendi como funcionavam. Para além disso, construí o meu próprio rádio, e hei-de lembrar-me sempre de quando o liguei pela primeira vez e ouvi uma voz a vir dali. Foi incrível, parecia magia! Penso que, hoje em dia, estas experiências são muito pouco frequentes, acontecem a muito poucos miúdos. De certa forma a criança moderna não está realmente ciente de quão fantástica é a tecnologia moderna, pelo que não chega a ter verdadeiro interesse e respeito por ela. Acho que essa é uma das razões e é uma razão muito importante.

Que conselho daria aos jovens que dão os seus primeiros passos na investigação científica?

Diria “só façam investigação se forem curiosos e entusiastas” porque de outra forma é muito difícil fazer investigação. Bem sei que em outras áreas as coisas também não são fáceis... Mas na universidade temos que ensinar, temos que fazer investigação, temos que orientar alunos, temos que fazer trabalho administrativo e temos que arranjar financiamentos. Não é nada fácil. E penso que hoje em dia as coisas não são mais fáceis do que foram para mim noutros tempos. Eu tive um começo duro e sobrevivi, mas não me apercebi nessa altura até que ponto era duro, porque quando somos jovens recuperamos muito facilmente. Mas não optem pela

investigação para ganhar prémios! Quando os miúdos me perguntam o que fazer para ganhar um prémio Nobel eu respondo que não sei. Eu certamente não escolhi a investigação para ganhar o prémio Nobel e tê-lo ganho não teve um efeito importante em mim. Quando descobrimos o C60 pensei pela primeira vez que havia uma possibilidade real de ganhar o prémio Nobel. Mas estava muito satisfeito com o que tinha feito antes dessa descoberta. Estava satisfeito com o meu trabalho em química do espaço e com o meu trabalho em várias áreas da química do fósforo e do enxofre. Se não tivesse feito mais nada para além disso teria achado essas contribuições satisfatórias e suficientemente importantes. E, depois disso, teria feito qualquer outra coisa. Neste momento o C60 acabou para mim e estou a fazer outras coisas. Ganhar um prémio é apenas um bónus!

Se estivéssemos de volta aos anos 1960 ainda escolheria fazer um curso de Química?

Provavelmente não. Penso que teria ido para design gráfico. Mas foram tempos fantásticos! Poderia voltar a escolher outra vez química, mas nunca encarei essa escolha como definitiva. O meu problema é que não faço uma coisa a não ser que a possa fazer da melhor maneira possível. Mas hoje em dia existem tantas opções que provavelmente estaria menos dependente do factor financeiro... Bom... não sei a resposta!



# Física 2006

## Traçando o futuro

15.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física  
16.<sup>o</sup> Encontro Ibérico para o Ensino da Física

4-5-6-7 - Setembro - 2006

UNIVERSIDADE DE AVEIRO  
Auditório da Reitoria

[www.fis.ua.pt/fisica2006.htm](http://www.fis.ua.pt/fisica2006.htm)

Submissão de comunicações até 15 de Julho de 2006  
Inscrições: 01 de Junho a 14 de Agosto de 2006

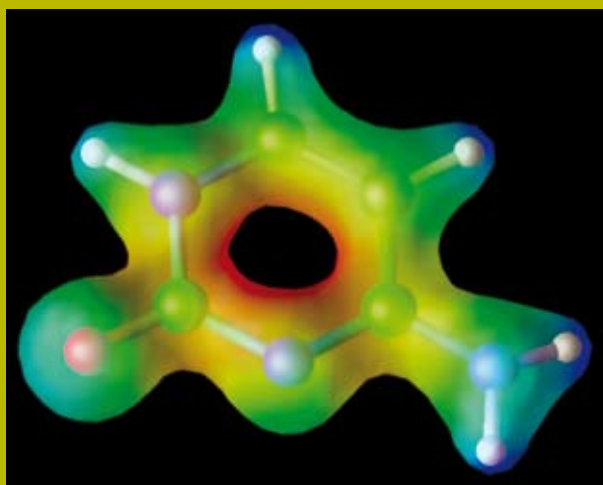
E-mail: [fisica2006@fis.ua.pt](mailto:fisica2006@fis.ua.pt)  
Telef.: +351 234 370 356



Sociedade Portuguesa de Física



NOS PRÓXIMOS NÚMEROS



O QUE É A TEORIA DOS FUNCIONAIS DA  
DENSIDADE?

Miguel A. L. Marques e Silvana Botti

BURACOS NEGROS NA TERRA?

Vítor Cardoso