

Gazeta de

# Física

Sociedade Portuguesa de Física

Número especial dedicado à exposição  
na Fundação Calouste Gulbenkian

**POTÊNCIAS DE DEZ**  
o mundo às várias escalas

DIRECTOR Carlos Fiolhais, com a colaboração especial de Ana Eiró e Carlos Matos Ferreira  
EDITOR Carlos Pessoa

CORRESPONDENTES Paulo Crawford (Lisboa),  
Constança Providência (Coimbra) e Fátima Pinheiro (Porto)

COLABORAM AINDA NESTE NÚMERO

A. Estácio dos Reis, Alexandre Quintanilha, Augusto Barroso, Carmo Fonseca, Dinis Pestana, Fernando Barriga, João Lopes dos Santos, Jorge Buescu, Jorge Dias de Deus, Jorge Trindade, Paulo Gama Mota, Rui Agostinho

SECRETARIADO Maria José Couceiro (Lisboa)  
e Carolina Borges Simões (Coimbra)

DESIGN

Media Primer - Tecnologias e Sistemas Multimédia Lda  
Rua Simões de Castro, 132,1º Esq.  
3000-387 Coimbra  
E-mail info@mediaprimer.pt

PRÉ-IMPRESSÃO E IMPRESSÃO

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

TIRAGEM 5000 exemplares

PREÇOS Número avulso 5 € (inclui IVA), ou 1002\$00.  
Assinatura anual 15 € (inclui IVA) ou 3007\$00.  
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 <http://spf.pt>

ISSN 0396-3561

REGISTO DGCS nº 107280 de 13.05.80

DEPÓSITO LEGAL nº 51419/91 PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL

A Gazeta da Física publica artigos, com indole 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 indole 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.

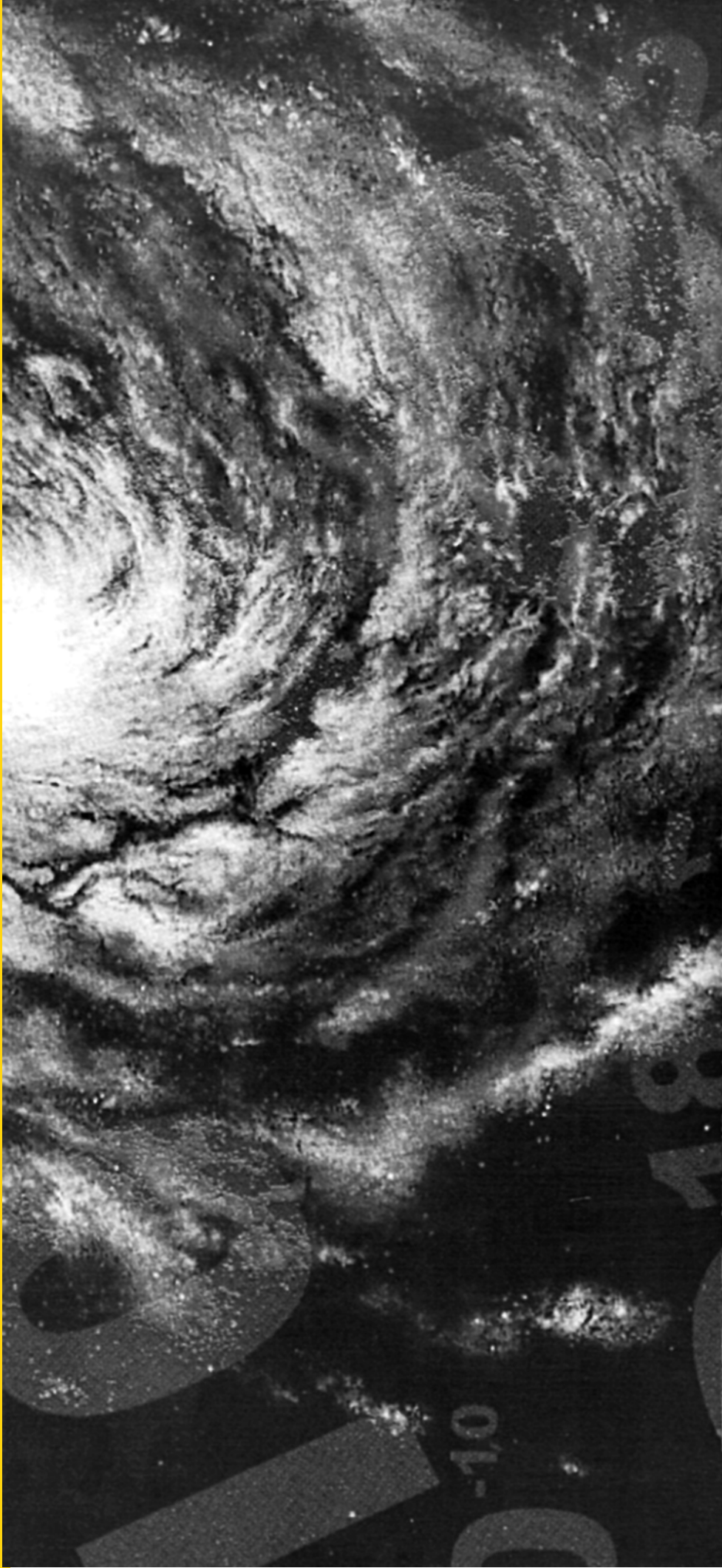
Os manuscritos devem ser submetidos em duplicado, dactilografados em folhas A4 a dois espaços (máximo equivalente a 3500 palavras ou 17500 caracteres, incluindo figuras, sendo que uma figura corresponde em média a 140 palavras). Deverão ter sempre um curto resumo, não excedendo 130 palavras. Deve(m) 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



FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN

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



O UNIVERSO E SUAS ESCALAS	4
Jorge Dias de Deus	
DO ÁTOMO AOS QUARKS	10
Augusto Barroso	
A NANOTECNOLOGIA OU A ENGENHARIA DO FUTURO	14
Carlos Fiolhais e Jorge Trindade	
O GENOMA HUMANO: COMO SE LÊ O LIVRO DA VIDA	18
Maria do Carmo Fonseca	
AS ESCALAS DA VIDA	22
Alexandre Quintanilha	
À PROCURA DA ESCALA CERTA	26
Dinis Duarte Pestana	
AS ESCALAS DA TERRA: LATITUDE, LONGITUDE E NAVEGAÇÃO	30
A. Estácio dos Reis	
AS ESCALAS DA EVOLUÇÃO DO PLANETA E A TERRA PRIMITIVA	34
Fernando Barriga	
O QUE MUDA O MUNDO QUANDO MUDA A TEMPERATURA	38
João Lopes dos Santos	
DO SISTEMA SOLAR AO COSMOS	44
Rui Jorge Agostinho	
GALÁXIAS INFINITAMENTE GRANDES, HALOS INFINITESIMAIS	48
Jorge Buescu	

## ENTREVISTA

OBSERVAR O MUNDO A PARTIR DO HOMEM	54
Entrevista com Ana Eiró e Carlos Matos Ferreira	
Carlos Pessoa	

## NOTÍCIAS

NOTÍCIAS DO MUNDO A VÁRIAS ESCALAS	58
------------------------------------	----

## SECÇÕES

LIVROS E MULTIMÉDIA	68
---------------------	----

Este número da Gazeta é especial. Todo ele é dedicado ao tema da exposição "POTÊNCIAS DE DEZ – o mundo às várias escalas", organizada pela Fundação Calouste Gulbenkian de 21 de Fevereiro a 26 de Maio de 2002. Trata-se de um interessante acontecimento de divulgação científica, que convida o público a uma viagem do infinitamente grande ao infinitamente pequeno, usando os olhos da ciência actual. Sobre os propósitos e conteúdos desta exposição, encontrará o leitor neste número uma entrevista com os comissários, ANA MARIA EIRÓ e CARLOS MATOS FERREIRA, dois físicos portugueses desde há longa data envolvidos nas actividades da Sociedade Portuguesa de Física (SPF).

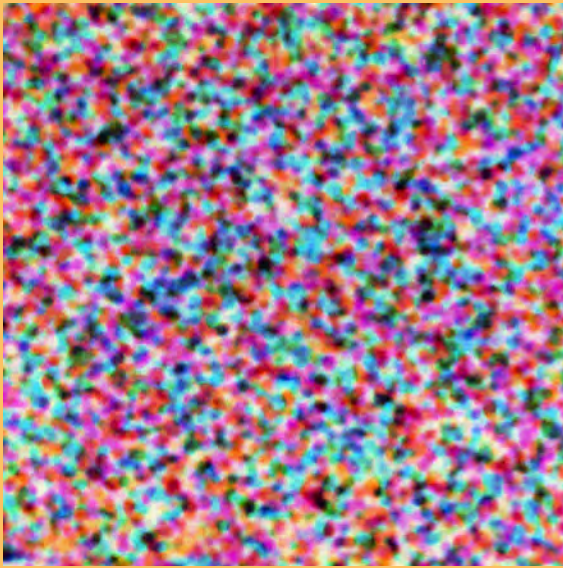
Contribuem para este número *fora de série* autores de diferentes áreas, não só físicos mas também biólogos, geólogos, estatísticos e matemáticos, que trazem até ao leitor aspectos da realidade do mundo a diferentes escalas, desde os quarks até às galáxias, passando pelo DNA. Os temas aqui abordados serão também desenvolvidos pelos próprios autores em colóquios destinados a um público alargado, que terão lugar semanalmente em paralelo com a exposição.

Para além destes artigos, este número contém apontamentos descritivos de alguns dos módulos incluídos na exposição. O leitor encontrará ainda, como é habitual, a secção de Livros e Multimédia, neste caso dedicada ao tema das escalas e dimensões.

Gostaríamos de deixar aqui registado o nosso sincero agradecimento à Fundação Calouste Gulbenkian por ter apoiado a publicação deste número, com uma tiragem alargada, que chegará não só aos sócios da SPF, como habitualmente, mas também aos visitantes da exposição e a outros leitores interessados pela ciência.

Apraz-nos ver a Gazeta de Física ligada de uma forma tão activa à exposição na Gulbenkian, um acontecimento de relevo na vida cultural portuguesa que servirá para levar ao grande público alguns fascinantes temas de ciência.

Boa viagem pelas POTÊNCIAS DE DEZ!



$10^{-16}$  m \*

A grande conquista da Cosmologia, no século XX, foi a existência de escalas para o Universo.

JORGE DIAS DE DEUS

Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa

jdd@mandrake.fisica.ist.utl.pt

# O UNIVERSO E SUAS

Ao olhar à sua volta, a criança descobre que é o centro do mundo. Trata-se da grande ilusão infantil que, por sinal, vai deixar marcas profundas nas outras fases da vida. Claro que todos sabemos e aceitamos, com mais ou menos relutância, que não somos o centro do mundo. Mais: nem sequer somos observadores privilegiados. A nossa pequena vingança está nas escalas de medição, nos pés, nas polegadas, nas pulsações, tudo aquilo que a Revolução Francesa racionalizou acabando por converter nas escalas básicas: o metro, para o espaço, e o segundo para o tempo. No nosso sistema de unidades, dominam as nossas escalas, adaptadas às **nossas** dimensões espaciais e aos nossos ritmos temporais.

Só que o Universo tem uma quantidade enormíssima de escalas: que vão do (quase) infinitamente grande, ao (quase) infinitamente pequeno. Dos  $10^{-20}$  m (dez elevado a menos vinte metros) aos  $10^{26}$  m, no que respeita ao espaço, dos  $10^{-23}$  s aos  $3 \times 10^{17}$  s ( $10^{10}$  anos), no que respeita ao tempo. Graças às escalas inventadas por nós, reencontramos a centralidade perdida da nossa infância e podemos deleitar-nos a pensar que somos a medida de todas as coisas! (Ver Tabela 1).

Do lado das escalas mais pequenas há uma questão que fica em aberto. Teremos de acreditar que as dimensões mínimas do espaço e do tempo, ligadas ao tamanho do electrão e ao tempo de vida de certas partículas elementares instáveis, são realmente as finais? Nada faz pensar que assim seja: a convicção mais generalizada é que a teoria e a tecnologia acabarão por chegar a "infinitos" ainda mais pequenos!

# ESCALAS

## O BIG-BANG: DESVIO PARA O VERMELHO

O esforço teórico no século XX para construir um modelo matemático para o Universo começou por envolver o próprio Einstein. Ele quis aplicar a relatividade geral ao Universo no seu todo. Como qualquer massa sofre atracção gravitacional, Einstein inventou um termo repulsivo, chamado constante cosmológica, para equilibrar e estabilizar o Universo. (Mais tarde, Einstein haveria de dizer, talvez precipitadamente, que esse tinha sido o maior erro da sua vida). O que Einstein tentava realmente era salvar um Universo material estático, imutável, eterno. Mas, logo a seguir, nos anos 1920-1930, de Sitter, Friedman, Robertson e Walker mostraram que, no caso dum Universo vazio ou uniformemente preenchido por matéria, existiam soluções não estáticas. Era a possibilidade de um Universo com história!

Pela mesma época iniciam-se as observações astronómicas que levaram à descoberta, primeiro, de outras galáxias para além da nossa, depois, de numerosas galáxias emitindo luz com desvios de Doppler para a banda do vermelho, e, por fim, de desvios que eram tanto maiores quanto mais distantes estavam as galáxias.

Portanto, tínhamos na época uma situação em que, do ponto de vista teórico, havia duas possibilidades, um Universo estático (com constante cosmológica *à la* Einstein) ou um Universo em evolução. Por outro lado, do ponto de vista observacional, era claramente favorecido um Universo em evolução. Vamos ver, com um pouco mais de pormenor, porquê.

As observações astronómicas das galáxias distantes feitas por Vesto Slipher nos anos 1910-1920, seguidas pelas observações de Edwin Hubble na década seguinte, foram decisivas para a construção do modelo do Universo em expansão. Por um lado, eles observaram que a matéria existente nas galáxias distantes era constituída pelos mesmos elementos que existem na nossa galáxia: hidrogénio, hélio, sódio, etc. Tal ajudava ao triunfo da ideia de que o Universo, por toda a parte, é mais ou menos parecido. Por outro lado, o espectro desses elementos tinha as riscas de identificação deslocadas para o vermelho.

O que quer isto dizer? Quando a luz passa através de determinada substância, o gás hélio por exemplo, há certas cores, ou comprimentos de onda, que são absorvidas, pelo que elas faltam na imagem final (o que se chama o

ESCALAS DE ESPAÇO (EM METROS)	
UNIVERSO	100 000 000 000 000 000 000 000 000 000
GALÁXIAS	10 000 000 000 000 000 000 000 000
SISTEMA SOLAR	1 000 000 000 000
TERRA	10 000 000
HUMANOS	1
MOLÉCULAS	0,000 000 001
ÁTOMOS	0,000 000 000 1
NÚCLEOS	0,000 000 000 000 001
ELECTRÕES	0,000 000 000 000 000 000 000 01(?)

Tabela 1

Já do lado das escalas maiores a situação parece ser radicalmente diferente. A grande conquista da Física do Universo (Cosmologia), no século XX, foi a **existência** de escalas para a Universo, isto é, para cada instante do Universo, há um tamanho máximo e uma duração máxima, não independentes mas ligados pela velocidade máxima de transmissão de informação, a velocidade da luz ( $c=3 \times 10^8$  m / s):

$$\text{Tamanho} = \text{Duração} \times \text{Velocidade da Luz} \quad (1)$$

ou seja,

$$10^{26} \text{ m} = (3 \times 10^{17} \text{ s}) \times (3 \times 10^8 \text{ m / s})$$

Tentar explicar como é que se chegou a esta conclusão é o objectivo deste artigo.

espectro), aparecendo riscas escuras. Os espectros são, de facto, muito parecidos com os códigos de barras dos produtos dos supermercados, e têm uma função semelhante: são a assinatura de identificação do produto, num caso, e da substância, no outro. Se se conseguia identificar o hélio na galáxia a milhares de anos-luz através da sua assinatura (do seu espectro), a verdade é que cada risca não estava bem no sítio certo: como se a cor absorvida estivesse deslocada para a zona do vermelho (maior comprimento de onda). Uma risca dum elemento que, na Terra, correspondia ao comprimento de onda  $\lambda$ , quando esse elemento estava numa galáxia distante, a mesma risca aparecia com o comprimento de onda  $\lambda_0$ . Define-se o **desvio para o vermelho** (*red shift*)  $z$  da seguinte maneira:

$$z = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1, \quad (2)$$

sendo, experimentalmente,  $z > 0$ .

A culminar todo o trabalho de Slipher e Hubble está a **lei de Hubble** (1929), segundo a qual o desvio para o vermelho  $z$  aumenta linearmente com a distância  $D$  da galáxia relativamente à nossa, ou seja,

$$zc = HD, \quad (3)$$

sendo  $H$  a famosa **constante de Hubble**. A constante não tem que ser realmente constante. Na nossa época  $H = H_0 = (70 \pm 7) \text{ km/Mpc/s}$ , mas pode ter tido outros valores noutras instantes do Universo. Note-se que  $1 \text{ Mpc} = 3,26 \times 10^6 \text{ anos-luz}$ .

Qual é a explicação para o desvio para o vermelho? A mais natural que ocorre é a baseada no efeito Doppler. Se uma fonte emitir sinais luminosos com periodicidade  $T$ , que se propagam com velocidade  $c$ , a distância espacial entre os sinais, num dado instante, será  $\lambda$  (comprimento de onda), com  $\lambda/T = c$ . Se a fonte se estiver a afastar de nós com velocidade  $V$ , à distância  $\lambda$  haverá que acrescentar o caminho percorrido pela fonte,  $VT$ , pelo que o comprimento de onda observado será  $\lambda_0 = \lambda + VT = \lambda \left(1 + \frac{V}{c}\right)$  (efeito de Doppler não relativista). A explicação do desvio para o vermelho ( $\lambda_0 > \lambda$ ) estaria então no **afastamento** das galáxias (ter-se-á  $\lambda + VT$  e não  $\lambda - VT$ ). Neste caso,

$$z = V/c. \quad (4)$$

Do lado da teoria, é possível um Universo com afastamento de galáxias, um Universo em expansão. No caso de um Universo

sempre uniformemente preenchido (ou vazio) tem-se necessariamente

$$V = HD, \quad (5)$$

sendo  $V$  a velocidade instantânea de afastamento,  $D$  a distância e  $H$  a constante de proporcionalidade. Num balão em que estejam pintados pontos (galáxias) o afastamento destes, quando este se enche, segue a regra (5). Em particular, na nossa galáxia, tem-se sempre  $V = 0$  e  $D = 0$ . (Ver caixa.)

De facto, se duas galáxias estiverem às distâncias  $D$  e  $D'$  da minha galáxia, com a expansão tem-se sempre a relação de homotetia

$$D/D' = \text{const.} \quad (6)$$

(ver Fig.1). Diferenciando (6)

$$\frac{dD}{D'} - \frac{D}{D'^2} dD' = 0 \quad (7)$$

e ainda, escrevendo  $V = dD/dt$  e  $V' = dD'/dt$ ,

$$\frac{V}{D} = \frac{V'}{D'} = \text{const.} = H \quad (8)$$

que é a relação (5).

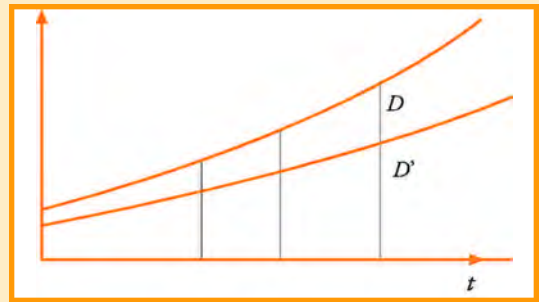


Fig.1. Em qualquer instante, a razão entre as distâncias a duas galáxias de referência é constante:  $D/D' = \text{constante}$

É uma tentação identificar (5) com (3), o que é automático no caso do efeito Doppler não relativista (4). Mas, se fizermos isso, a consequência imediata, vinda da Relatividade restrita, é que

$$z \leq 1. \quad (9)$$

Ora hoje em dia medem-se desvios para o vermelho com  $z > 1$  ! Mas note-se que falta a correcção relativista à fórmula de Doppler (devido à dilatação do tempo), ou seja, que se deverá usar não (4) mas

$$z = \sqrt{\frac{1 + V/c}{1 - V/c}} - 1 \quad (10)$$

o que permite  $z = 0$  para  $V = 0$ .

Há duas observações de extrema importância a fazer agora:

### 1) DESVIO PARA O VERMELHO DEVIDO À EXPANSÃO

O desvio para o vermelho não é, de facto, resultado do efeito Doppler. As galáxias não se estão a **mover no espaço**, a afastar-se umas das outras (aí sim, teríamos efeito Doppler), mas é o **espaço que expande** (o balão que enche). As galáxias são teoricamente tratadas como se estivessem incrustadas no espaço (o que faz lembrar as estrelas fixas no céu!) e os movimentos relativos (rotação de uma galáxia, por exemplo) são ignorados. Há um rescalonamento geral e o desvio para o vermelho não é mais do que a consequência desse efeito:

$$z = \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 = \frac{D_0}{D} - 1, \quad (11)$$

sendo  $D_0$  a distância medida hoje a determinada galáxia e  $D$  a distância na altura da emissão da luz.

O curioso é que na fórmula (11) não entra a velocidade  $V$  de afastamento da galáxia! A maneira como se enche o balão não é importante, pois só contam os tamanhos inicial e final do balão. Isto não é efeito Doppler!

O desvio para o vermelho é infinito quando  $D = 0$  (já veremos o que isso quer dizer). A informação mais antiga que temos provém da radiação electromagnética de fundo e corresponde a  $z = 1000$ . A partir do estudo de galáxias distantes (em particular, de supernovas) chegou-se a  $z = 1,5$ .

Convém notar que, para distâncias pequenas, valores de  $z$  pequenos, a velocidade  $V$  de afastamento poderá ser muito menor do que as velocidades locais (lembrar a Eq. (5)). Tal significa que, quando estudamos o sistema solar ou outros sistemas na nossa galáxia, podemos esquecer a expansão!

### 2) A IDADE DO UNIVERSO

Se a taxa de afastamento de determinada galáxia for constante ao longo do tempo, isto é, se

$$\frac{dD}{dt} = V, \quad (12)$$

com

$$V = V_0 \quad (13)$$

o valor actual, tem-se então

$$D_0 - D = V_0 (t_0 - t) \quad (14)$$

(ver Fig. 2). Mais uma vez encontramos uma relação de homotetia (no tempo). A recta da minha galáxia e a recta da galáxia em estudo encontram-se num ponto:  $D = 0$ ,  $t = 0$ . Este ponto corresponde ao "começo" do Universo (*Big-Bang*), obtendo-se de (14) que

$$t_0 = \frac{1}{H_0} = 10^{10} \text{ anos}, \quad (15)$$

que é a "idade" do Universo. Nesta mesma aproximação,  $V = V_0 = \text{const.}$ , haverá galáxias que se estão a afastar com a velocidade da luz,

$$V = V_0 = c. \quad (16)$$

Tal define o Universo observável,

$$D_{MAX} = c \times \frac{1}{H_0} = 10^{10} \text{ anos-luz}, \quad (17)$$

já que, para velocidades de afastamento  $V > c$ , não existe informação que possa chegar até nós.

Em geral  $V$  não é constante no tempo e podemos ter um Universo acelerado ou desacelerado. (Ver caixa.)

É de notar que estes cálculos só são válidos se  $V = \text{constante}$  ao longo do tempo cosmológico. Em geral,  $D$  não cresce linearmente com  $t$ , como na Fig.2, e portanto

$$\ddot{D} = \frac{d^2 D}{dt^2} \begin{matrix} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{matrix} \quad (18)$$

Podemos ter aceleração ou **desaceleração** na expansão do Universo. Tal como se define uma constante universal (dependente do tempo!)  $H$ , define-se um termo de desaceleração invariante de escala (dependente do tempo!)  $q_0$ ,

$$q_0 = - \frac{\ddot{D}}{DH^2} \quad (19)$$

Este termo é positivo quando há desaceleração.

Por exemplo, se  $H = \text{constante}$  no tempo, vem.

$$\frac{dD}{dt} = H_0 D \quad (20)$$

e, procedendo como antes,

$$D_0 = D e^{H_0 t} \quad (21)$$

com

$$\dot{D}_0 = D_0 H_0,$$

$$\ddot{D}_0 = D_0 H_0^2,$$

$$q_0 = -1 \text{ (aceleração)} \quad (22)$$

Este Universo é o chamado **Universo inflacionário** que introduz um crescimento exponencial das distâncias com o tempo, Eq.(21), e que permite perceber a homogeneidade e a isotropia do Universo para largas escalas.

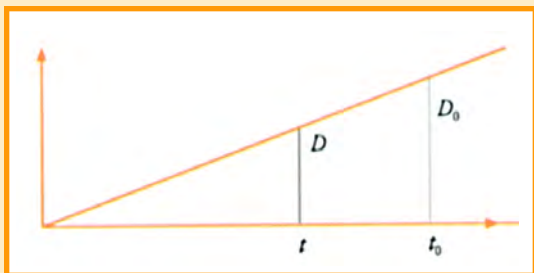


Fig. 2. Se a velocidade de afastamento  $V_0$  de dada galáxia for constante, a distância cresce linearmente com o tempo,  $D = V_0 t$ , e tem-se a Eq.(14).

Não sabemos se vivemos num Universo inflacionário, em que a expansão é exponencial no tempo, mas tudo indica (a partir da observação de supernovas em galáxias distantes) que, pelo menos, o Universo tem expansão acelerada!

## ESCALAS E COISAS

As considerações feitas até aqui têm tido um carácter essencialmente geométrico. Mas o Universo não é só geometria, tem coisas, coisas essas que, aliás, ajudam a definir a geometria (Einstein *dixit!*). O uso da palavra "coisas", com toda a sua ambiguidade, é propositado, já que as "coisas" podem ser diferentes em épocas diferentes: um Universo de galáxias e radiação de fundo, como acontece hoje, um Universo que é uma sopa de quarks e glúões, como poderá ter acontecido nos primeiros 10 microsegundos ou, caminhando ainda mais para trás no tempo, um Universo de supercordas...

Seja como for, se as "coisas" estiverem, ou tiverem estado, em interacção umas com as outras, podemos definir propriedades termodinâmicas para o Universo, em particular, podemos falar de temperatura  $T$ . E, se formos aos livros, recordaremos que a temperatura é energia por grau de liberdade.

Se escrevermos a fórmula relativista que relaciona a energia  $E$ , o momento linear  $p$  e a massa  $m$ , vem

$$(E/c)^2 = p^2 + (mc)^2, \quad (23)$$

e, se nos lembrarmos da relação entre momento linear e comprimento de onda (relação de de Broglie),

$$p = h/\lambda, \quad (24)$$

sendo  $h$  a constante de Planck, e nos esquecermos do termo de massa em (23), que é irrelevante para energias muito grandes, obtemos

$$E \sim 1/\lambda, \quad (25)$$

Isto quer dizer que a energia associada às "coisas" sofre um desvio para o vermelho e que, portanto, o mesmo ocorre com a temperatura,

$$T \sim 1/\lambda \sim 1/D, \quad (26)$$



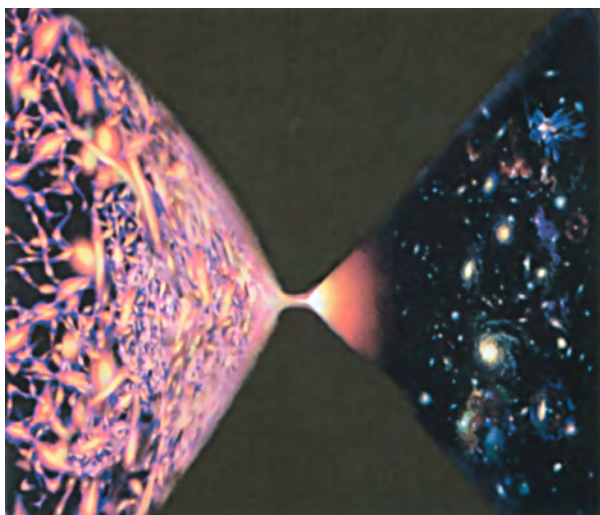
sendo  $D$  uma distância característica de escala. Em conclusão: a temperatura diminui à medida que a expansão avança.

Se andarmos para trás no tempo a temperatura vai, portanto, aumentar. Ora, se a temperatura aumenta, a estabilidade das "coisas" pode ser posta em causa, já que as estruturas existem enquanto a energia potencial de ligação – que origina as forças da ordem – se sobrepuser à energia térmica – que origina as forças da desordem.

E aqui chegamos ao segundo grande argumento – agora não puramente geométrico – em favor do *Big-Bang*: a existência duma relíquia do Universo passado, a radiação electromagnética de fundo. Nos anos 60 do século passado, Penzias e Wilson descobriram que havia uma radiação electromagnética, dominante na banda das micro-ondas e ondas de rádio, que era isotrópica (pelo menos, quando vista da Terra!) que parecia indicar que o Universo, como um todo, radiava. O Universo era um objecto de estudo dos cientistas...

A história da radiação electromagnética, dita de fundo, é a história da criação dos átomos – electricamente neutros – deixando a radiação – fotões – perdida no espaço-tempo. Electrões e protões podem radiar (emitir) fotões, enquanto átomos, quer dizer, electrões + protões, já que são neutros, não radiam nada. A radiação de fundo retrata esse momento na expansão em que a temperatura, que vai baixando, deixou de ser capaz de destruir as ligações entre protões e electrões e em que os fotões ficaram livres.

O retrato obtido é, mais uma vez, um retrato que sugere isotropia e homogeneidade. É, afinal, o retrato que está de acordo com a expansão do *Big-Bang*.



## CONCLUSÕES

É difícil fugir à conclusão de que vivemos num Universo em expansão, provavelmente uma expansão acelerada. É possível inferir uma idade para o Universo e, a partir daí, um tamanho máximo para o que é possível observar. Chegamos assim aos  $10^{10}$  anos e aos  $10^{26}$  metros.

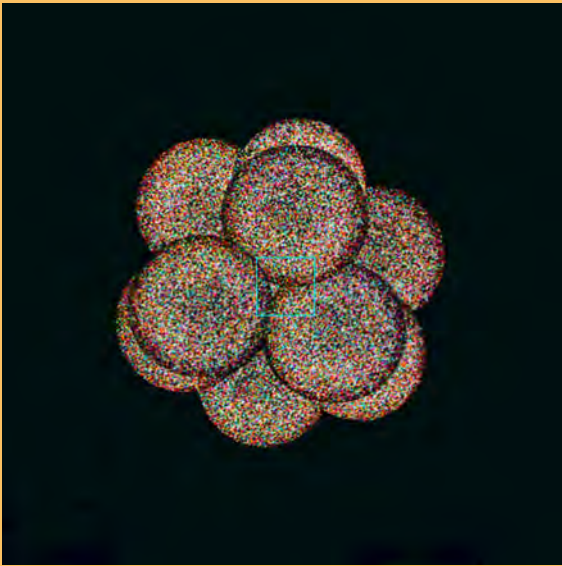
Qual é o grau de confiança que existe quanto a estas conclusões? É razoável, mas, como sempre em ciência, cada resposta levanta novas perguntas. Por exemplo: porquê um *Big-Bang*? Porquê uma condição inicial tão singular, um concentrado de matéria com densidade e temperatura tão grandes? Como é que se chegou ao *Big-Bang*? Como era o Universo antes do tempo que nós conhecemos?

Como habitualmente, há mais perguntas do que respostas...

## NOTA

\* Esta e todas as outras imagens que abrem os artigos principais foram retiradas do livro "Potências de Dez", Philip Morrison, Phylis Morrison e Eames Office, Porto Editora, 2001, com a amável autorização da editora.

# DOS ÁTOMOS AOS



$10^{-14}$  m

Como são os átomos? Que tamanho têm? Do que são feitos?

Em 1905 Einstein publicou o seu famoso artigo, "Sobre a electrodinâmica dos corpos em movimento", que é universalmente considerado o trabalho que alicerçou a teoria da relatividade. Nesse mesmo ano, publicou um outro artigo referente ao estudo do movimento browniano.

Talvez não tão conhecido como o primeiro dos trabalhos referidos, este estudo explica o misterioso movimento errático de partículas em suspensão em líquidos. Esta explicação, que se baseia no choque das partículas com as moléculas do líquido, foi na altura considerada uma prova da teoria atómica da matéria. É interessante recordar que, apesar do enorme sucesso da interpretação atomista das leis das reacções químicas, no princípio do século passado a teoria atómica ainda estava longe de ser universalmente aceite. Hoje, passados quase cem anos, a situação é bem diferente. Sabemos que a cada elemento da tabela periódica corresponde um átomo. São estes átomos que interagindo entre si, reagindo, formam as inúmeras moléculas que ocorrem na Natureza e que todos os dias os químicos sintetizam nos seus laboratórios.

Como são os átomos? Que tamanho têm? De que são feitos? Como uma imagem vale mais do que mil palavras, a fig. 1 mostra os átomos à superfície de um cristal de silício. A fotografia foi obtida com um microscópio de efeito de túnel. Este dispositivo, ao varrer a superfície do cristal, consegue detectar a topografia da superfície. Os átomos são as cadeias montanhosas dispostas em filas separadas por vales com 1,63 nm (1 nanometro = 1 nm =  $10^{-9}$  m) de largura; dentro de cada fila, os átomos estão separados por

AUGUSTO BARROSO

Centro de Física Teórica e Computacional, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa,

barroso@cii.fc.ul.pt

# QUARKS

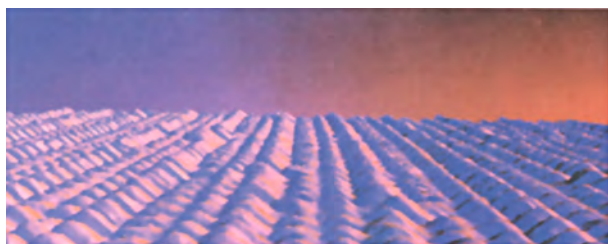


Fig. 1. Imagem, feita com um microscópio STM, da superfície de um cristal de silício. (Foto APS).

0,77 nm. Em resumo, à escala do nanómetro, a superfície polida de um cristal de silício apresenta este aspecto rugoso. Como é o interior de cada um destes picos montanhosos? Dito por outras palavras, como são feitos os átomos? Infelizmente agora não tenho uma fotografia para mostrar. Mas, se tivesse uma fotografia à escala do fermi (1 fermi = 1 fm =  $10^{-15}$  m), verificaríamos que, no centro da montanha, existia uma estrutura quase esférica com raios que vão desde cerca de 1 fm, para os átomos mais leves, até cerca de 10 fm, para os átomos mais pesados, como por exemplo o chumbo. Rodeando esse núcleo central, que em alguns casos pode ser mais semelhante a uma bola de rãguebi ou a um disco do que a uma bola de futebol, a maior parte do espaço está vazio. É verdade: o átomo é cerca de 10 000 vezes maior do que o núcleo e em toda essa região enorme não existe quase nada: nela apenas se passeiam alguns electrões! Para ter uma ideia da diferença de escala, imaginem um grande estádio de futebol. No centro do relvado coloquem um berlinde com 1 cm

de raio. Se este berlinde fosse o núcleo de um átomo, os respectivos electrões distribuir-se-iam numa região esférica com 100 m de raio, isto é, uma região suficiente para cobrir o estádio da Luz com bancadas e tudo.

O átomo mais simples, o átomo de hidrogénio, só tem um electrão e o seu núcleo é simplesmente constituído por uma única partícula, o protão. Este tem uma carga eléctrica positiva ( $e = 1,6 \times 10^{-19}$  C) que é exactamente igual e de sinal oposto à carga eléctrica do electrão. Deste modo, o átomo é neutro. É assim para todos os outros átomos. O número de electrões,  $Z$ , vai crescendo. É dois para o hélio, seis para o carbono, noventa e dois para o urânio, por exemplo. O valor de  $Z$  caracteriza o elemento químico de que estamos a tratar. Para cada  $Z$  os átomos respectivos têm núcleos com  $Z$  protões e  $N$  neutrões. Como estes últimos são electricamente neutros, a igualdade entre os módulos das cargas do electrão e do protão é o elemento crucial que assegura a neutralidade da matéria. Dito de outra maneira, a carga eléctrica só pode existir em múltiplos desta carga elementar  $e$ . A carga eléctrica está quantificada.

Quando se estuda o mundo à escala do átomo não são apenas as dimensões que mudam. As leis que descrevem a Física à escala atómica não podem ser inferidas das leis que regem o mundo a escala humana por uma mera extrapolação da escala. Assim, por exemplo, os átomos para além de poderem existir no seu estado fundamental, isto é, no seu estado de energia mínima, podem existir em estados com mais energia, estados excitados. Contudo, estas energias de excitação também estão quantificadas. Só podem tomar valores bem determinados que são específicos de cada espécie atómica. Quando um determinado átomo excitado passa ao estado fundamental emite essa energia na forma de luz. Como os níveis de energia são bem determinados para cada átomo, a luz que cada um pode emitir é uma característica desse átomo. Funciona como uma impressão digital que univocamente permite caracterizar o elemento que emitiu essa luz. Deste modo, a análise da luz emitida pode ser usada para determinar os elementos presentes numa dada amostra. Foi deste modo que, analisando a luz solar, em 1868, Janssen e Lockyer descobriram o hélio. Só cerca de trinta anos depois, em 1895, é que Sir William Ramsay detectou o mesmo elemento em minérios de urânio.

## OS NÚCLEOS ATÓMICOS

Voltemos aos núcleos. É neles que está concentrada a maior parte da massa dos átomos. A sua densidade é enorme, da ordem de  $10^{17}$  kg/m<sup>3</sup>, e é praticamente constante para todos os núcleos. Cada átomo, caracterizado, como vimos, por um determinado número atómico  $Z$  pode ter vários possíveis núcleos. Todos têm o mesmo número de prótons,  $Z$  mas diferem no número  $N$  de neutrões. A soma  $Z+N$  da o total de nucleões e designa-se por número de massa,  $A$ . Os diferentes núcleos com o mesmo  $Z$  e diferente  $A$  designam-se por isótopos. Por exemplo, conhecem-se quinze isótopos do elemento oxigénio ( $Z=8$ ) com números de massa que vão de  $A=12$  a  $A=26$ . Destes, apenas os de número atómico  $A=16, 17$  e  $18$  são estáveis e o primeiro  $^{16}\text{O}$  corresponde a mais de 99% do oxigénio natural. Os restantes são radioactivos, isto é, transformam-se espontaneamente noutros núcleos. A sua grande maioria tem este destino em virtude da interacção fraca, que é uma das quatro interacções fundamentais que explicam o funcionamento do universo. Assim, o  $^{19}\text{O}_8$  transforma-se em  $^{19}\text{F}_9$ , emitindo um electrão e um antineutrino. Como resultado da mesma interacção fraca, o mercúrio 197 ( $^{197}\text{Hg}_{80}$ ) transforma-se em ouro 197 ( $^{197}\text{Au}_{79}$ ). O sonho dos alquimistas, transmutar elementos noutros e em particular os metais no metal mais nobre de todos, o ouro, é feito "voluntariamente" pela Natureza.

Examinemos com mais detalhe os dois exemplos de declínios radioactivos que apresentámos. Em ambos os casos o número  $A$  permaneceu constante. Contudo, no primeiro exemplo, o  $Z$  aumentou de uma unidade, ao passo que no segundo diminuiu também de uma unidade. Sabemos hoje que estes dois tipos de interacção fraca correspondem, no primeiro caso, a um neutrão que passou a próton e, no segundo caso, à transição inversa, isto é, à passagem de um próton a neutrão. Percorrendo a tabela dos vários núcleos conhecidos, os que ocorrem naturalmente e aqueles, mais numerosos, que o homem aprendeu a fabricar, poderíamos dar centenas de exemplos de declínios fracos. Mas não faz muito sentido multiplicar os exemplos. Apenas gostaria de apresentar mais uma reacção também devida à força fraca. Para que não fiquem com a ideia de que a interacção fraca apenas origina a transformação de um núcleo noutro, escolhi um exemplo oposto. Trata-se da fusão entre dois prótons para originarem um núcleo de deutério ( $^2\text{H}$ ) um positrão ( $e^+$ ) e um neutrino ( $\nu$ ). Esta é a primeira de uma série de reacções que ocorrem no Sol e que, ao consumirem hidrogénio, produzem a energia que nos aquece e ilumina. Por outras palavras, sem a interacção fraca o Sol não brilharia!

À escala de  $10^{-16}$  m os prótons e neutrões não são objectos simples. Apresentam uma estrutura interna que pode ser descrita como se cada um deles fosse constituído por três constituintes elementares chamados quarks que, incessantemente, trocam entre si gluões. Antes de tentarmos explicar o que fazem estes novos actores voltemos aos átomos. O que é que mantém os electrões ligados aos respectivos núcleos dos átomos? Penso que mesmo os leitores mais afastados da cultura científica saberão que cargas eléctricas de sinais contrários se atraem. Pois bem, é essa força, designada por interacção electromagnética, a responsável pela estabilidade dos átomos. Numa linguagem mais correcta, as forças fundamentais, das quais até agora já é a segunda que apresento, estão também quantificadas. Cada uma das partículas não exerce sobre a outra a força que quer. Antes interage com ela permutando como que "grãos de força" a que chamamos quanta do campo. Para a interacção electromagnética estes quanta chamam-se fótons. São justamente os "grãos de luz" que conhecemos...

## OS QUARKS

Podemos agora voltar aos quarks. Estes têm uma espécie de carga eléctrica que os físicos designam por cor. O campo da cor é parecido ao campo electromagnético e os gluões são os quanta deste campo. Dito de outro modo, dois quarks atraem-se porque ambos têm cor e permutam entre si gluões. Desta permuta resulta a força que os une, denominada interacção forte. Assim, ao nível subatómico, existem duas interacções de cuja existência não suspeitávamos. A interacção forte descrita por uma teoria chamada cromodinâmica e a interacção fraca de que já falámos. Devo acrescentar que também esta interacção é mediada pela permuta de quanta que são os bosões  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z$ , descobertos no princípio da década de oitenta no CERN em Genebra, na Suíça (Fig. 2).



Fig. 1. Equipa da experiência Delphi, no CERN, diante do detector. (Foto do CERN).

A última das interações fundamentais é a interacção gravítica. É tão fraca que o seu efeito é irrelevante à escala subatómica. Para que apreciemos quão fraca é a gravidade digam-vos que a atracção gravítica entre dois electrões colocados a uma dada distância é  $10^{42}$  vezes menor do que a repulsão eléctrica entre as mesmas partículas colocadas à mesma distância. A primeira força é  $10^{42}$  da segunda! Este número é tão pequeno que é difícil apercebermo-nos da sua grandeza. Comparemo-lo com outro. A velocidade da luz é muito grande, cerca de 300 000 quilómetros por segundo. Um protão é muito pequeno, tem cerca de  $2 \times 10^{-16}$  m. Então o tempo que a luz leva a percorrer esta distância é extremamente pequeno. Quando comparado com a idade do universo este tempo é também cerca de  $10^{42}$  vezes mais pequeno.

A tabela 1 resume os constituintes básicos da matéria. Até agora só falámos das partículas que nessa tabela constituem a coluna denominada primeira família. Efectivamente, para "fazer" os protões, p, e os neutrões, n, só precisamos dos quarks chamados u e d. Com dois u e um d temos um p e com dois d e um u fazemos um n. Tendo p e n podemos fazer os núcleos de todos os isótopos e tendo os núcleos e juntando-lhes o respectivo número de Z electrões fabricamos os átomos de todos os elementos. Daqui em diante, com a química apropriada fazemos todas as moléculas desde as mais pequenas, como o ácido clorídrico ou a água, até às gigantes, como o DNA. O outro elemento da primeira família é o neutrino electrónico, parceiro do electrão, e, tal como ele, insensível à interacção forte. Designam-se ambos genericamente por leptões.

	1ª Família	2ª Família	3ª Família
Leptões	Neutrino electrónico e	Neutrino muónico $\mu$	Neutrino do tau
	Electrão e	Muão $\mu$	Tau
Quarks	Up u	Charme c	Top t
	Down d	Strange s	Bottom b

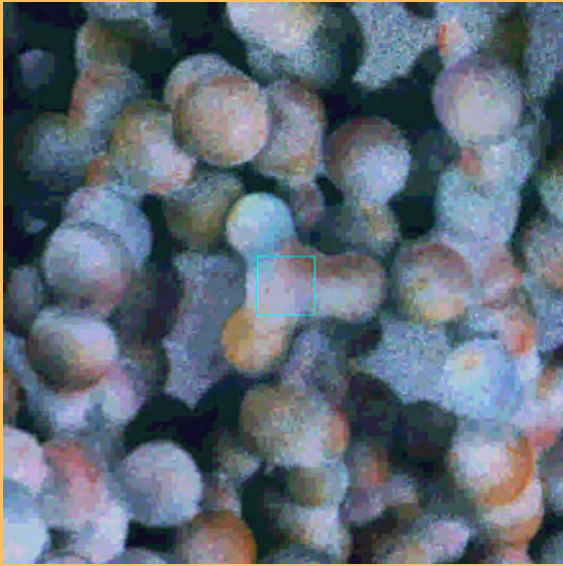
Tabela 1

Para que servem então os outros leptões e quarks? Não sabemos. O que podemos dizer é que a Natureza decidiu fazer mais duas cópias de si própria. O muão é em tudo parecido com um electrão. Apenas tem uma massa que é

cerca de duzentas vezes maior. Em tudo o resto é idêntico ao electrão. Tão idêntico que podemos fazer átomos substituindo electrões por muões. De igual modo o tau também parece um electrão mas tem uma massa ainda maior, cerca de 3500 vezes maior. Quanto aos outros quarks também podemos fazer com eles partículas idênticas aos nucleões. Assim o  $p$  é constituído pelos quarks u, d e b, e o  $n$  é o estado uds. Todos estes estados de três quarks, dos quais se conhecem centenas de exemplos, são sistemas neutros do ponto de vista da cor. Do mesmo modo que a sobreposição de duas cargas eléctricas iguais em módulo e de sinal contrário produz um sistema electricamente neutro, a sobreposição das três cores também produz um estado de cor neutra, branco digamos. Contudo, na cromodinâmica existe ainda uma outra possibilidade de formar estados brancos. Com efeito, a cada partícula corresponde uma anti-partícula que tem a mesma massa mas tem anti-cor em vez de cor. Então um sistema constituído por um quark de cor y e um anti-quark com anti-cor  $\bar{y}$  também é neutro. Estes estados chamam-se mesões, ao passo que os estados de três quarks se designam por bariões. O mais leve dos mesões é constituído por um quark u e por um anti-quark d,  $u\bar{d}$ , e chama-se  $\pi^+$ . A sua anti-partícula é, obviamente,  $\bar{u}d$ , e chama-se  $\pi^-$ . As anti-partículas dos bariões são evidentemente formadas por três anti-quarks. Assim,  $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$  é o anti-protão, que foi produzido pela primeira vez no acelerador Bevatron, em Berkeley, na Califórnia, em Outubro de 1955, por uma equipa liderada por Emílio Segre.

Com um anti-protão e um positrão (anti-partícula do electrão) podemos fazer o átomo mais simples de anti-matéria: o anti-hidrogénio. Com este átomo, que foi obtido pela primeira vez no CERN em 1995, iniciou-se a pesquisa sistemática das propriedades da anti-matéria. A teoria, tal como a conhecemos actualmente, implica que este átomo de anti-matéria deverá ser igual ao átomo de hidrogénio normal. Com efeito, a interacção electromagnética é simétrica para esta troca de partículas em anti-partículas a que se dá o nome de simetria C ou simetria de conjugação de carga. Este é um exemplo das várias simetrias que desempenham um papel relevante no estudo das partículas elementares. Seria interessante aprofundar este assunto, mas terá que ficar para uma outra oportunidade...

Nesta procura da compreensão da estrutura da matéria chegámos aos quarks e leptões. Poderá perguntar-se: e estes que tamanho têm? Qual é a sua estrutura? A resposta actual a estas perguntas é que não têm estrutura. São os constituintes elementares. Com eles tudo é feito e eles não são feitos de nada. Esta é a resposta actual, mas não será certamente a resposta definitiva. Aliás, em ciência nunca nenhuma resposta é definitiva.



$10^{-9}$  m

Ficou famosa a frase de Feynman:  
"Há muito espaço lá em baixo".

CARLOS FIOLHAIS

Centro de Física Computacional e Departamento de Física  
da Universidade de Coimbra  
tcarlos@teor.fis.uc.pt

JORGETRINDADE

Escola Superior de Tecnologia e Gestão  
Instituto Politécnico da Guarda  
jtrindade@ipg.pt

# A NANOTECNOLOGIA DO FUTURO

Se é verdade que a tecnologia é produto da ciência não é menos certo que a tecnologia está por vezes na génese da própria ciência. O físico norte-americano Freeman Dyson [1], investigador no Instituto de Estudos Avançados de Princeton, defende que um novo instrumento pode despoletar ciência inovadora e fascinante. A Astronomia seria praticamente inexistente sem o telescópio. A Biologia quase não teria crescido sem o microscópio. As actuais Ciências da Complexidade nem teriam nascido não fora a disponibilidade do computador.

Um domínio da Física, Química e Engenharia dos Materiais que mais "excitação" está a causar actualmente é a nanotecnologia, a manipulação de átomos e moléculas individuais. Este novo ramo da ciência e da tecnologia não seria possível sem um instrumento que permitisse não só ver como mover os átomos. Chama-se microscópio de varrimento por efeito túnel, em inglês "scanning tunnel microscope" (em abreviatura STM, Fig. 1). O instrumento foi criado em 1982 pelo físico suíço Heinrich Rohrer e pelo físico alemão Gerd Binnig que, por essa invenção, ganharam justamente o Prémio Nobel da Física de 1986. No microscópio de efeito túnel, com a ajuda de uma ponta ultra-fina, guiam-se átomos estranhos sobre uma superfície colocando-os com extraordinária precisão sobre um certo sítio.

De início, a construção do microscópio era difícil e cara, mas, em poucos anos, ela democratizou-se ao ponto de uma pequena empresa suíça, criada por estudantes de

# A OU A ENGENHARIA

doutoramento, produzir hoje microscópios relativamente económicos que podem estar disponíveis nas escolas secundárias. Se os átomos permanecem ausentes ou apenas "virtuais" nos livros escolares de Física, no STM eles aparecem bem reais e creíveis. Perante uma tal evidência experimental, não há hoje que ter dúvidas a respeito daquilo que há cem anos se chamava "hipótese atômica" e há mais de dois mil anos, na antiguidade grega, era apenas uma liberdade poética. Escreveu Demócrito com uma premonição notável: *Só há átomos e espaço vazio*.

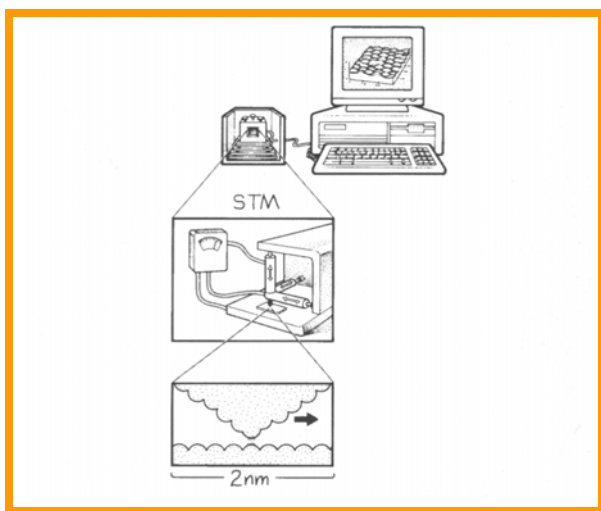


Fig. 1. O microscópio de varrimento por efeito túnel (STM). O STM possui uma agulha ultra-fina por onde passa uma corrente eléctrica. Essa agulha é aproximada muito perto da superfície que se pretende visualizar. Movimentando o STM é possível arrastar um átomo da superfície (adaptado de [2]).

Se só há átomos e espaço vazio e se os átomos podem vagar pelo espaço vazio, poder-se-á pensar em guiar os átomos juntando-os de acordo com um designio pré-definido, de modo a formar moléculas (ou agregados de átomos) e até materiais mais ou menos extensos. O microscópio de efeito túnel (como outros microscópios atômicos, como o chamado microscópio de força atômica, na sigla inglesa AFM) permite precisamente guiar os átomos e juntá-los à medida daquilo que o experimentador quer. Esta possibilidade – que é a base da nanotecnologia – foi prevista por um físico teórico, o norte-americano Richard Feynman (como Roehrer e Binnig, Prémio Nobel da Física), logo nos anos 50.

## O PROFETA FEYNMAN

Na conferência de Feynman que inaugurou a nanotecnologia (e que ilustra que não há nada mais prático do que uma boa teoria) ficou famosa uma frase: *There is plenty of room at the bottom (Há muito espaço lá em baixo)* [3]. Feynman anunciou um prémio para quem reduzisse de um factor 1/25000 as letras de um livro (a escala é a que faz corresponder 1 km de terreno a 4 cm, que é usada nas cartas militares). O Sr. Feynman não estava a brincar e não demorou muito até se ver obrigado a entregar os dólares do prémio. Anos mais tarde, Eric Drexler, um graduado do Massachusetts Institute of Technology, retomou a visão de Feynman num ensaio em que teorizava sobre um "construtor" molecular – uma minúscula máquina que manipulava os átomos por forma a construir uma outra máquina igual a si própria e depois se replicava as vezes que fossem necessárias.

Não existe ainda a máquina de Drexler. Mas hoje em dia obtêm-se verdadeiros prodígios manipulando os átomos, proezas muito mais espectaculares do que a escrita minúscula de que falava Feynman: desde a sigla da maior empresa informática do mundo (que assim ficou com o cartaz mais pequeno do mundo) realizada num laboratório suíço usando apenas alguns átomos (Fig. 2) até à cara de Einstein com a língua de fora conseguida num laboratório japonês com alguns poucos átomos.

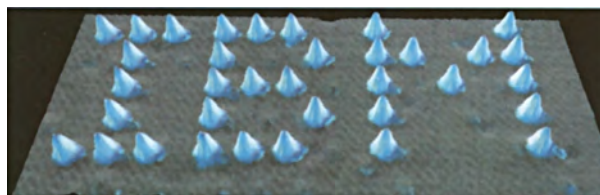


Fig. 2. Em 1989, os laboratórios da IBM em Zurique conseguiram manipular 35 moléculas de xénon (um elemento gasoso que existe na atmosfera em quantidades muito reduzidas) para se lerem, através de um microscópio de STM, as iniciais da empresa [4].

Há alguns anos, um grupo de alunos da Universidade de Cornell construiu uma minúscula guitarra de silício. Cada corda tinha 100 átomos de largura – toda a guitarra cabia numa única célula sanguínea do ser humano. Mais recentemente, investigadores de Cornell fizeram uma harpa usando o mesmo método.

Em 1998, a França, quando ganhou o Campeonato do Mundo de Futebol, recebeu dois troféus: o primeiro tinha 36 cm, o segundo era 10 milhões de vezes mais pequeno – era constituído por apenas três moléculas!

O ano de 2001 foi muito frutífero no desenvolvimento desta ciência. Em Março, foi construído, no Instituto de Tecnologia da Geórgia, uma balança a partir de nanotubos (folhas de carbono enroladas em forma de cilindro). Este dispositivo tem capacidade para pesar vírus individuais. Em Dezembro, cientistas da Universidade de Berkeley construíram um par de pinças capazes de agarrar em objectos moleculares. Os braços da pinça eram feitos de nanotubos ligados a eléctrodos de ouro. Uma vez que os tubos tinham condutividade eléctrica, as pinças podiam abrir os braços e agarrar os objectos. Os inventores acreditam que este tipo de ferramentas será essencial no fabrico de nanotransístores ou mesmo na manipulação de estruturas das células vivas.

Também a NASA se dedica à nanotecnologia, em particular ao desenvolvimento de nanomáquinas de tamanho atómico, construídas com os mesmos componentes que as máquinas ditas "normais": rodas dentadas, engrenagens, alavancas, motores, etc. Estes componentes, fabricados átomo a átomo, são feitos de materiais altamente resilientes (resiliência é a capacidade de resistência ao choque de um material) e quimicamente estáveis. Os nanotubos (de vários diâmetros) são mais fortes do que fibra de diamante e têm condutividade eléctrica semelhante à do cobre. Mais recentemente, conseguiu-se, a partir destes componentes, fazer um minúsculo motor molecular. O feito, anunciado em Setembro, deve-se a T. Ross Kelly, professor da Universidade de Boston. Trata-se de um motor com apenas 78 átomos arranjados em duas moléculas, uma em forma de estrela e outra, na qual assenta a primeira, em forma plana e que serve de base. A roda obtém a energia de uma das moléculas (denominada ATP, ou trifosfato de adenosina – uma das proteínas componentes do DNA, caracterizada pela sua condutividade eléctrica). Na mesma altura, cientistas da Universidade de Cornell, em Nova Iorque, construíram dois motores moleculares com algumas dúzias de átomos. Os engenheiros combinaram duas moléculas, uma sintetizada em laboratório e

outra de ATP, para produzir um rotor (a parte rotativa de um motor), que funcionou durante 40 minutos a três/quatro rotações por segundo.

## AS ESCALAS DO NANO

Mas porque se chama nanotecnologia à engenharia dos átomos e das moléculas? O prefixo nano é semelhante ao prefixo mili, que antes de metro significa um milésimo do metro, e ao prefixo micro, que antes de metro significa um milionésimo de metro. Um nanometro é um milésimo de milionésimo do metro, ou um milésimo do micrómetro, ou um milionésimo do milímetro. Esta escala é a característica dos grupos de átomos, as moléculas (como aquelas – DNA, proteínas, etc. – que são constituintes dos seres vivos) (Fig. 3). Se um metro se escreve abreviadamente 1 m, e um milímetro 0,001 m e 1 micrometro 0,000001, então 1 nanometro é 0,000000001 m. Escreve-se ainda mais abreviadamente  $10^{-9}$  m.

Pequeníssimo... Para se ter uma ideia da pequenez note-se que os átomos têm cerca de 1/10000 do tamanho de uma bactéria e que as bactérias têm 1/10000 do tamanho dos mosquitos.

À nanotecnologia estão associados os conceitos de posicionamento e auto-replicação. O primeiro pressupõe que cada átomo é colocado no seu devido lugar, o que implica a existência de robôs cuja dimensão e precisão moleculares permitam manipular e colocar num local exacto átomos e moléculas individuais. A auto-replicação envolve a construção de sistemas capazes de se copiarem a si próprios ou criarem outros sistemas.

O potencial da nanotecnologia vai bastante mais longe. Imagine-se o que seria "encolher" todo o conteúdo da Biblioteca Nacional num dispositivo do tamanho de um cubo de açúcar, usando um meio de armazenamento com capacidades na ordem dos muitos terabits ( $10^9$  bits). Ou aumentar, por um factor de milhões, a velocidade e eficiência dos *chips* dos computadores. No campo da medicina as aplicações são fantásticas: imaginem-se dispositivos invisíveis com capacidade para circular na corrente sanguínea e identificar agentes estranhos ou detectar e reparar células cancerígenas e tecidos danificados, transportar fármacos e provocar reacções químicas terapêuticas.



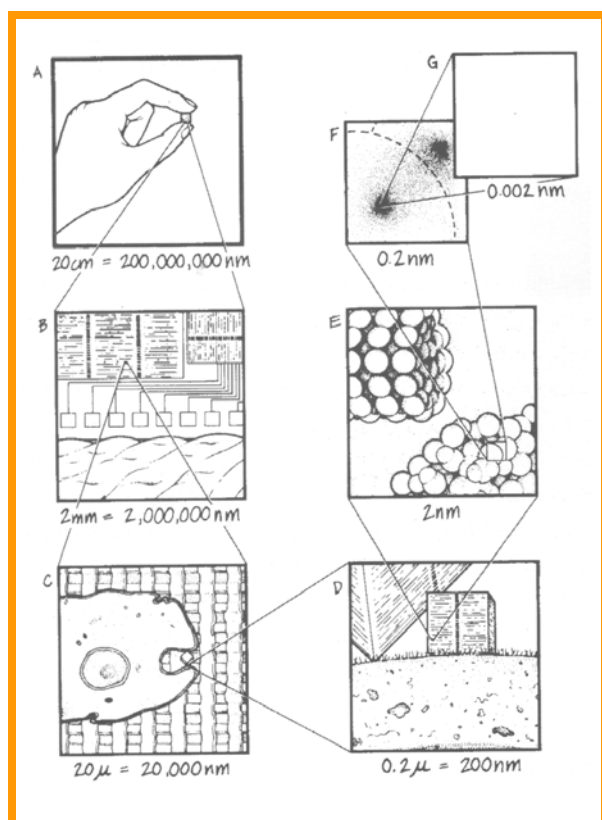


Fig. 3. A matéria às diferentes escalas microscópicas. (A) Uma mão segura um chip de computador. (B) O chip ampliado 100 vezes. (C) Ampliação de 100 vezes mostrando uma célula viva sobre o chip. (D) Ampliação de 100 vezes mostrando dois nanocomputadores na parede da célula. (E) Ampliação de 100 vezes mostrando uma proteína (canto inferior direito) e um dispositivo molecular artificial (canto superior esquerdo), que poderá ser uma peça do nanocomputador do quadro D. (F) Ampliação de 10 vezes mostrando dois átomos da proteína com as respectivas nuvens electrónicas. (G) Nova ampliação de 100 vezes mostrando o núcleo do átomo como um ponto [2].

## AS ARTES DA SIMULAÇÃO

O desenvolvimento das nanotecnologias repousa sobre a possibilidade de utilizar as propriedades da matéria à escala nanométrica tão bem descritas pela Mecânica Quântica. A Física e a Química Computacional, em particular a simulação e modelação molecular, desempenharão um papel muito importante nesta revolução tecnológica. Com a simulação molecular é possível prever comportamentos de sistemas moleculares e do estado sólido que seria difícil de obter por outros meios.

A simulação molecular permitiu, por exemplo, o estudo e desenvolvimento dos nanotubos de carbono através referidos (Fig. 4). Estas estruturas nanométricas com aplicações na electrónica foram teoricamente previstas, tendo o

seu comportamento sido analisado por simulações. Os nanotubos são estruturas cilíndricas de átomos de carbono aproximadamente 10000 vezes mais finos do que um cabelo humano [5].

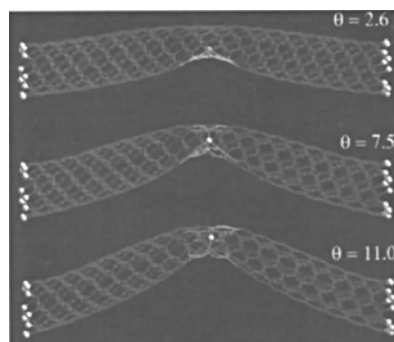


Fig. 4. Simulação de nanotubos dobrados no meio. Trata-se de estruturas cilíndricas de átomos de carbono aproximadamente 10000 vezes mais finas do que um cabelo humano [5].

Um destes dias iremos buscar ao mundo material apenas os átomos avulsos para depois os reunir para os fins que pretendemos. Uma das esperanças da nanotecnologia é a construção de materiais compostos, que são materiais constituídos por agregados de átomos que o computador pode simular. Novos materiais artificiais construídos desta maneira prometem ter propriedades únicas: para dar um exemplo sugestivo, podemos querer um material que seja transparente como o vidro mas tão duro como o alumínio... Esta é uma nova engenharia à escala atómica, à escala de Lilliput, que é apenas remanescente da engenharia macroscópica, à escala de Gulliver. Juntar-se-ão átomos como quem junta tijolos. Far-se-ão nanomateriais como quem ergue uma parede.

## REFERÊNCIAS

- [1] Freeman Dyson, "O Sol, o Genoma e a Internet", Temas e Debates, Lisboa, 2000.
- [2] K. Eric Drexler, Chris Peterson e Gayle Pergamit, "Unbonding the Future – The Nanotechnology Revolution", William Morrow and Company Inc., New York, 1991.
- [3] Richard Feynman, There's plenty of room at the bottom, Engineering and Science, 23, 1960.
- [4] [www.almaden.ibm.com/almaden/projects.html](http://www.almaden.ibm.com/almaden/projects.html)
- [5] [www.accelrys.com](http://www.accelrys.com)



$10^{-8}$  m

No núcleo celular encontramos um emaranhado de grossos cabos suspensos.

# O GENOMA HUMANO O LIVRO DA VIDA

Vamos penetrar no local mais secreto do corpo humano. O cofre-forte que contém toda a informação necessária para originar um ser humano, o genoma. Onde procurar o genoma? No cérebro, no coração, no sangue ou num cabelo? Na verdade, podemos encontrar o genoma em qualquer uma destas partes do corpo humano. Todos os órgãos e tecidos do corpo humano são constituídos por pequenas peças, as células, e cada célula tem no seu interior uma cópia do genoma. Tal como num "Lego", com as mesmas peças é possível construir o cérebro ou o coração. Paradoxalmente, a decisão de juntar as células com cópias iguais do genoma de forma a originar o cérebro ou o coração é comandada pelo próprio genoma. Confuso? Vamos tentar perceber.

Para analisarmos o genoma de um ser humano basta arrancar um cabelo. É na raiz dele que se encontram as células desta parte do corpo. No interior de cada célula existe uma esfera oca, o núcleo. A superfície da esfera está crivada de orifícios, os poros nucleares. Ao aproximarmos-nos de um destes orifícios deparamos com o primeiro enigma desta aventura. Cada poro está preenchido por uma rede e é necessária uma palavra-passe para o atravessar.

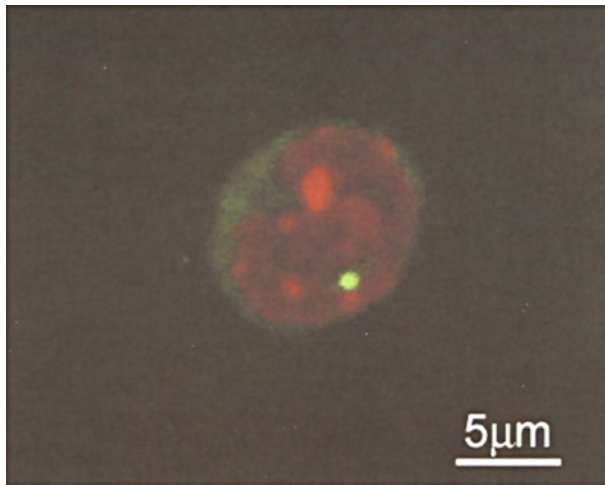
Ao abrir-se, o poro nuclear dá-nos acesso ao interior do núcleo, onde encontramos um emaranhado de grossos cabos suspensos a partir da superfície interna da esfera. São estes 46 cabos (cromossomas) que constituem o genoma humano. Ao olhar mais de perto, cada cabo é um tubo de parede semi-transparente. No seu interior

MARIA DO CARMO FONSECA

Instituto de Medicina Molecular, Faculdade de Medicina da  
Universidade de Lisboa

carmo.fonseca@clix.pt





**Fig. 1.** A figura representa uma célula de rato observada ao microscópio de fluorescência. As moléculas de DNA que constituem o genoma estão coradas de vermelho.

A resolução do microscópio não permite individualizar os "cabos" (cromossomas) que se espalham, num emaranhado, por todo o núcleo da célula. O ponto verde no interior do núcleo corresponde ao gene que codifica a hemoglobina, a proteína dos glóbulos vermelhos que transporta o oxigénio. O rebordo verde observado em torno do núcleo (a vermelho) corresponde ao citoplasma da célula. Imagem gentilmente cedida por Noélia Custódio.

## CARACTERÍSTICAS DO GENOMA

Uma característica do genoma é a sua variabilidade. Na nossa linguagem existe apenas uma forma de escrever correctamente cada palavra. No genoma, o gene responsável pela cor dos olhos pode ser escrito com seqüências de letras ligeiramente diferentes. Como resultado aparecem olhos com diferentes cores. Acidentalmente, a variabilidade dá origem a erros ortográficos (mutações) e genes incorrectamente escritos provocam doença. Assim, mutações no gene da hemoglobina provocam anemia e mutações no gene BRCA aumentam a probabilidade de vir a ter cancro da mama.

Outra característica do genoma é a sua capacidade de resposta ao meio ambiente. Muitos dos nossos genes precisam de receber estímulos para se tornarem activos (ou seja, para serem descodificados em proteína). Estes estímulos são geralmente sinais químicos vindos do exterior da célula. Cada gene possui um "interruptor" associado ao promotor que pode ser ligado ou desligado em resposta aos sinais vindos do exterior. A principal diferença entre uma célula do cérebro e uma célula do coração consiste precisamente no padrão de genes que estão activos e inactivos num e noutro tipo celular. De um modo figura-

do, para que o elemento TATA do promotor seja lido, é necessário que a parede do cromossoma seja transparente. Se a parede ficar opaca, o elemento TATA não pode ser lido, e o respectivo gene não pode produzir proteína. Assim, ao compararmos os genomas de uma célula do cérebro e de uma célula do coração encontramos um domínio distinto de peças transparentes e opacas.

## DIFERENCIAÇÃO CELULAR

Retomemos, então, o paradoxo inicial. De que modo o genoma, cuja seqüência é igual em todas as células, determina que certas células dão origem ao cérebro enquanto outras formam o coração? No início existe um óvulo fertilizado por um espermatozóide. O óvulo transporta metade do genoma da mãe enquanto o espermatozóide é portador de metade do genoma do pai. Em resultado de divisões sucessivas, as células embrionárias começam a competir entre si pelo acesso aos sinais do meio circundante. Deste modo algumas células continuam a receber um determinado estímulo enquanto outras o perdem. As células que perdem o estímulo passam a alterar o seu padrão de genes activos e inactivos. Em consequência, algumas destas células adquirem a capacidade de emitir sinais que, por sua vez, vão influenciar o padrão de actividade genética das células vizinhas. Assim, sucessivamente, originam-se grupos de células com padrões próprios de actividade dos seus genes. Então, teoricamente, poderemos ser capazes de manipular artificialmente a actividade de genes e "programar" as características das células resultantes mediante "cocktails" químicos. Tal é já uma realidade em sistemas simples de células retiradas do organismo humano e mantidas em cultura no laboratório.

Em conclusão, dispomos hoje da totalidade da seqüência do genoma humano. No entanto, ainda só conhecemos cerca de metade dos nossos genes. E, para a maioria destes, falta ainda decifrar a sua função na saúde e na doença. Para além disso estamos ainda longe de dominar os mecanismos que determinam padrões de actividade dos genes em resposta a sinais vindos do meio ambiente. Apesar de os avanços já serem notáveis, a ciência que estuda os genomas (isto é, a genómica) está ainda na sua infância.

## Concurso para os mais novos

"O muito grande e o muito pequeno" é o tema genérico de um concurso sobre a realidade das escalas e das dimensões, organizado pelo Serviço de Ciência da Fundação Calouste Gulbenkian para as crianças dos 9 aos 14 anos.

O regulamento do concurso foi enviado a todas as escolas do 2º ciclo da rede pública portuguesa e ainda a muitos colégios privados, segundo revelou à "Gazeta" Francisca Moura, directora-adjunta daquele serviço.

Uma selecção dos melhores contributos estará patente ao público, em espaço próprio, na exposição "POTÊNCIAS DE 10 — o mundo às várias escalas".

Nos termos do regulamento, os trabalhos concorrentes (que deveriam entrar no Serviço de Ciência até 30 de Janeiro deste ano) tinham de ser executados em formatos A3 ou A2. Eram admitidos desenhos, pinturas, colagens e outros trabalhos gráficos relacionados com o tema da exposição.

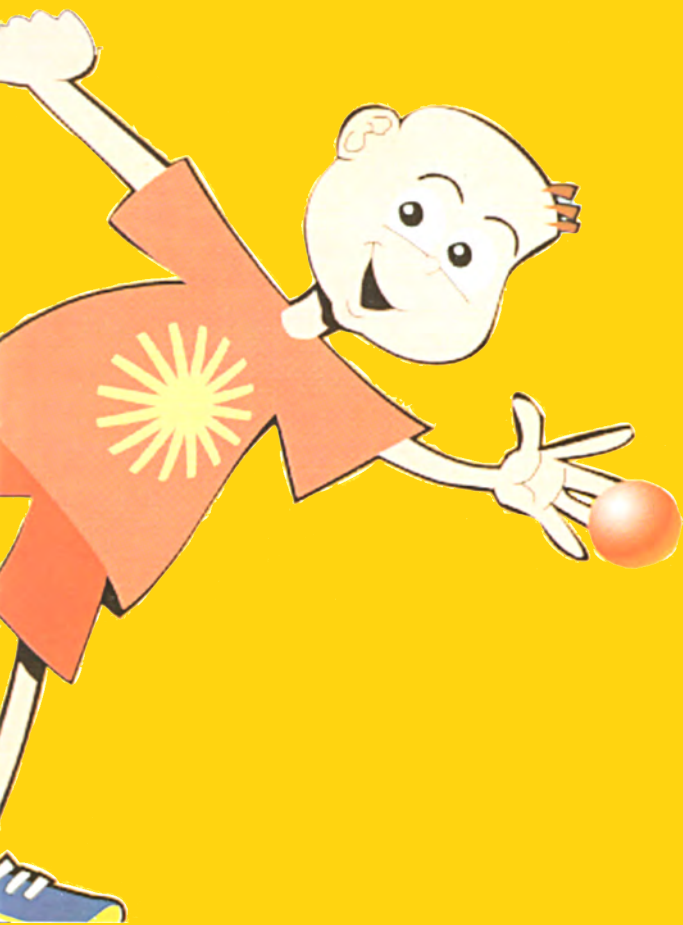
O júri, constituído por cinco elementos indicados pela Fundação Gulbenkian, tinha como função escolher os melhores trabalhos em função dos seguintes critérios:

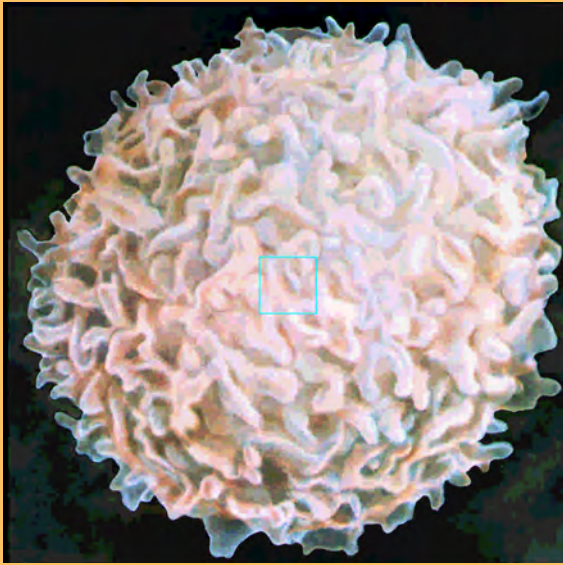
- Para a faixa etária dos 9-11 anos, a adequação da qualidade plástica e gráfica aos objectivos propostos;
- Para a faixa dos 12-14 anos, a adequação da qualidade plástica e gráfica, e ainda quaisquer outros aspectos relevantes para a contextualização do tema.

O júri tinha de designar, em cada faixa etária, um primeiro e um segundo classificados. Tanto para os concorrentes como para as respectivas escolas, os prémios foram oferecidos pela Porto Editora.

O júri avaliou 321 trabalhos de 38 estabelecimentos de ensino de vários pontos do país. Cerca de um terço foram seleccionados para serem expostos tendo sido escolhidos os seguintes premiados. No escalão 12-14 anos o primeiro prémio foi atribuído a Tirra Mirjam Vogel de 14 anos, da Escola Básica Ferreira de Castro em Mem Martins, e o 2º prémio a Filipa de Azevedo e Silva Marques Neto de 13 anos, da St. Julian's School em Carcavelos. O júri distinguiu nesta categoria dois outros trabalhos com menções honrosas, respectivamente de Jorge António Machado Querido Mendes Alves e Yana Andreia Naidenov, ambos de 13 anos, também da St. Julian's School em Carcavelos. No escalão 9-11 anos o primeiro prémio coube a Isabel Carmona Rodrigues de 9 anos do Colégio Valsassina em Lisboa, e o segundo prémio a Maria Teresa Reis Boavida Ribeiro de 11 anos, do Colégio Mira Rio em Miraflores. Nesta categoria foi também atribuída uma menção honrosa a Teresa da Costa Pinheiro de 9 anos, do Colégio Valsassina em Lisboa.

CARLOS PESSOA  
gazeta@teor.fis.uc.pt





$10^{-5}$  m

Será que, também para os seres vivos, algumas regras são aplicáveis a escalas diferentes?

ALEXANDRE QUINTANILHA  
Instituto de Biologia Molecular e Celular  
e Instituto de Ciências Biomédicas de Abel Salazar,  
Universidade do Porto  
alexq@gaia.ibmc.up.pt

# AS ESCALAS DA VIDA

Se excluirmos os vírus, que não se conseguem reproduzir sozinhos, e se ignorarmos a controvérsia à volta do conceito do sistema vivo "Gaia", cuja escala é planetária, a razão entre a massa dos mais pequenos micro-organismos e a da maior baleia (a baleia azul) é da ordem de 1 para 1 000 000 000 000 000 000 000 =  $10^{21}$ . Por isso, não podemos estranhar que os níveis de complexidade organizacional variem de forma dramática entre seres vivos com dimensões tão diferentes. Enquanto os organismos mais pequenos são constituídos por células simples, sem qualquer núcleo, o número de tipos diferentes de células (neste caso, nucleadas) que compõem os organismos mais complexos é da ordem das centenas.

Estes diferentes tipos de células estão organizados em tecidos, que se vão diferenciando durante o crescimento embrionário e que se organizam em estruturas muito bem definidas. E a informação que determina a disposição espacial e temporal dos diferentes tecidos está em grande parte contida no DNA desse organismo. Apesar de já conhecermos alguns dos genes responsáveis pelo controlo da formação e configuração dos vários tecidos em diferentes espécies de organismos, muito está ainda por ser desvendado. Este é certamente um dos domínios mais fascinantes da actual investigação biológica. Conhecer de forma precisa os diferentes genes e a sequência temporal da sua expressão, que determina o processo de diferenciação dos tecidos e o crescimento programado de órgãos tão diferentes como o fígado, o rim, o coração e o cérebro, ou de estruturas tão bem desenhadas

como o esqueleto, não será tarefa simples. Isto para não falar dos mecanismos celulares responsáveis pela memória ou pela resposta imune. As escalas envolvidas seriam evidentemente não só espaciais mas também temporais, o que torna a análise matemática dos processos muito mais complicada.

Será que, mesmo assim, não poderemos construir modelos simples para descrever e prever as características estruturais de muitos dos seres vivos que nos rodeiam? Será que, também para os seres vivos, algumas regras são aplicáveis a escalas diferentes?

Os tamanhos e as escalas são temas muito antigos, mesmo em biologia. Já Arquimedes comentava que, em objectos sólidos com geometrias semelhantes, a superfície aumenta com o quadrado das dimensões lineares, enquanto o volume aumenta com o cubo dessas dimensões. Assim, se as dimensões lineares de um objecto forem da ordem de  $L$ , a sua superfície será:

$$S \propto L^2$$

e o seu volume:

$$V \propto L^3$$

em que o símbolo  $\propto$  significa "proporcional a". Galileu debruçou-se sobre este assunto, mas foi D'Arcy Thompson, com a publicação em 1917 do seu "On Growth and Form", que deu um gran-

de impulso ao tema das proporções e das escalas biológicas. Podemos generalizar as expressões anteriores utilizando a equação  $y = bx^a$ , onde  $x$  e  $y$  são variáveis e  $a$  e  $b$  constantes.

Nos casos mais simples, quando consideramos animais da mesma espécie, para os quais a semelhança geométrica é evidente, partindo do facto de que a massa do animal é directamente proporcional ao seu volume, verifica-se experimentalmente que, na expressão anterior, se  $y$  for a massa do animal e:

- $x$  o seu comprimento, então  $a = 3$ ;
- $x$  a sua superfície, então  $a = 3/2$ .

O valor da constante  $b$  é diferente nos dois casos. Estes resultados não são surpreendentes. São precisamente os que Arquimedes e Galileu teriam previsto. Mais surpreendente será, no entanto, a verificação experimental de que, se  $y$  for a massa do animal e  $x$  o seu consumo de oxigénio por unidade de tempo, então  $a = 2/3$ .

Surpreendente, porque sabemos que o consumo de oxigénio de cada célula está directamente relacionado com a produção da energia necessária (e, portanto, também com o calor produzido). O calor produzido deveria ser proporcional ao número total de células do organismo e, portanto, à sua massa total. Assim, deveríamos encontrar para este exemplo  $a = 1$ .

No entanto, não nos podemos esquecer que os animais perdem calor principalmente através da sua pele (que cobre a sua superfície) e que, no caso dos mamíferos, por exemplo, a temperatura se mantém mais ou menos constante.

Se o consumo de oxigénio (e, portanto, a produção de calor) fosse proporcional ao volume total do organismo, mas a perda de calor fosse proporcional à sua superfície, tal significaria que a produção de calor seria proporcional ao cubo da dimensão linear do organismo, ao passo que a sua perda de calor seria proporcional ao quadrado dessa dimensão linear. Com o aumento da dimensão linear de um organismo, a sua produção de calor aumentaria mais rapidamente do que a sua perda de calor. Assim, a sua temperatura aumentaria gradualmente, ou oscilaria, porque seria necessário desligar de forma intermitente o seu metabolismo de modo a permitir que a temperatura nunca subisse ou descresse para além de certos valores. Sabemos que isto não acontece, o que implica certamente um controlo fisiológico muito rigoroso de modo a tornar a produção de calor em animais da mesma espécie proporcional à sua área total e não ao seu volume total.

Mais surpreendente ainda é o resultado que se obtém quando, no mesmo gráfico, se incluem os dados respeitantes a espécies diferentes de animais com geometrias distintas. Neste caso, os dados experimentais mais rigorosos mostram que, se  $y$  continuar a representar a massa do animal, mas se  $x$  representar a produção de calor por unidade de tempo, o expoente que melhor descreve os dados será  $a = 3/4$ . Uma observação muito cuidadosa dos dados mostra que a curva que melhor descreve os resultados para cada uma das espécies continua a ser a que é caracterizada pelo expoente  $a = 2/3$ , mas que a curva que descreve os pontos referentes a todas as espécies de mamíferos (com geometrias diferentes), se caracteriza, essa sim, pelo expoente  $a = 3/4$ .

## EXPLICAÇÃO

Como explicar este resultado? Uma pista interessante para a resolução deste mistério vem da seguinte observação. Quando se tenta determinar a relação entre o diâmetro do tronco  $D$  e a altura  $H$  de árvores (ou o comprimento dos seus ramos) verifica-se que o diâmetro aumenta mais rapidamente do que a altura. Por outras palavras, não há isometria. À medida que o volume (e a massa) das árvores cresce, as suas dimensões lineares não aumentam isometricamente. Graficamente observa-se que:

$$D^2 \propto H^3$$

Como a massa total da árvore  $M$  deve ser proporcional ao seu volume, sendo este proporcional a  $D^2H$ , uma das formas de conseguir esta proporcionalidade seria:

$$D \propto M^{3/8}$$

$$H \propto M^{1/4}$$

O mesmo se verifica quando comparamos a área transversal dos ossos que suportam o peso dos animais. Os ossos das patas de um elefante são proporcionalmente muito mais grossos do que os ossos correspondentes num cavalo ou num cão. Estes resultados não nos deveriam causar admiração. Se as dimensões lineares aumentassem isometricamente, o sistema tornar-se-ia instável. Efectivamente, e voltando a representar as dimensões lineares do organismo por  $L$ , se o peso fosse proporcional a  $L^3$  e a área da base de suporte fosse proporcional a  $L^2$ , a pressão na base seria proporcional ao peso por unidade de área, ou seja a  $L^3/L^2 = L$ , quer dizer, proporcional a

$M^{1/3}$ . Mas sabemos que, para todos os materiais conhecidos, há limites para as pressões suportáveis. Dadas as propriedades físicas da madeira ou dos ossos, este resultado colocaria limites físicos à dimensão dos seres vivos que são suportados por troncos (plantas) ou patas (animais). No caso do tronco das árvores ou dos ossos de suporte, a pressão na base seria proporcional a  $M^{1/4}$ , o que, dadas as limitações dos materiais envolvidos, permitiria a existência de organismos com massas maiores. A razão de as baleias azuis conseguirem ter massas da ordem das 100 toneladas está certamente relacionada com o facto de elas viverem dentro de água. Em terra os seus ossos seriam esmagados pelo peso que teriam de suportar. Este mesmo raciocínio leva-nos a imaginar que os maiores dinossaúros, que atingiam massas da ordem das 40-50 toneladas, teriam de viver parcialmente submersos em água.

Muitos exemplos já foram encontrados para este tipo de proporcionalidade. Nos primatas, por exemplo, o diâmetro do peito é também proporcional a  $M^{3/8}$ . O mesmo se passa com o diâmetro dos músculos dos membros de vários animais.

Tudo indica que, para o caso de organismos de grandes dimensões, a força da gravidade é a principal causa desta diferença crucial entre a proporcionalidade massa - dimensões transversais e a proporcionalidade massa - dimensões longitudinais. Uma observação curiosa que parece apoiar esta interpretação diz respeito a uma das fases de vida do micro-organismo *Dictyostelium discoideum*. A determinada altura, este organismo produz uma série de pequenos filamentos de dimensões inferiores a 1 mm que suportam pequeninas esferas contendo os seus esporos. Neste caso, o diâmetro transversal dos filamentos é rigorosamente proporcional ao seu comprimento (aqui tanto  $D$  como  $H$  são proporcionais a  $M^{1/3}$ ).

Com estes dados torna-se muito mais fácil interpretar o resultado experimental que foi mencionado no início, nomeadamente o facto de, para espécies de animais com geometrias distintas, a produção de calor por unidade de tempo ser proporcional a  $M^{3/4}$ . Vejamos: é razoável considerar que a produção de calor tem a ver principalmente com o funcionamento dos músculos e que a força que esses músculos exercem é proporcional à sua área transversal. A observação experimental de que o diâmetro da grande maioria desses músculos é proporcional a  $M^{3/8}$  conduz imediatamente à conclusão de que o calor produzido, sendo proporcional à secção dos músculos, terá de ser proporcional ao quadrado de  $M^{3/8}$ , ou seja a  $M^{3/4}$ .



Se, por outro lado, considerarmos que o calor produzido por um animal deve ser proporcional à sua taxa metabólica, então também a taxa metabólica deve ser proporcional a  $M^{3/4}$ . Para um sistema ecológico, onde existem várias espécies, seria lógico que a densidade de população destas espécies fosse inversamente proporcional ao seu consumo diário de alimentos (consumo esse que, por sua vez, será certamente proporcional à sua taxa metabólica). Vários estudos têm confirmado que a densidade de população das diferentes espécies presentes num determinado ecossistema é proporcional a  $M^{-3/4}$ .

Outro resultado interessante tem a ver com a frequência das vibrações observadas para os troncos das árvores ou mesmo para as árvores inteiras. Do ponto de vista puramente físico, e tomando em consideração as propriedades elásticas dos materiais, se considerarmos uma barra presa numa das suas extremidades, para a qual

diâmetro local (distância ao ponto fixo)<sup>b</sup>,

a frequência das respectivas vibrações será

frequência natural (distância ao ponto fixo)<sup>b-2</sup>

Para uma régua de comprimento  $L$ , fixa numa das extremidades, e para a qual  $b=0$ , é fácil demonstrar que a sua frequência natural é proporcional a  $L^{-2}$ . No caso de muitos instrumentos musicais, assim como de muitas pontes, em que  $b=1$ , os resultados experimentais mostram que a frequência natural é proporcional a  $L^{-1}$ . No caso das árvores, em que  $b=3/2$  (este valor obtém-se directamente das relações entre  $D$ ,  $H$  e  $M$  apresentadas acima), a frequência deverá ser proporcional a  $L^{-1/2}$ , que é precisamente o resultado verificado experimentalmente.

## MARCHA E CORRIDA

Finalmente, vejamos um outro exemplo curioso. Ao aumentar a sua velocidade de deslocamento, a certa altura o homem deixa de andar e começa a correr. Nesse preciso momento, deixa de ter os dois pés apoiados no solo para passar a ter, em certos momentos, ambos os pés no ar. Esse momento pode ser previsto rigorosamente. Enquanto o homem anda, podemos imaginar que a perna representa o raio de uma circunferência ao longo da qual o centro de gravidade do corpo se desloca, e que ela está presa pelo pé ao centro dessa circunferência. À medida que a velocidade linear do corpo aumenta, também

aumenta a força centrípeta associada a esse movimento circular. Designando por  $V$  a velocidade linear, por  $R$  o comprimento da perna (isto é, o raio da circunferência), a aceleração centrípeta é dada por  $V^2/R$ . Quando esta aceleração (cujo efeito é afastar o corpo do solo) atingir a aceleração da gravidade  $g$  (que mantém o corpo assente no solo), o homem pode deixar de ter os pés assentes no solo. Isto significa que, quando  $V^2/R > g$ , começa a correr. Então, quando

$$V^2/Rg > 1,$$

um animal, seja qual for a sua massa, deve passar da marcha para a corrida. Este resultado já foi confirmado para vários animais.

Os exemplos apresentados mostram que, ao lidarmos com escalas em biologia, são possíveis elegantes generalizações que se baseiam em conceitos simples e que podem ser testadas experimentalmente.



## REFERÊNCIAS

- D'Arcy Thompson, "On Growth and Form", Cambridge University Press, 1917.
- Thomas McMahon e John Bonner, "On Size and Life", Scientific American Library, WH Freeman & Co, 1983.
- Gerald Edelman, "Tobobiology", Basic Books Inc., 1988.



$10^{-2}$  m

A incerteza domina o mundo e a probabilidade é uma categoria inescapável.

DINIS DUARTE PESTANA

Departamento de Estatística e Investigação Operacional,  
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
e Centro de Estatística e Aplicações da Universidade de Lisboa  
dinis.pestana@fc.ul.pt

# À PROCURA DA ESC

*Além disso, os mesmos argumentos que originam a noção de Sorte podem, por outro lado, proporcionar noutros casos o cotejo adequado entre as noções de Acaso e Designio: Podemos imaginar Acaso e Designio como possíveis causas que entre si competem para a realização de alguns tipos de acontecimentos, e calcular a Probabilidade de que estes ocorram devido a um ou a outro.*

A. de Moivre (1718). Prefácio de *The Doctrine of Chances*.

Lembro-me de, em jovem, um amigo de família ter comprado uma aparelhagem de alta fidelidade, um luxo que queria exibir a toda a gente. E lembro-me do ar aborrecido com que de vez em quando se franzia todo e exclamava: "*Mais um ruído!*" Fiquei com pena dele, por ter passado a ouvir os ruídos em vez de música.

O aforismo popular "ver as árvores e não ver a floresta" expressa esta perversão de dar mais atenção ao pormenor do que aos "pormaiiores", que são os padrões que mais importa perceber. Felizmente esta perversão está limitada pelos nossos sentidos, que não percebem abaixo de um determinado limiar. Um dos sucessos da evolução foi barrar os canais da percepção abaixo e acima de determinados limites. Os nossos órgãos dos sentidos estão afinados para a escala apropriada: Se os nossos antepassados vissem nuvens de átomos em vez de um urso ou um tigre, porventura não teriam sido antepassados de ninguém...

# ALA CERTA

Mas, como é do destino do homem estar insatisfeito, procurámos ampliar as nossas capacidades com tecnologias que nos permitam construir imagens de realidades que estão para além da resolução que os nossos olhos conseguem. Em certo sentido, o próprio paradigma da ciência tem mudado a nossa capacidade de ver (e medir) as outras escalas, quer seja ver, com telescópios e radiotelescópios, o que antes estava infinitamente longe, quer seja, com microscópios electrónicos ou de *scanning*, ver o que antes era infinitesimal, quer seja ainda ver a formação de imagens associadas a ondas de som ou a ondas electromagnéticas. No fundo, trata-se de formas sofisticadas de usar a ciência e a tecnologia para domesticar a escala, transformá-la para fazer surgir objectos antes invisíveis. Com a mudança para uma escala apropriada estamos constantemente a ampliar ou a diminuir a realidade.

## SOB O SIGNO DA INCERTEZA

A evolução dotou-nos também da capacidade de abstrair os padrões que nos permitem avaliar o que é mais provável e usar esse conhecimento ao tomar decisões num regime de incerteza. Vivemos sob o signo da incerteza ("*Tempo de solidão e de incerteza*", num belo poema de Sophia de Mello Breyner), mas aprendemos a conviver com ela. Tão bem que os primeiros construtores da ciência moderna tiveram a genialidade de "aparar" a variabilidade que é incontornável nos dados concretos que recolhemos.

Galileu – um gigante do pensamento científico – foi capaz de vislumbrar a verdade revelada pelos dados a que tinha acesso, mas que estava *mascarada*. Com os instrumentos de que dispunha para medir o espaço e o tempo – e tinha que o fazer simultaneamente –, as relações parabólicas que deduziu eram uma fantasia genial. Muito antes de os conceitos apropriados terem sido formalmente inventados, e de a metodologia da investigação científica se ter estabelecido, ele já tinha percebido que não há ciência do concreto e que o papel do cientista é criar os modelos que transformam a informação em conhecimento.

De facto, o conhecimento deve assentar em factos e não em preconceitos. Mas nenhuma colecção de factos constitui, por si mesma, conhecimento. Os dados contêm um sinal, mas inevitavelmente o *sinal* está perturbado por *ruído*, que o distorce, esconde, confunde. Se a escala do ruído for desprezável relativamente à do sinal, construímos com relativa facilidade um modelo adequado, pelo menos operativamente. Mas, se a escala do ruído for grande, decifrar o código pode ser tarefa quase insolúvel. Como exemplo da primeira situação: a linguagem "secreta" infantil que consiste em duplicar cada sílaba, e mudar a primeira das sílabas gémeas começando-a por *p* (este último segmento de frase passaria a ser dita *pi i pumupardar pãã pripripeimeipara pasdas pisipalapasbas pégépeas-meas ...*); como exemplo da segunda, a encriptação da frase com um código baseado na factorização de números primos, de grande dificuldade de decifração. Uma área muito importante das aplicações de reconhecimento de padrões tem a ver com formas de ampliar a escala do sinal e apagar, na medida do possível, o ruído, levando a escala deste a ficar tão perto de zero quanto possível.

## A PROBABILIDADE DOMESTICA A INCERTEZA

Galileu escreveu: "*Deus fez o Mundo em linguagem matemática, compete ao sábio decifrá-la*". A leitura dos números, quando se tornou evidente que a variabilidade é uma característica intrínseca dos dados, tornou-se o objecto da Estatística. Em certo sentido, a Estatística é uma arte marcial do intelecto: tal como o objectivo do judo não é destruir a força do adversário, mas antes procurar usá-la em proveito próprio, a glória da Estatística é ter evidenciado que sem variabilidade não há conhecimento e que o objectivo não é destruir a variabilidade: é delimitá-la, eventualmente

constrangê-la, moderá-la – e usá-la como fonte de conhecimento.

Para chegar a este ponto, foram necessárias várias revoluções intelectuais. Não foi imediatamente evidente, mas, se olharmos para trás, ganhamos a convicção de que um dos maiores passos intelectuais dos últimos três séculos foi a descoberta da contingência, o reconhecimento de que a incerteza domina o mundo e que a probabilidade é uma categoria inescapável. Assim como a Estatística não procura anular a variabilidade, mas apenas pretende delimitá-la e usá-la como factor de conhecimento, o objectivo da Probabilidade é domesticar a incerteza, levá-la a uma escala que nos permita tomar decisões com riscos comportáveis.

Como os matemáticos Gnedenko e Kolmogoroff afirmaram no seu lúcido prefácio ao livro que escreveram sobre somas de variáveis aleatórias<sup>1</sup>, por baixo do caos superficial que é a aparência dos fenómenos, há padrões perduráveis, que correspondem ao que é permanente e necessário. Sob esta perspectiva, os teoremas de caracterizações e resultados assintóticos são o garante do valor gnoseológico da Teoria da Probabilidade.

Todos nós usamos médias. Porém, raramente nos questionamos sobre as razões por que elas são tão reveladoras. Dois resultados importantes da Teoria da Probabilidade justificam amplamente o seu uso, e alertam para os limites a partir dos quais ele se transforma em abuso.

A Lei dos Grandes Números afirma que a média de uma amostra converge para o valor médio populacional (no caso deste existir). Se pensarmos, em particular, na repetição de uma mesma experiência inúmeras vezes, e, se apenas registarmos se ocorre ou não o acontecimento  $A$ , podemos considerar o que se designa por variável indicatriz de  $A$ ,

$$I_A = \begin{cases} A & \bar{A} \\ P(A) & 1 - P(A) \end{cases}$$

(como é usual,  $\bar{A}$  designa o complementar do acontecimento  $A$ ; na representação acima, na primeira linha escrevem-se os resultados possíveis da experiência, na segunda linha as correspondentes probabilidades) cujo valor médio é  $E(I_A) = P(A)$ . Assim, a noção de que a probabilidade pode ser conceptualizada como o limite da frequência relativa com que o acontecimento se realiza é uma consequência da Lei dos Grandes Números.

O Teorema do Limite Central, por outro lado, estabelece que, em condições muito gerais, se a variância popula-

cional for  $\sigma^2$  (e, conseqüentemente, a variância da média de uma amostra de dimensão  $n$  for  $\frac{\sigma^2}{n}$ ), a distribuição assintótica da média da amostra  $\bar{x}$  é aproximadamente normal, com o mesmo valor médio  $\mu$  que a população, mas com o erro padrão  $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . Este resultado mostra a enorme vantagem de usar médias: a escala do erro está a ser reduzido. Infelizmente, o ritmo a que o erro se reduz é baixa, vai com  $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ; para reduzir o erro a um décimo são necessárias 100 observações – e para reduzir, na mesma proporção relativa, o erro a um décimo de um décimo, são necessárias 10 000 observações!

## O TEOREMA DO LIMITE CENTRAL É UM MICROSCÓPIO MENTAL

É pena que nem toda a gente conheça este resultado na sua plenitude, porque ele estabelece, de facto, um novo paradigma para obter resultados de grande precisão. É quase um microscópio electrónico mental: se for barato medir, mais vale medir grosseiramente e muitas vezes, porque ao fazer a média estamos a compensar erros por excesso com erros por defeito, e a obter resultados muito mais rigorosos com muito menos esforço. Há uma trintena de anos, para medir ângulos para preparar plantas e mapas usava-se um aparelho de precisão, caríssimo como todos os aparelhos de precisão, e de difícil manutenção, porque a peça fundamental era um disco que pesava alguns quilos e que tinha de estar muito polido e limpo por causa do atrito e que, por isso, tinha que ir constantemente para afinação. Taborada e Oliveira (1973)<sup>3</sup> aproveitaram a lição do Teorema do Limite Central: usaram um disco muito leve com uma descontinuidade magnética que permitia a aquisição de dados em tempo real pelo computador; a leveza do disco levava a que vibrasse e os erros se compensassem. Como adquiriam 600 dados por minuto (os computadores da altura não tinham a velocidade dos actuais), ao fim de dois ou três minutos tinham obtido uma média que indicava o ângulo desejado com uma precisão muito maior do que o aparelho clássico. Tornou-se, naturalmente, o *standard* de medição de ângulos em geodesia.

O Teorema do Limite Central Clássico diz respeito a populações bastante concentradas (por isso, com variância finita), em que a probabilidade de observações muito distantes da média decresce rapidamente para zero. A desigualdade de Chebycheff mostra que  $P(|X - \mu| \geq k) \leq \frac{1}{k^2}$ ,  $k > 0$ , no caso de haver variância. E o que acontece no caso de não haver variância, isto é, de a soma das caudas

da distribuição,  $P(|X| > x)$ , ser elevada? Por exemplo, no caso de variáveis aleatórias de Cauchy, sabemos que a média tem exactamente a mesma distribuição que qualquer uma das parcelas — é a origem da famosa frase "quem viu uma Cauchy viu todas". O esforço de amostragem não compensa.

Percebeu-se, enfim, que era tudo uma questão de escala:

$$\text{se } \frac{P(|X| > tx)}{P(|X| > x)} = t^{-\alpha}, \quad \alpha \in (0, 2), \quad t > 0$$

(em vocabulário técnico, se a cauda da distribuição for uma função de variação regular de ordem  $\alpha$ ), então a escala apropriada para a sucessão de somas convergir é  $n^{\frac{1}{\alpha}}$ . O Teorema do Limite Central Clássico corresponde à situação em que a escala apropriada é  $n^{\frac{1}{2}}$ .

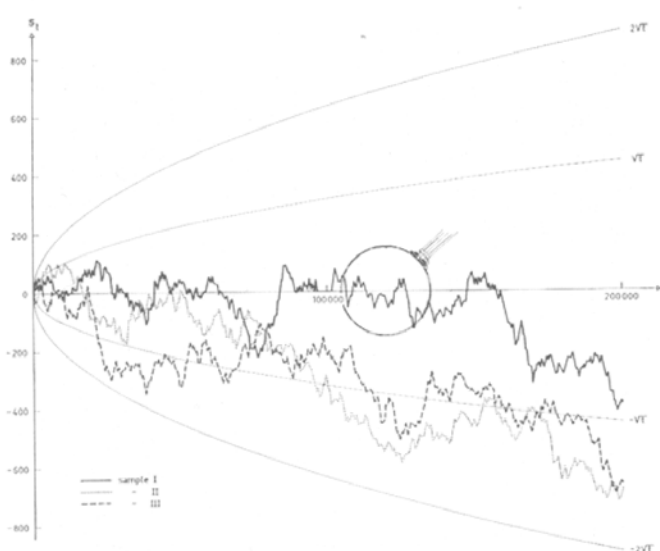
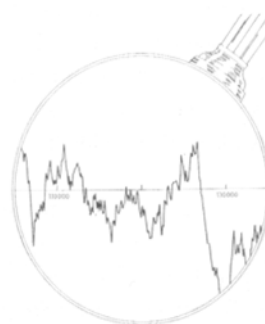


Fig. 1. Simulação do movimento browniano.

Felizmente, depois de construir a teoria para somas, concluiu-se que para máximos e para mínimos a situação era muito semelhante: o peso das caudas ditava quais eram os modelos assintóticos estáveis que se adaptam à realidade. Curiosamente, no caso de máximos, há uma situação em que a escala é irrelevante, apenas há que fazer translações para a origem (só a localização importa): nas populações de Gumbel, em que  $P(X > x) = e^{-e^{-x}}$ , prova-se que o máximo de  $n$  observações cresce tão moderadamente quanto  $\ln(n)$ , e que se, subtrairmos esta sucessão de valores à sucessão de máximos parciais (o que quer dizer que nos mantemos localizados na proximidade da origem), a distribuição mantém-se de Gumbel.

## FRACTAIS, FIGURAS CUJAS PARTES REPRODUZEM O TODO

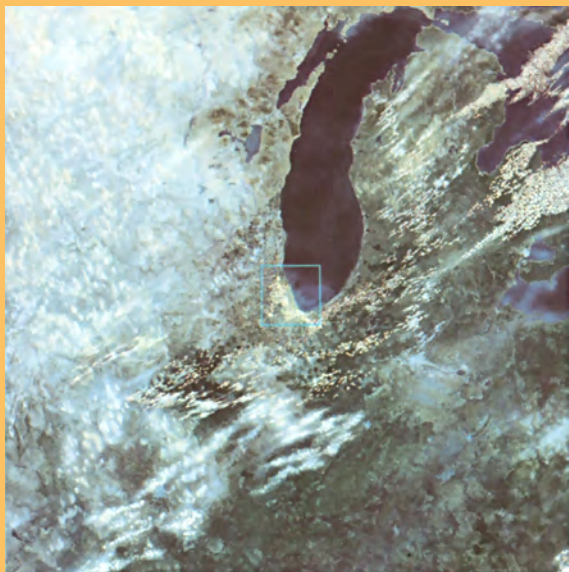
Recentemente a Matemática tem-se ocupado muito de objectos fractais, objectos que são iguais ou semelhantes a si mesmos a todas as escalas. O título de um trabalho pioneiro de Lévy<sup>4</sup> refere essa estranheza: "as curvas e suas superfícies de que as partes são semelhantes ao todo". O movimento browniano, que deve o seu nome ao botânico escocês Robert Brown, que julgou que os grãos de pólen que caíam na água tinham movimento próprio (o movimento é afinal devido aos choques das moléculas de água), tem essa característica. A fig. 1 mostra simulações do movimento browniano e uma ampliação que procura evidenciar essa convivência extraordinária de todas as escalas.



Para terminar com uma nota tão pessoal como a do início: às vezes penso que as imagens que a NASA gravou na sonda espacial que enviou a figura humana pelo Universo, e em que também gravou o número  $\pi$  por acreditar na universalidade da matemática, correm o perigo de não serem sequer vistas apenas por uma questão de escala. Mas, se a curva do movimento browniano tivesse sido incluída entre as imagens, essa sim, seria decerto vista, porque estaria sempre à escala certa...

## REFERÊNCIAS

- [1] Gnedenko, B. V. and Kolmogoroff, A.N. (1954). Limit Distributions for Sums of Independent Random Variables. Addison-Wesley Reading, Mass.
- [2] Taborda, J.R. and Ferraz de Oliveira, J. (1973). About a new device for measuring angles with high precision. Rev. Ciências Matemáticas, IV, Ser. A, 17-28.
- [3] Lévy, P. (1937). Les courbes planes ou gauches et les surfaces composées de parties semblables au tout, Jour. Ec. Pol. (3) 7, 227-247; 8, 249-291.



10<sup>6</sup>m

Na época dos Descobrimentos era possível determinar a latitude. O mesmo não acontecia com a longitude.

# AS ESCALAS DA TER LONGITUDE E NAVE

Comemoram-se neste ano os 150 anos da introdução em Portugal do Sistema Métrico Decimal. De facto, no dia 13 de Dezembro de 1852, começámos a medir comprimentos, volumes e pesos, usando uma base que nunca tínhamos experimentado antes. O autor publicou um texto<sup>1</sup> sobre essa efeméride, para que não se perca a memória da longa luta que se travou para que esse sistema, que revolucionou o Mundo, entrasse em Portugal.

Mas vamos ao assunto do título. Veja o leitor que não será fácil: a base 10, que a exposição "Potências de Dez", entroniza, e que, com alguns e teimosos atrasos, é hoje unidade universal, não mede a esfera terrestre, essa musa à qual o Sistema Métrico Decimal foi buscar a inspiração. O génio dos sábios de Napoleão não conseguiu fazer perdurar o *grado*<sup>2</sup>. Nem mesmo o famoso Jean-Charles de Borda (1733-1799) apesar de, pacientemente, ter calculado as *Tables Trigonométriques Décimales, ou Table des Logarithmes des Sinus, Sécantes et Tangentes, suivant la division du Quart de Cercle en 100 degrés, du degré en 100 minutes, et de la minute en 100 secondes...*, obra que seria publicada por Delambre nos primeiros anos do século XIX. A circunferência teimou em ficar dividida em 360 partes, como há milhares de anos já se fazia na Mesopotâmia. E a *milha*<sup>3</sup>, que no mar corresponde a um minuto de arco de meridiano bateu, definitiva e inexoravelmente, o *metro*.

# RA: LATITUDE, GAÇÃO

## A LATITUDE

A medição do globo em que vivemos começa, verdadeiramente, quando Cláudio Ptolemeu, no segundo século depois de Cristo, apresenta na sua *Geografia* (Fig. 1) a imagem das terras conhecidas, baseada em estudos de Marino de Tiro. D. João de Castro diz-nos que aquele sábio alexandrino "enumerou o terceiro modo de geografia, que foi uma maravilha, excelente e divina invenção, com o qual vieram muitos e muito grandes proveitos ao mundo, porque, achada maneira de pôr cada uma das terras e mares deste mundo em seu certíssimo lugar ficaram mui fáceis todas as navegações... E esta é a perfeita e verdadeira geografia, a qual principalmente consiste em demarcar as terras pela correspondência que tem cada uma ao céu, com a devida largura e longura [latitude e longitude]."



Fig. 1. *Geografia* de Ptolemeu, edição de Veneza, 1514. Trata-se porém de uma "tábua nova" que inclui informação resultante das viagens dos Portugueses.

Quando os Portugueses iniciaram a sua epopeia marítima, logo a seguir à conquista de Ceuta, que aconteceu em 1415, o conhecimento do Mundo não tinha sofrido grande evolução. A navegação fazia-se até então pelo método do *rumo* e *estima*, isto é, usando os rumos da agulha de marear e estimando as distâncias, e recorrendo, naturalmente, ao suporte costeiro.

Todavia, no trajecto ao longo da costa africana, os pilotos portugueses constataram que as viagens para o Sul se faziam com ventos de feição, enquanto o regresso se tornava difícil, por vezes impossível, devido a ventos contrários. Para tornear esta situação, passou a fazer-se a *volta pelo largo*, que passava pelos Açores, o que tornava as viagens de regresso bem mais longas em caminho percorrido mas mais curtas em tempo e mais cómodas para as tripulações. Esta volta, que também se apelidava *volta da Mina* ou da *Guiné*, impedia que se determinasse a posição do navio pelo reconhecimento da costa, como até então se fazia.

Para superar esta dificuldade, recorreu-se aos astros, primeiro à estrela Polar, para determinar a posição do navio. A sua altura<sup>4</sup> media-se em graus, usando o *quadrante*, por exemplo à saída de Lisboa, e registava-se o seu valor no próprio instrumento. Depois, ao navegar-se um ou mais dias, ou no porto seguinte, media-se novamente a altura da Polar. A diferença entre estas alturas convertida em léguas que, na época era a unidade de distância usada no mar, dava o caminho percorrido Norte-Sul. A unidade de conversão, a primeira a ser usada pelos pilotos portugueses, foi de 16  $\frac{2}{3}$  léguas por grau. Mais tarde, antes do fim do século, já se utilizava a relação de 17  $\frac{1}{2}$  léguas por grau.

Este método exigia que o piloto fizesse pontaria à estrela Polar com esta sempre na mesma posição no céu, dado que esta gira em torno do pólo geográfico, descrevendo uma circunferência que, na época, tinha aproximadamente o raio de 3,5°. O inconveniente deste procedimento era obrigar o piloto a fazer a observação, em cada dia, num determinado momento, o que nem sempre era possível devido ao céu estar encoberto. Para evitar esta situação, recorreu-se à chamada *roda da Polar*, de que se apresenta a publicada por Valentim Fernandes, em 1518, no *Reportorio dos Tempos* (Fig. 2). A figura, representando um homem com os braços abertos, indicava a altura da Polar em Lisboa, em função da posição das guardas dianteiras da Ursa Menor.

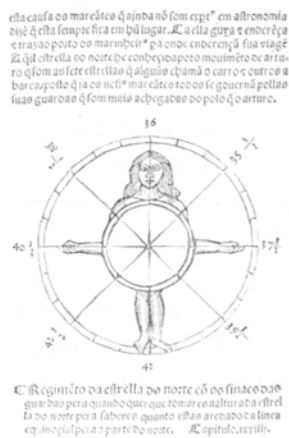


Fig. 2. A Roda da Polar

Num navio que deixou Lisboa há vários dias, mediu-se a altura da Polar por  $30^{\circ} \frac{1}{2}$ , quando as guardas da Ursa Menor estavam no ombro esquerdo da figura. Isto quer dizer que a Polar, observada em Lisboa, teria a altura de  $35^{\circ} \frac{1}{2}$ . Assim, o navio tinha percorrido a distância Norte-Sul correspondente a  $5 \times 16 \frac{2}{3} = 83 \frac{1}{3}$  léguas. É evidente que também se poderia determinar a latitude do lugar.

O *Regimento do Norte*, que acabamos de descrever, foi não só um importante avanço na Arte de Navegar como um meio extremamente engenhoso que podia ser usado por pilotos pouco cultos. Todavia, como a altura da Polar ia baixando com a latitude em que o navio se encontrava, o método deixava de ser praticável nas proximidades do Equador, porque é deficiente a observação dos astros quando estes se encontram junto do horizonte, tendo de ser definitivamente abandonado no hemisfério meridional, onde aquela estrela não é visível. A alternativa foi passar a usar a altura meridiana do Sol.

As regras para o cálculo da latitude ao meio dia para o hemisfério Norte faziam parte dos *Libros del Saber de Astronomia*, essa magnífica compilação da ciência coeva, que se deve a Afonso X de Castela (1221-1284). As fórmulas que dão a latitude a partir da altura meridiana e que constituem o chamado *Regimento da altura do Sol ao meio dia*<sup>5</sup>, que os Portugueses adaptaram ao hemisfério Sul, exigiam o conhecimento da declinação daquele astro para cada um dos dias do ano, valor que é dado por tábuas astronómicas. Tábuas, como aquelas que foram calculadas e incluídas por Abraão Zacuto no seu *Almanach Perpetuum*, referentes aos anos de 1473 a 1478, mais tarde traduzido do hebraico por José Vizinho e publicado em Leiria no ano de 1496.

Acabamos de ver que, na época dos Descobrimentos, era possível determinar a latitude onde o navio se encontrava. O mesmo não sucedia com a longitude que era estimada e assim foi até ao advento do cronómetro. Deste modo, durante cerca de três séculos, o ponto do navio calculava-se incorrectamente, o que introduzia erros, não só na rota do navio como na cartografia, que, sendo elaborada com elementos fornecidos pelos pilotos, ficava naturalmente deformada. Nestas condições, a navegação fazia-se com insegurança, provocando frequentes perdas de pessoas e bens.

## A LONGITUDE

A história da conquista da longitude, como tem sido chamada, é apaixonante. Apaixonante porque dá conta de uma luta desesperada entre a fértil imaginação dos homens, por vezes repleta da maior ingenuidade, e a sua limitada capacidade de realização.

Talvez a primeira tentativa para resolver este problema seja a de João de Lisboa que, no seu *Tratado da Agulha de Marear*, de 1514, admitiu que a longitude variava linearmente com a declinação magnética e que os meridianos eram coincidentes com as isógonas, que são linhas de igual declinação. D. João de Castro, alguns anos mais tarde, mostrou que tal não acontecia. Este método deveria ter sido abandonado, mas era de tal modo atraente que teve seguidores até ao princípio do século XIX.

Gerard Mercator também recorreu ao magnetismo terrestre para encontrar a longitude, mas de outra forma. Em 1553, numa carta enviada a Carlos V, apresenta um processo para determinar a longitude resolvendo um triângulo esférico, em que um dos vértices é uma fantástica posição do pólo magnético que nem sequer é pontual, pois o próprio cientista o designa por "ilha magnética".

Uma outra abordagem foi feita por Cristóvão Bruno, um jesuíta que viveu em Portugal e é autor de um *Regimento*, de cerca de 1628, onde concebe uma carta magnética dos Oceanos, com informações fornecidas pelos pilotos. Com estes elementos desenha as isógonas e, assim, o piloto não tinha mais do que interceptar o paralelo, correspondente à latitude observada, com a isógona de declinação que, no local, era dada pela agulha de marear. Um verdadeiro círculo vicioso dado que os pilotos, para determinar a declinação, tinham de saber, com precisão, as coordenadas onde o navio se encontrava tornando, assim, a carta escusada.

Teoricamente, sabia-se como calcular a longitude: bastava saber a hora no meridiano de referência – na época cada país usava o seu (hoje, como é sabido, é o de Greenwich) – e depois fazer a diferença para a hora de bordo, o que era simples recorrendo, por exemplo, à meridiana. A dificuldade estava na determinação da hora no meridiano de referência dado que não havia relógio que conservasse aquela hora como fosse um frigorífico. De facto, na época, o único relógio de bordo era a ampulheta, que se virava de meia em meia hora, acumulando erros e, portanto, não oferecendo qualquer rigor para aquele efeito. Os relógios mecânicos não resistiam ao balanço do navio.



Uma tentativa que foi feita para saber a hora do meridiano de referência deve-se a João Werner, de Nuremberga. No prefácio à edição de 1514 da *Geografia* de Ptolemeu, apresentou uma solução genial que consistia em utilizar as distâncias angulares entre uma estrela, escolhida para o efeito, e a Lua. Se tivéssemos a bordo as efemérides com as horas (por exemplo, seis vezes ao dia) respeitantes a esses ângulos, tínhamos o problema resolvido. Simplesmente, na época, não existiam instrumentos com o indispensável rigor para medir os referidos ângulos e, por isso, este método das distâncias lunares, como foi chamado, só teve sucesso com o aparecimento dos instrumentos de dupla reflexão, de que o *sextante* é o mais conhecido e, também, quando foi possível calcular as indispensáveis efemérides.

Para o mesmo efeito foi proposto utilizar os eclipses do Sol ou da Lua, mas, dada a sua raridade, estes só excepcionalmente poderiam ser úteis. Também a ocultação dos satélites de Júpiter, descobertos por Galileu, em 1610, podia ser usada, mas como este fenómeno só pode ser visto através de uma luneta, que não podia ser usada a bordo por falta de uma plataforma estável, esta proposta foi abandonada.

E assim se estava até que, em 1707, o naufrágio de uma esquadra inglesa fez cerca de 2000 vítimas. Como este terrível acidente foi, em parte, atribuído a navegação deficiente, constituiu-se, em 1714, o *Longitude Act*, pelo qual o Parlamento ofereceu um prémio de 20 000 libras esterlinas a quem conseguisse, após uma viagem transatlântica, determinar a longitude apenas com um erro de meio minuto de arco.

Este desafio fez com que John Harrison se habilitasse aquele prémio, apresentando um *cronómetro* que foi ensaiado pela Royal Navy, em 1736. Harrison aperfeiçoa a sua invenção e, 25 anos depois, termina o *cronómetro* N.º 4, que experimentado durante cinco meses de navegação, tinha acumulado apenas uma variação de 1 minuto e 54 segundos, o que o fez ganhar aquele prémio milionário.

Na década de 1730 é apresentado à Royal Society de Londres, o protótipo do *oitante*, antepassado do bem conhecido *sextante*, com o qual foi possível medir a altura dos astros com uma precisão que nada se comparava com aquela dos instrumentos da primeira geração, como eram o *quadrante*, o *astrolábio náutico* e a *balestilha*.

Agora sim, a Arte de Navegar, uma arte em que o piloto punha muito da sua imaginação, transformou-se numa Ciência Náutica, em que se navegava com rigor e, portanto, com maior segurança pelos mares do Globo. Mas não completamente. Isto, porque o cronómetro – essa máquina quase perfeita – tinha um demérito. Não era possível ter a garantia que estava a dar a hora correcta. Mesmo quando se usavam dois cronómetros. E, mesmo com três, mantinha-se a indeterminação. O problema só seria resolvido, definitivamente, quando, nos primeiros anos do século XX, a Torre Eiffel começou a enviar para o éter, por ondas hertzianas, o sinal horário, pelo qual se acertavam os cronómetros a bordo.

## NOTAS

<sup>1</sup> *Agenda para o ano 2002*, Correios de Portugal, Lisboa, 2001.

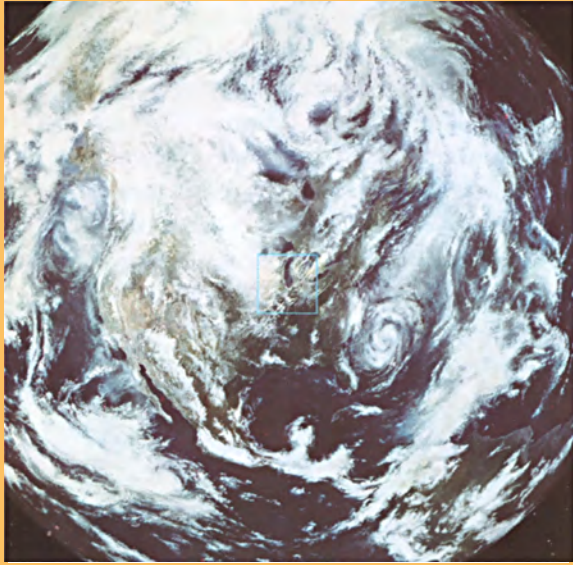
<sup>2</sup> O *grado* corresponde a 1/400 da circunferência.

<sup>3</sup> Estamos, evidentemente, a referir a *milha marítima* que vale aproximadamente 1852 metros e não deve ser confundida com a *milha terrestre*, que mede pouco mais do que 1609 metros.

<sup>4</sup> A altura de um astro é o ângulo entre o astro e o horizonte do lugar onde é feita a observação.

<sup>5</sup> A fórmula que dá a latitude a partir da altura meridiana do Sol depende do hemisfério em que se navega, da declinação ( $\delta$ ) do Sol e da direcção da sombra. Por exemplo, no hemisfério Norte, tendo o Sol declinação Norte, assim com a sombra e se a altura meridiana for  $a$ , a latitude é dada pela fórmula:

$= (90 - a) + \delta$



$10^7$  m

Grande parte da dinâmica da Terra tem lugar numa escala demasiado longa para nos apercebermos dela.

FERNANDO J.A.S. BARRIGA  
GeoFCUL e Creminer,  
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
f.barriga@fc.ul.pt

# AS ESCALAS DA EVO E A TERRA PRIMITIVA

Sabemos, sem margem para dúvidas, que a Terra teve um princípio, e que evoluiu muito desde então. Um dos aspectos decisivos foi a descoberta da idade da Terra, uma questão que apaixonou os melhores espíritos durante séculos. Até meados do século XVIII, a questão era teológica. Em 1650 o bispo irlandês James Ussher proclama, com base em minuciosas interpretações dos textos bíblicos, que a Terra foi criada num domingo, 23 de Outubro, do ano 4004 antes de Cristo. Esta afirmação, reproduzida em numerosas edições da Bíblia, influenciou o pensamento de muitos geólogos da época, impedindo-os de interpretar correctamente o que observavam no terreno. Florescem nesta época ideias inspiradas no Dilúvio Universal, segundo as quais haveria formação das rochas sedimentares num único ciclo, derivado de uma catástrofe global. Um século mais tarde, Hutton apresenta a ideia de que existiram vários ciclos, e de que os processos geradores das rochas são lentos e continuados, idênticos aos actuais. A conclusão lógica é que a Terra tem muitas centenas de milhões de anos de idade.

Esta ideia foi atacada por William Thompson, mais conhecido por Lord Kelvin. Numa série de publicações e conferências entre 1862 e 1899, o mais notável físico britânico de então analisou exaustivamente a questão da idade da Terra, com base numa análise térmica que incluía a energia solar, a história de arrefecimento de um objecto com a massa e composição da Terra, e os efeitos gravitacionais, concluindo finalmente que a idade da Terra devia situar-se entre 20 e 40 milhões de anos. Esta conclusão foi um rude golpe para as ideias dos geólogos.

# LUÇÃO DO PLANETA

Basta pensar nos grandes cortes de seqüências de rochas, de que o exemplo mais notável é o Grand Canyon do rio Colorado, nos EUA (Fig. 1) para se perceber como é impensável que a Terra seja tão jovem. Os cálculos de Lord Kelvin estavam grosseiramente errados, porque faltava a principal fonte de calor gerado no interior da Terra, a radioactividade, que só foi descoberta por Henri Becquerel em 1897.



Fig. 1. Panorâmica do Grand Canyon do rio Colorado, no Arizona (Foto do autor, 1995).

Apesar das conclusões erradas de Lord Kelvin, não se deve subestimar a importância decisiva das determinações físicas e químicas nos estudos geológicos. Assim, a radioactividade fornece simultaneamente o calor que faltava nas equações de Lord Kelvin e o processo de efectuar

datações absolutas das rochas, através da medição das abundâncias dos isótopos radioactivos e dos respectivos produtos, conhecidas as respectivas constantes de transformação. O desenvolvimento experimental nesta área tem permitido avanços enormes. Utilizam-se hoje numerosos sistemas isotópicos, do urânio-chumbo ao rénio-ósio e outros. Consoante os elementos e os períodos de semidesintegração, assim este ou aquele sistema é útil em rochas mais ou menos antigas, ou com esta ou aquela composição. Importa utilizar sistemas que se mantenham fechados ao longo da história geológica das rochas ou minerais em análise. Por exemplo, o sistema potássio-árgon conduz frequentemente a resultados errados devido à perda do árgon, que é gasoso e por isso muito móvel.

Também sabemos hoje que a maioria das rochas experimenta uma evolução complexa, ligada a fenómenos posteriores à génese, que podem mobilizar alguns dos átomos envolvidos nos cálculos de idade. É o caso do sistema rubídio-estrôncio, que muitas vezes é mais útil como traçador de processos do que na datação das rochas. Outro aspecto analítico de grande interesse é a possibilidade de análises pontuais em cristais individualizados. Desta forma é possível datar os componentes detríticos independentemente das rochas em si, como se fez recentemente em cristais de zircão de rochas da Austrália Ocidental. As rochas (conglomerados) têm 3000 milhões de anos, mas contêm cristais de zircão, detríticos, em que se obtiveram idades de 4300 e até de 4400 milhões de anos. As implicações destas idades (e outras características dos cristais estudados) são apaixonantes, como veremos adiante.

## O TEMPO GEOLÓGICO

Alguns fenómenos geológicos, como os sismos e o vulcanismo, têm lugar numa escala de tempo que nos permite a sua percepção, por vezes de forma aguda, dada a nossa pequenez e a fragilidade humana perante tais fenómenos. Contudo, grande parte da dinâmica da Terra tem lugar numa escala demasiado longa para que nos apercebamos dela. Os números são tão grandes que pouco significam. A Tabela 1 mostra algumas das principais divisões da história da Terra, com idades em milhões de anos e as datas correspondentes num intervalo de um ano, de 1 de Janeiro a 31 de Dezembro. É curioso verificar que a diversificação da vida em formas superiores, dominando a Terra, se verifica a escasso mês e meio do fim de tal ano (início do Câmbrio); que a extinção dos dinossáurios é já depois do Natal; e que o Homem aparece na Terra a

menos de quatro horas da passagem do ano. Apenas para reflexão: nesta escala, o nascimento de Cristo foi há 13,7 segundos e a bomba de Hiroshima explodiu há apenas quatro décimas de segundo.

Alguns marcos importantes da história da Terra, em milhões de anos e respectivas datas no período de um ano

Divisões da História da Terra		10 <sup>6</sup> anos	Dia	Mês	Hora	m	s
Pré-Câmbrico	Eon Hadeano	4600	1	Janeiro	0	0	0
	Início do Arcaico	3960	20	Fevereiro			
	Eon Arcaico						
Eon Proterozóico	Início do Proterozóico	2500	16	Junho			
	Início do Câmbrio	540	19	Novembro			
Eon Fanerozóico	Era Paleozóica						
	Aparecimento dos Dinossaúros	250	12	Dezembro			
	Era Mesozóica						
	Extinção dos Dinossaúros	65	26	Dezembro			
	Era Cenozóica						
Aparecimento do Homem	2	31	Dezembro	20			
Nascimento de Cristo	0.002	31	Dezembro	23	59	46.3	
Bomba de Hiroshima	0.000056	31	Dezembro	23	59	59.6	

## A TERRA PRIMITIVA

Existe hoje razoável unanimidade em aceitar que a Terra teve origem no sistema solar, há cerca de 4600 milhões de anos, conforme indica o estudo dos meteoritos e rochas lunares, a partir de poeira cósmica proveniente de ciclos estelares anteriores, incluindo explosões de supernovas (dada a presença de elementos pesados). Os cristais de zircão australianos já mencionados, com idades de 4300 a 4400 milhões de anos, são os materiais terrestres mais antigos que se conhecem. O zircão é um mineral que se forma tipicamente em rochas ácidas (graníticas), portanto já evoluídas. Por outro lado, as proporções dos isótopos do oxigénio que existem nestes cristais sugerem que eles se tenham formado com intervenção de água líquida, o que, por sua vez, levanta a possibilidade da existência de oceanos. Estas interpretações são apaixonantes, apesar das incertezas que as rodeiam.

As *rochas* mais antigas são os gnaisses de Acasta (Norte do Canadá) com 3960 milhões de anos, cuja composição granítica evidencia já derivação a partir de materiais muito evoluídos, possivelmente uma crosta primitiva de composição basáltica. As rochas sedimentares mais antigas que se conhecem ocorrem na costa oeste da Gronelândia (Península de Isua), e têm 3800 milhões de anos. São constituídas pelos mesmos minerais que continuam hoje a formar-se, nas rochas sedimentares actuais (incluindo óxidos de ferro – magnetite e hematite, cherte – uma espécie de sílex –, e minerais oxigenados como car-

bonatos e até sulfatos). Estes e outros sedimentos arcaicos ocorrem intimamente associados a enormes quantidades de rochas vulcânicas, com composições desde ultrabásicas (komatitos) a ácidas (graníticas), em conjuntos submarinos, geralmente pouco deformados, e apresentando metamorfismo de baixo grau – caracterizado pela formação de vários minerais verdes, como clorite e actinolite (anfíbola verde), a que damos o nome de faixas de rochas verdes (*greenstone belts*), separadas por grandes extensões de gnaisses. As condições em que se formaram as faixas de rochas verdes do Arcaico podem ter sido semelhantes às actuais, mas numa Terra

- com poucas e/ou pequenas extensões de terrenos emersos (quase não se encontram sedimentos terrígenos);
- mais quente - a temperatura da água dos oceanos no início do Arcaico parece ter sido perto de 100°C;
- com erupções vulcânicas frequentes e muito grandes.

O quimismo da Terra está em claro desequilíbrio com o da atmosfera actual, com cerca de 21% de oxigénio livre. Não resta qualquer dúvida que este resulta essencialmente da actividade biológica, representando, em saldo líquido, o resultado da fixação de carbono na biosfera, e nos sedimentos, a partir de dióxido de carbono. A Terra antes do desenvolvimento da vida era certamente pobre em oxigénio livre.

## A ORIGEM DA VIDA

Os sedimentos de Isua contêm evidência de que a vida florescia já nessa época: existe grafite igual à que deriva da incarbonização de seres vivos, e alguns cientistas pensam mesmo ter descoberto fósseis de bactérias nestas rochas. São famosas as experiências de Stanley Miller e Harold Urey, em inícios dos anos 50, que conseguiram sintetizar macromoléculas orgânicas precursoras de proteínas, através de descargas eléctricas em soluções aquosas ricas em amónia, metano e hidrogénio. Daqui nasceu a teoria da sopa primordial, postulando-se a existência de oceanos primitivos ricos em tais componentes, a partir dos quais se teria originado a vida na Terra. Contudo, não há qualquer evidência geológica para que estes oceanos tenham alguma vez existido. Por exemplo, se minerais como argilas, micas e clorites se formassem a partir de um fluido rico em amónia, deveriam reter pequenas quantidades deste componente, o que não se verifica.

Estudos recentes sugerem outra possibilidade, mais alician- te. Conhecem-se no fundo dos oceanos campos

hidrotermais, onde brotam, de autênticas chaminés, fluídos a temperaturas até mais de 350°C, ricos em metais. As estruturas (Fig. 2) apresentam-se geralmente cobertas de seres vivos, desde mantos de bactérias a caranguejos, mexilhões, amêijoas gigantes e espectaculares vermes tubíporas com vários metros de comprimento. As bactérias, que constituem a base da cadeia alimentar, obtêm energia e nutrientes através de reações químicas (nas quais intervém o enxofre), e não da fotossíntese, pois no fundo do mar não há luz. Os fluídos hidrotermais correspondem bem aos postulados de Miller e Urey. Por estas razões, é muito aliciante a hipótese de que tenha sido em campos hidrotermais submarinos que se gerou a vida na Terra.

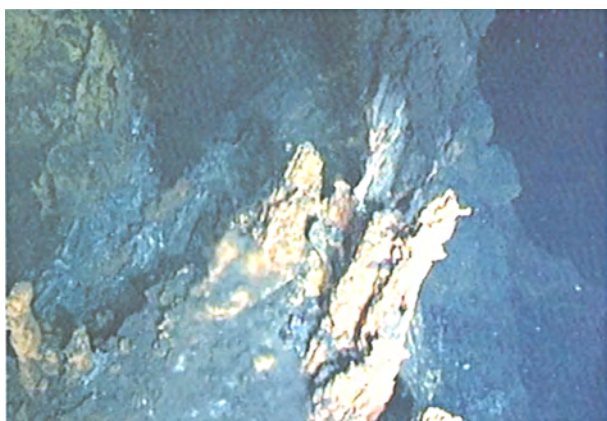


Fig. 2. Conjunto de chaminés hidrotermais produzindo um fluído negro, que brota a 360°C, e que alimenta comunidades biológicas com bactérias, mexilhões, camarões, etc., baseada em quimiossíntese e não na fotossíntese. Campo Rainbow, a 2300 m de profundidade, Crista Média Atlântica a sul dos Açores. Foto missão Saldanha, 1998 (ICTE-FCT, Portugal/lfrermer-França).

## A EVOLUÇÃO DAS PAISAGENS

A partir de idades de 3500 milhões de anos e mais recentes, na maioria dos sedimentos do Arcaico, encontram-se enormes quantidades de fósseis, não só de bactérias, mas também de algas cianofíceas. A presença de restos destes seres vivos é muito importante, porque mostra que já então se produzia oxigénio. Se este era ou não suficiente para oxigenar os oceanos, e começar a acumular-se na atmosfera, é motivo de aceso debate. Apontam-se geralmente as formações ferríferas bandadas (arcaicas e proterozóicas) e os conglomerados com pirite e uraninite (UO<sub>2</sub>) do Proterozóico Inferior (2200 a 2500 milhões de anos) como os principais argumentos a favor de um modelo redutor para a Terra durante o Arcaico, e oxigenação progressiva ao longo do Proterozóico. Mas a

génese destas rochas pode explicar-se de várias formas, sem necessidade de oceanos redutores, cuja existência é de resto contra-indicada pela presença de carbonatos e sulfatos, e pelo estilo redox da actividade hidrotermal submarina arcaica, análogo ao actual. Parece certo que, entre impactes meteoríticos (e outras influências cósmicas) e intensa actividade vulcânica, as condições de vida na Terra não foram, durante a maior parte do Pré-câmbrico, suficientemente estáveis para permitirem o aparecimento de seres evoluídos. Pense-se nas extinções em massa de há 65 milhões de anos, provavelmente devidas à queda de um único meteorito, de dimensões modestas. A ausência de estabilidade poderá, de resto, ser a chave para outras peculiaridades do Pré-câmbrico, incluindo a génese das formações ferríferas.

Quanto à crosta continental, enquanto a evolução litológica do Arcaico ao Fanerozóico é surpreendentemente pequena, os estilos tectónicos e paleo-ambientais parecem ter-se modificado radicalmente. As diferenças mais notórias conseguem explicar-se com base num modelo de arrefecimento secular do interior da Terra, apoiado na existência de komatitos (lavas ultramáficas) magnesianas apenas no Arcaico (implicando temperaturas de extrusão de cerca de 1700°C e, portanto, gradientes geotérmicos elevados), e aumento progressivo, até aos nossos dias, da abundância de rochas como eclogitos e xistos azuis, típicas de metamorfismo em condições de baixo gradiente geotérmico.

Se se aceitar que a principal fonte de calor no interior da Terra foi sempre, como actualmente, a radioactividade, o arrefecimento é consequência lógica da diminuição da quantidade de material radioactivo. A tectónica de placas parece dominar há apenas cerca de mil milhões de anos, enquanto no Arcaico as zonas de subida e descida de material mantélico estavam separadas por distâncias de poucas centenas de quilómetros. O Proterozóico terá sido uma idade de transição entre os dois estilos. A abundância de rochas de composição granítica, desde o início do Arcaico, sugere que a diferenciação do material sílico foi muito precoce. A enorme escassez de rochas terrígenas sugere, contudo, que a crosta de tipo continental começou por ser fina e imersa, e lateralmente muito extensa, possivelmente cobrindo todo o globo. O arrefecimento progressivo terá permitido a subducção de materiais sílicos até profundidades cada vez maiores e, por consequência, é possível que a crosta continental tenha vindo a diminuir de volume, do Arcaico até aos nossos dias. Simultaneamente, e talvez um pouco paradoxalmente, a quantidade de terra emersa aumentou, devido a espessamentos por colisão continental, à custa de áreas cada vez maiores de crosta oceânica (hoje cerca de 70% da superfície da Terra).

# O QUE MUDA NO MUDA A TEMPERAT



$10^{19}$  m

O Universo já foi muito quente porque a expansão do Universo implica o seu arrefecimento.

O Universo é um local bastante frio. A sua temperatura foi medida, em 1965, por Wilson e Penzias e, mais recentemente, em 1992, com muito maior precisão, pelo satélite COBE. É apenas de 2,726 K ou seja  $-270^{\circ}\text{C}$ . A distribuição de energia da radiação cósmica de fundo pelos diferentes comprimentos de onda (fig. 1) é exactamente aquilo que é esperado para radiação a esta temperatura, sendo os desvios inferiores a dez partes num milhão. Mas, felizmente, o Universo tem, aqui e ali, algumas lareiras termo-nucleares e nós vivemos muito perto de uma, que se chama Sol.

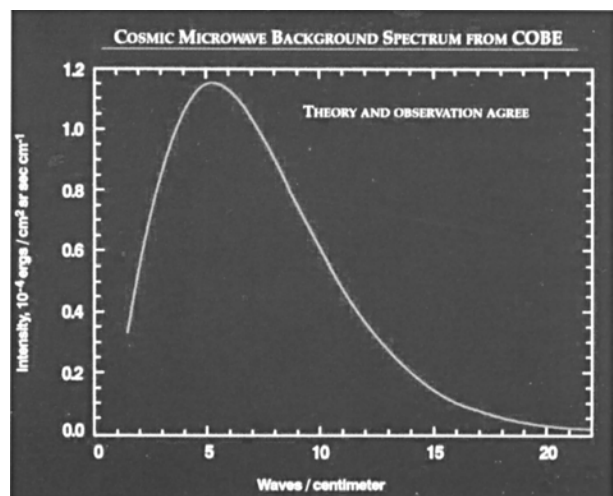


Fig.1. A distribuição de energia da radiação cósmica de fundo pelo espectro de frequências corresponde ao que é esperado para radiação em equilíbrio térmico a  $T=2,726$  K. Os dados e a curva de ajuste são indistinguíveis.[1]

JOÃO LOPES DOS SANTOS

Centro de Física do Porto e Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto

jlsantos@fc.up.pt

# MUNDO QUANDO URA

Como veremos, o Universo já foi muito mais quente, porque a expansão do Universo implica o seu arrefecimento. O comprimento de onda da radiação aumenta exactamente do mesmo factor que as distâncias entre galáxias, o que corresponde a uma diminuição de temperatura. Os físicos pensam que a temperatura pode ter sido tão alta como 100 quintiliões de graus ( $10^{32}$ ), tanto faz Kelvin ou Celsius, mas apenas porque é a maior escala de temperatura que conseguem construir com as constantes universais que surgem na teoria da gravitação (constante de gravitação,  $G$ ) na relatividade ( $c$ , velocidade da luz) e na teoria quântica ( $h$ , constante de Planck) e com a constante de Boltzmann ( $k_B$ , ver abaixo).

A nossa ignorância sobre o que se possa ter passado cresce também muito rapidamente com a temperatura. Apesar disso, este campo de investigação está "quente" (não apenas por causa dos  $10^{32}$  K mas porque actividade recente em teorias de supercordas em espaços de 10 ou 11 dimensões parece prometer a construção de uma teoria quântica da gravitação consistente). No laboratório, os físicos conseguiram obter temperaturas muito inferiores a 2,726 K, tão baixas como um milésimo de milionésimo de grau acima do zero absoluto ( $10^{-9}$  K). Se não houver vida inteligente noutros planetas, este cantinho será o sítio mais frio de todo o Universo. Estas temperaturas são necessárias para poder observar o fenómeno de condensação de Bose-Einstein em nuvens muito diluídas de átomos, e que valeu o prémio Nobel da Física de 2001.

Os físicos estão pois activos em escalas de temperatura que diferem de 41 ordens de grandeza! O objectivo deste artigo é mostrar que estão também a trabalhar em mundos muito diferentes. À medida que a escala de temperatura varia, muda de tal modo o conteúdo do universo, (as partículas, as forças entre elas, "os actores") que quase podemos falar em *leis físicas diferentes*, embora mutuamente compatíveis. Mas, felizmente, o quadro geral de conceitos que usamos na descrição (os métodos de "encação") são os mesmos. Podemos, portanto, encontrar num laboratório, dentro de um criostato, a 10 K, fenómenos muito semelhantes aos que aconteceram quando o Universo estava tão quente que não passava de uma sopa de partículas, a maior parte das quais nem sequer existe actualmente, sem qualquer estrutura (sem estrelas, galáxias, átomos ou mesmo prótons e neutrões).

## O QUE É A TEMPERATURA?

Todos os sistemas físicos têm um espectro de energia. O átomo de hidrogénio, por exemplo, um sistema constituído por um electrão e um próton, possui um conjunto de níveis de energia discretos e as transições entre esses níveis são acompanhadas por emissão de radiação com comprimento de onda bem definido - o espectro de riscas. Esse é apenas parte do espectro, pois acima da energia de ionização existe um conjunto contínuo de níveis que descrevem estados em que o electrão e o próton podem estar infinitamente afastados. O estado de energia mais baixa é conhecido por estado fundamental. É uma característica universal de qualquer sistema que *tenha um estado fundamental*.

Um sistema isolado está normalmente num dos seus estados de energia e a conservação de energia implica que aí permaneça para sempre (enquanto estiver isolado). As interações com outros sistemas (o "ambiente") permitem transitar de estado e de energia. A temperatura caracteriza a probabilidade de o sistema estar num determinado estado. A  $T = 0$  está com probabilidade um no estado fundamental. Para  $T > 0$ , tem uma probabilidade que decresce com o aumento da energia do estado e, muito rapidamente, se torna desprezável acima de uma energia proporcional a  $T$ ,  $k_B T$ . A constante de Boltzmann,  $k_B$ , permite-nos estabelecer uma relação entre unidades diferentes de energia. Por exemplo, para ionizar um átomo de hidrogénio no seu estado fundamental (separar o electrão do próton) é necessária uma energia de 13,6 electrões-volt (eV)<sup>1</sup>.

A unidade de temperatura é o kelvin (K), sendo um kelvin igual a um grau Celsius. A constante de Boltzmann vale  $8,6 \times 10^{-5}$  eV K<sup>-1</sup>, isto é, a uma temperatura de 100 000 K equivale uma energia  $k_B T$  eV. A temperatura à superfície do Sol, cerca de 5600 K,  $k_B T = 0,48$  eV, já é suficiente para encontrar com frequência átomos de hidrogénio ionizados. Daqui em diante usaremos indiscriminadamente as unidades eV e K para energias e temperaturas, com o sentido aqui referido.

Da caracterização da probabilidade de ocupação de *um* estado resulta que o estado fundamental é sempre (a qualquer temperatura) o mais provável. A regra de probabilidade acima indicada diz respeito à probabilidade de ocupação de um estado. O número de estados cresce em geral muito rapidamente com a energia. Embora o estado fundamental seja o mais provável, ele é apenas um entre muitos estados acessíveis a uma temperatura finita.

## COMO MUDA A RECEITA COM A TEMPERATURA

Imagine-se que toda a matéria e radiação desapareciam: um universo vazio. Outro universo que não este, certamente. Bem, na realidade, esse é apenas *um dos estados do nosso Universo*. Na descrição quântica da matéria e radiação (que são essencialmente a mesma coisa) as partículas e ondas como que se fundem numa entidade chamada um *campo quântico*. Tomemos um exemplo simples. Suponhamos que queremos descrever o movimento de uma corda de guitarra. A cada ponto da corda temos que associar uma grandeza (deslocamento) que depende do tempo. Obtemos então um campo definido por uma função de duas variáveis, a coordenada do ponto e o tempo. A corda tem movimentos particularmente simples, em que a forma da oscilação é sinusoidal, com um dado comprimento de onda. A cada comprimento de onda corresponde uma frequência determinada. Estes modos simples de vibração, conhecidos por modos normais, são características universais de campos lineares. Os campos quânticos também têm modos normais (cada um com a sua frequência e comprimento de onda), mas cada modo normal torna-se num estado possível para um dado tipo de partículas. Para o electrão (e a sua anti-partícula, o positrão) há o campo electrónico, para o fóton o campo electromagnético, etc. A frequência do modo é proporcional à energia da partícula e o comprimento de onda inversamente proporcional à sua quantidade de movi-

mento. A relação entre a frequência e o comprimento de onda determina a relação entre a energia e a quantidade de movimento.

No caso do campo electromagnético, a frequência vai a zero quando o comprimento de onda se torna infinito ( $\omega = 2 \pi c/\lambda$ ). A relação entre a energia e a quantidade de movimento fica  $E = cp$ , que descreve uma partícula de massa em repouso nula que se move a velocidade  $c$ , o fóton ou partícula de luz. Nesta linguagem, a massa de uma partícula é proporcional à frequência de um modo normal para comprimento de onda infinito (quantidade de movimento nula).

Há dois tipos fundamentais de partículas: bosões, em que cada estado pode ser ocupado por muitas partículas, e fermiões, em que em cada estado só pode ser ocupado por uma. O modo de quantificar um campo é que determina se ele origina bosões ou fermiões.

Uma partícula (fóton, electrão ou protão) é pois um estado excitado de um campo. O estado fundamental deste sistema - *o vácuo* - não tem partículas (nem radiação, que no caso electromagnético são partículas de massa nula). Para cada partícula de massa não nula podemos calcular uma temperatura abaixo da qual será muito pouco provável encontrar o Universo com essa energia de excitação. Essa temperatura limiar é simplesmente dada por  $T = mc^2 / k_B$ . A tabela 1 mostra essas temperaturas para várias partículas.

Partícula	Símbolo	Energia em Repouso ( $10^6$ eV)	Temperatura Limiar ( $10^9$ K)
FOTÃO		0	0
ELECTRÃO	e <sup>-</sup> , e <sup>+</sup>	0,511	5,93
MUÃO	μ <sup>-</sup> , μ <sup>+</sup>	105,7	1226,2
PROTÃO	p, p̄	938,26	10 888
NEUTRÃO	n, n̄	939,55	10 903

Tabela 1. Temperaturas correspondentes à energia em repouso de várias partículas.

Como se vê, o Universo está demasiado frio para que existam sequer electrões ( $T = 5,9 \times 10^9$  K) e muito menos protões ( $T = 1,1 \times 10^{13}$  K). Porque é que ainda há alguns, então? Ou seja, porque é que há matéria, que, no estado actual do Universo, é formada por todas as partículas de massa não nula, já que às outras chamamos radiação? Acontece que nem todas as transições são possíveis. Por



exemplo, o campo associado ao electrão não pode transitar entre os estados de zero e de um electrão. Tal violaria um princípio de conservação de carga. Mas tem modos que correspondem à anti-partícula do electrão, o positrão (que tem as mesmas características do electrão, mas carga oposta), e é possível a criação ou destruição de um par electrão-positrão. Estas regras (incluindo os princípios de conservação) estão contidas na própria estrutura dos campos associadas às partículas. A única razão porque existe algo mais do que partículas de massa nula (o electrão é a partícula de massa não nula mais leve)<sup>2</sup> é que, quando o universo estava muito mais quente, havia um ligeiro excesso de matéria sobre anti-matéria e ficaram alguns electrões, prótons e neutrões, que não puderam desaparecer em virtude de leis de conservação. Mas, quando o Universo estava (muito) mais quente, existiam muito mais partículas. Se as conhecemos hoje, é porque algumas são criadas em fenómenos celestes de alta energia (supernovas por exemplo) e porque construímos enormes instrumentos científicos como o LEP, Large Electron Positron Collider, no CERN, com um túnel de quase 27 km de perímetro, para obter temperaturas que chegam aos  $10^{15}$  K em pequenas regiões, no interior de detectores extremamente sofisticados [2].

Mas a descida da temperatura não faz apenas desaparecer as partículas com massas demasiado elevadas. Cria também partículas novas. O próton, por exemplo, só apareceu quando a temperatura se tornou inferior a cerca de  $10^{12}$  K. Acima desta temperatura, além de leptões (electrões e positrões, neutrinos e mais duas famílias idênticas, mas um pouco mais pesadas), havia um outro tipo de partículas, os quarks. A estas partículas temos ainda que juntar bosões, semelhantes aos fotões, e que são responsáveis pelas interações entre as anteriores. Mas de prótons e neutrões nem rasto... Acontece que os estados de baixa energia de quarks (que tenham sobrevivido à aniquilação com anti-quarks) são três quarks confinados a uma região espacial muito pequena (da ordem de  $10^{-13}$  cm). É a isso que chamamos prótons e neutrões. Algo de muito parecido aconteceu, muito mais tarde, quando a temperatura era de centenas de milhares de kelvin. Os electrões e prótons, nos seus estados de mais baixa energia, agruparam-se em pares formando os primeiros átomos de hidrogénio na história do Universo.

Mas há ainda um último efeito, mais subtil, da descida de temperatura. O Universo actual é formado sobretudo por electrões, prótons, fotões e neutrões. Como reagiria o leitor se lhe dissesse que não existe qualquer interacção entre o próton e o electrão? Então cargas opostas não se atraem?

A interacção entre partículas resulta da influência que o movimento do campo de uma tem sobre o da outra. Nesse sentido, o electrão e o próton só interagem com o campo electromagnético, com fotões. A altas temperaturas, prótons e electrões emitem e absorvem fotões. A temperaturas baixas já não surgem fotões de alta energia. Mas o campo quântico associado ao electrão continua ligado ao campo electromagnético. Aquilo que chamamos um electrão (um estado com energia de excitação  $m_e c^2$ ) é um modo de vibração do campo electrónico que distorce o campo electromagnético. O electrão transporta consigo uma deformação do campo de fotões, ou, por outras palavras, uma nuvem de fotões virtuais (não são reais, pois esses são outros estados, mais excitados, dos dois campos acoplados). O mesmo acontece com o próton e as duas partículas interagem apenas através dessa deformação do vácuo electromagnético. Isso é a interacção de Coulomb. Um pouco como duas bolas pesadas numa membrana elástica que só se atraem quando se sobrepõem as deformações que causam. A fig. 2, retirada do livro de Feynman, *QED, A estranha teoria da luz e da matéria*, é uma representação do átomo de hidrogénio nesta linguagem.

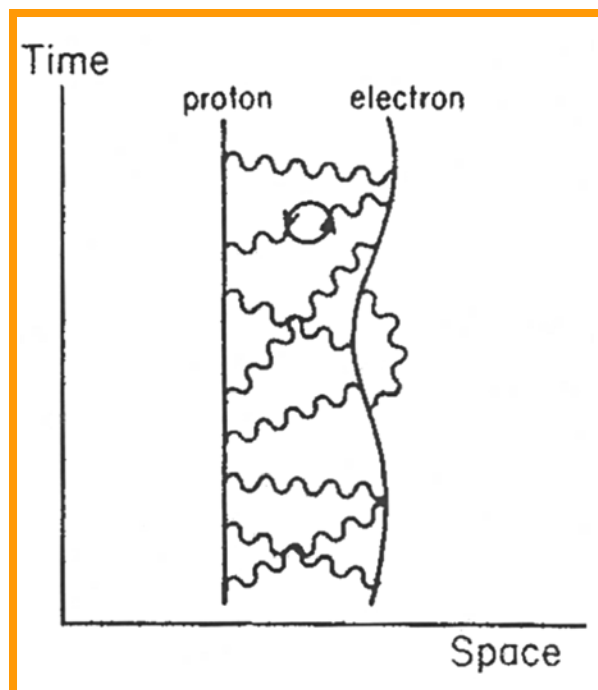


Fig.2. O átomo de hidrogénio, visto por Feynman. A interacção entre o electrão e próton resulta da troca de fotões [3].

## ARREFECENDO

Quando a temperatura baixa, surgem partículas novas, desaparecem outras, que deixam interações (que não existiam) entre as partículas que sobrevivem. Por outras palavras, muda toda a descrição que fazemos do Universo. E se continuarmos a baixar a temperatura em direcção a  $T=0$  ?

As surpresas são muito semelhantes às que descrevi acima. Muitos dos ingredientes das teorias que descrevem a evolução do Universo exprimem conceitos descobertos em física de baixas temperaturas. Um exemplo é a supercondutividade. O movimento dos electrões num metal está ligado ao dos átomos da rede cristalina. As vibrações da rede (um campo) estão associadas a partículas muito semelhantes às do campo electromagnético. Essas "partículas" são conhecidas como fonões. Pois bem, elas originam uma interacção entre dois electrões, um pouco como os fotões dão origem à interacção de Coulomb. Acontece que essa interacção é atractiva (a deformação que um electrão causa na rede é "confortável" para outro que passe por ali). A baixas temperaturas os electrões formam pares que se comportam como bósons e podem ocupar o mesmo estado. O campo quântico associado aos pares de electrões passa a ter um estado de "repouso" (*vácuo*) com valor médio não nulo. Esse vácuo é carregado. Pode conduzir corrente sem dissipação porque esta está associada ao transporte por "partículas", as excitações do campo (já não são electrões), que não existem no *vácuo*. O metal conduz electricidade sem qualquer resistência.

Devido às enormes possibilidades que têm de experimentar, variando materiais, temperatura, geometria (podem fazer-se sistemas que "vivem" em uma ou duas dimensões espaciais), os físicos de baixas temperaturas são por vezes invejados pelos seus colegas que fazem física fundamental. Em física de baixas temperaturas podem criar-se situações que nunca ocorreram no Universo, e nas quais surgem partículas (aqui mais conhecidas por excitações) com propriedades e interações inesperadas e que não raro lançam luz sobre as teorias fundamentais.

Para concluir gostaria de mencionar uma das descobertas realizadas a uma das mais baixas temperaturas que é possível atingir. Trata-se da condensação de Bose-Einstein de nuvens de átomos diluídos, prevista teoricamente há mais de 75 anos, mas que só ocorre a temperaturas inferiores a um milésimo de milionésimo de kelvin. Tal como na supercondutividade podemos olhar para este fenómeno como o aparecimento de um estado em que o campo quântico

associado às partículas (átomos de rubídio, sódio, hidrogénio, etc.), no *vácuo*, o seu estado sem excitações, tem um valor não nulo (o quadrado desse valor é a densidade de átomos na nuvem). Note-se que as excitações (partículas) definidas a partir desse estado já não são os átomos originais. Ao sobrepor dois campos, com amplitude e fase, observam-se em geral interferências, com alternância entre bandas em que os campos se reforçam e outras em que estes se anulam.

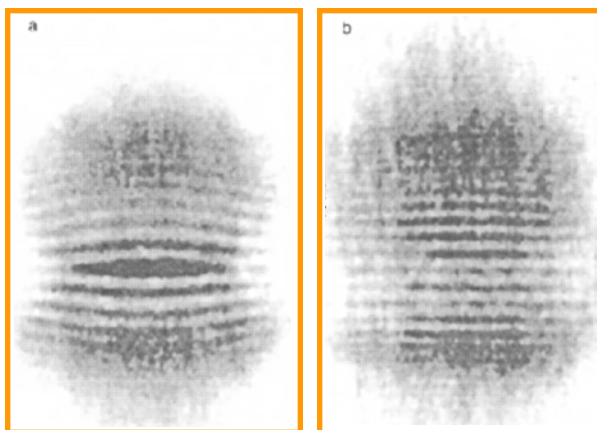


Fig.3- Duas nuvens de átomos condensados interferem.

Na fig. 3 vemos um fenómeno de interferência entre duas nuvens de átomos condensados. O campo quântico está, no essencial, no seu estado de mais baixa energia - o *vácuo*. Veja-se como pode ser recompensador, do ponto de vista da física fundamental, estudar fenómenos a baixas temperaturas. Onde mais se pode observar a interferência do vácuo com ele próprio?

### NOTAS

- 1 Um electrão-volt é a energia adquirida por um electrão quando acelerado por uma diferença de potencial de um volt. Trata-se de uma energia extremamente pequena à escala macroscópica, pois envolve apenas um electrão.
- 2 Pode não ser verdade. Experiências recentes sugerem que o neutrino pode ter uma massa não nula, ainda que inferior a 103 K.

### REFERÊNCIAS

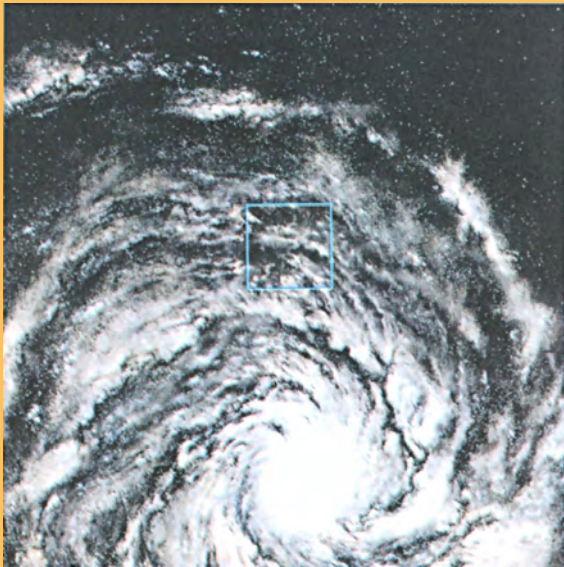
- [1] - <http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/>
- [2] Pedro Teixeira Dias, *A caça à partícula Higgs*, Gazeta de Física 24, fasc. 3, p. 4 (2001)
- [4] R. P. Feynman, *QED, the strange theory of light and matter*, Princeton University Press, New Jersey, 1985
- [5] Barbara Gross Levi, Bose Condensates are Coherent, Inside and Outside an Atom Trap, *Physics Today*, March 1997, p.17.

COLECCÃO

# Biblioteca Científica

Uma reconhecida colecção científica para quem se interessa por temas vários da Ciência moderna. Baseada em originais de grande qualidade por autores de renome, publicados pela "Scientific American Library", aborda os assuntos de forma profunda, embora clara e acessível, com imagens e esquemas a cores que complementam e explicam o texto de forma eficaz.





$10^{21}$  m

Foi preciso esperar pelo advento da fotografia, em finais do século XIX, para se poderem ver estrelas, nebulosas e galáxias nunca vistas por olhos humanos.

RUI JORGE AGOSTINHO  
Centro de Astronomia e Astrofísica  
e Departamento de Física da Universidade de Lisboa  
rui.agostinho@clix.pt

# DO SISTEMA SOLAR

A medição das dimensões do Cosmos começou pela "nossa casa": o sistema solar. As primeiras tentativas centraram-se nas distâncias da Terra-Lua-Sol, e só com o modelo copernicano se conseguiu utilizar a triangulação entre os planetas para determinar as suas distâncias. Assim, com Copérnico, Tycho Brahe e depois Kepler, criou-se e refinou-se uma nova unidade de medida, que era apropriada para medir as posições entre os astros: a unidade astronómica (UA), que tem o valor do semi-eixo maior da órbita terrestre. Nesta unidade os nove planetas do sistema solar espriam-se até aos 40 UA, mas sabemos hoje que a classe dos pequenos transneptunianos (do qual Plutão é o primeiro exemplo) ocupa o espaço até às 55 UA, em órbitas excêntricas e inclinadas.

Uma das consequências do modelo esférico copernicano era que as estrelas fixas deveriam reflectir o movimento terrestre em torno do Sol. Estarão longe demais? Serão mesmo fixas? Uma estrela próxima deveria apresentar uma mudança de posição em relação às mais distantes, tal como as coisas próximas parecem mover-se em relação às montanhas longínquas, quando viajamos de automóvel. James Bradley mostrou em 1720 que o movimento aparente anual da estrela dupla (duas estrelas na mesma linha de visada com uma muito mais próxima que a outra) Draconis é de uma pequena elipse pois reflecte o movimento de translação da Terra.

# AO COSMOS

## O UNIVERSO LENTICULAR

William Herschel, nos finais do século XVIII, com o seu Grande Telescópio de 40 pés de distância focal, confirmou o que Galileu Galilei tinha descoberto: essa zona esbranquiçada no céu está polvilhada de estrelas e pequenas nebulosas. Em 1768 já conhecia cerca de 68 nebulosas. Em 1781 Charles Messier publicou o seu famoso catálogo de 103 objectos difusos (nebulosas, galáxias e enxames globulares de estrelas) e discutia-se se estes estariam entre as estrelas ou para lá destas. A descoberta da enorme densidade de estrelas na banda central da Via Láctea revela uma distribuição não uniforme das estrelas.

A contagem sistemática de estrelas feita por Herschel levou-o a afirmar que o Sol estará no centro de uma estrutura elíptica, em que o raio maior é cinco vezes a sua espessura. O Cosmos não é esférico! Durante a sua vida catalogou cerca de 2500 nebulosas, e reparou que há concentração destas (mais de um terço) na constelação da Virgem. Isto levou Herschel a admitir que existe um sistema estelar (a Galáxia) que parece estar na periferia deste super-grupo mais vasto centrado na constelação da Virgem. É a primeira indicação de aglomeração de galáxias.

## A PARALAXE

A medição das distâncias pelo método da paralaxe exigia instrumentação de grande qualidade óptica e estabilidade

mecânica, pois trabalhava-se com ângulos inferiores ao segundo de arco. Em 1839 Friedrich Bessel tinha acumulado centenas de dados sobre a estrela 61 Cisne e mediu a sua paralaxe de  $\approx 0,314''$ , ou seja a distância  $d = 660\,000$  UA ( $d(\text{pc}) = 1/\theta''$ ): muito para além do sistema solar! Dois meses depois Thomas Henderson publicou a paralaxe de Centauro, o que a colocou a menos de  $200\,000$  UA. Wilhelm Struve começou os estudos de estrelas duplas e paralaxes em 1824 em Dorpat. A sua nomeação para responsável da construção do grande observatório de Pulkova (em S. Petersburgo) atrasou-lhe os trabalhos de investigação e por isso, publicou a paralaxe de Vega (Lira) só em 1839. Com o valor de  $0,261''$  fica a  $790\,000$  UA. O Cosmos expandiu-se no conhecimento humano: o Universo deixou de ser esférico, mas criámos um heliocentrismo à escala universal!

Após 1855, Struve, astrónomo de renome internacional (director do observatório astronómico mais importante do mundo), ajudou Filipe Folque e o tenente de armada Frederico Oom (por mandato do Rei D. Pedro V) a planejar os diversos telescópios e o edifício do Observatório Astronómico de Lisboa. Os grandes instrumentos foram adquiridos aos melhores mestres europeus: Repsold de Hamburgo (círculo meridiano de passagens) e Merz de Munique (grande refractor equatorial de 39 cm de diâmetro e 7 m de distância focal), no final do século XIX. Frederico Oom treinou-se nos trabalhos de observação em Pulkova sob a directa orientação de Struve. Regressou a Lisboa onde se torna o primeiro director e desenvolveu trabalhos nestas áreas (posições, paralaxe, estrelas duplas), granjeando reconhecimento internacional para este observatório.

## UNIVERSOS-ILHA

Foi preciso esperar pelo advento da fotografia, em finais do século XIX, para se poderem ver estrelas, nebulosas e galáxias nunca vistas por olhos humanos. Agora as contagens podem ser muito mais exactas, e uma discussão iniciou-se entre von Seeliger, J. Kapteyn e van Rhijn, no início do século XX. Pela contagem de estrelas, Kapteyn concluiu que a Via Láctea é um esferóide achatado, cinco vezes maior no raio do que na espessura: cerca de 10 kpc de raio e 2 kpc de espessura. O Sol está a 650 parsecs (pc) do centro. Concluiu também que a densidade de estrelas diminui com a distância ao centro galáctico.

Em 1917 Harlow Shapley estudou a distribuição dos enxames globulares de estrelas e descobre que estes estão organizados numa estrutura aproximadamente esférica, cujo centro parece estar na direcção do Sagitário e a 15 kpc do Sol. Sabemos hoje que o Sol está a 8 kpc do centro galáctico. Estes enxames contêm cerca de  $10^5$ - $10^6$  estrelas, o que permite observá-los a grandes distâncias. As dimensões são exageradas pois o enfraquecimento do brilho das estrelas pela poeira converte-se numa atribuição de maiores distâncias.

Em 1923, Edwin Hubble vislumbrou estrelas individuais na galáxia de Andrómeda, entre as quais descobriu 12 ceifeiras. Com a recente calibração da relação Período-Luminosidade (P-L) para estas estrelas, deduzia que Andrómeda deve estar a cerca de 280 kpc de distância (650 kpc hoje): por isso essa galáxia é exterior à nossa, tão grande quanto a Via Láctea mas como esta constituída por estrelas. Fica saldado de vez o debate sobre os Universos-Ilha de Immanuel Kant, e o Cosmos assume proporções nunca vistas. A Via Láctea não é mais do que uma pobre galáxia entre tantas outras. A relação P-L de Shapley tem problemas e isso afecta a escala de distâncias e a constante de Hubble.

## O UNIVERSO EM EXPANSÃO

Hubble seguiu as pegadas de Vesto Slipher que até 1925 tinha obtido espectros de 40 "nebulosas espirais". Os espectros pareciam todos deslocados para o vermelho. Hubble determinou distâncias para estas galáxias e quantificou os resultados: as galáxias estão em recessão, com uma velocidade que é proporcional à sua distância, um resultado publicado em 1929. Concluiu-se que o Universo como um todo está em expansão. A Teoria da Relatividade Geral de Einstein assume um papel fundamental, e a noção de Cosmos passa a ser a de um Universo dinâmico. Esta descoberta é tão fundamental que a própria Lei de Hubble servirá no futuro para estimar distâncias às galáxias mais distantes. Claro que há fortes problemas de calibrações, resolvidos apenas no final do século XX. Uma das consequências mais imediatas da expansão do Universo é a noção de um começo de tudo, ou seja, de idade do Universo. Já não se tem apenas a idade obtida por via geológica para a Terra no século XIX, na ordem dos vários milhares de milhões de anos, é o próprio Universo que tem uma idade. O inverso do valor da constante de Hubble (540 (km/s) Mpc) repunha a idade do Universo em acordo com esta.

## UMA NOVA ASTROFÍSICA

A descoberta das nebulosas de emissão por W. Huggins, no final do século anterior, e os trabalhos de J. Hartmann em 1904 sobre riscas de Ca II, mostraram que há matéria gasosa interestelar. Em 1930 R. Trumpler comparou os brilhos intrínsecos dos enxames globulares concluindo que as suas estrelas tendem a ficar avermelhadas com a distância, estimando um factor de obscurecimento de 0,7 mag/kpc. O efeito das poeiras interestelares é cada vez melhor conhecido e permite corrigir os resultados de Kapteyn, Shapley e da lei de Hubble.

O problema da longevidade das estrelas ficou resolvido quando R. Atkinson e F. Houtermans em 1929 sugeriram que reacções termonucleares poderão ser a fonte energética estelar preponderante. Em 1938 Hans Bethe descreveu o ciclo p-p e von Weizsäcker e Bethe independentemente descobriram o ciclo CNO. O aparecimento de modelos de interiores de estrelas nos anos 40 em diante, com a física das secções eficazes nucleares e dos processos de transporte de energia, em paralelo com o novo poder computacional, revelaram-se uma ferramenta capaz de entender a evolução estelar. É este entendimento e o refinar das técnicas de observação, que permitirá ir calibrando os parâmetros astrofísicos e grandezas fundamentais de um modo cada vez mais auto-consistente.

A introdução da rádio-astronomia permitiu estudar a radiação cósmica de fundo. Em 1964 A. Penzias e R. Wilson detectaram um ruído de fundo nas antenas de telecomunicações que é isotrópico, e que se vem a identificar como radiação de um corpo negro a 2,726 K (satélite COBE, 1992). Ou seja, a expansão do Cosmos após o *big-bang* deixa uma radiação de fundo que vai arrefecendo consoante o universo expande: é a relíquia dos primeiros instantes do espaço/tempo do Cosmos. O estudo desta radiação permite ver nela os traços dos grandes momentos do universo: a formação das galáxias e das grandes estruturas em pequenas flutuações de intensidade na ordem no milionésimo. A teoria do *big-bang* torna-se a mais consistente juntando os estudos da expansão, da nucleosíntese e da radiação cósmica de fundo.

## NOVAS DISTÂNCIAS

A paralaxe é fundamental pois a sua distância não depende de suposições sobre as condições astrofísicas do objecto. Contudo, não se consegue ir mais longe do que os 50 pc

(mesmo com o satélite Hiparco de 1988). As variáveis (gigantes) RR Lira de luminosidade bem conhecida permitem medir as galáxias do grupo local até às centenas de kpc. As cefeidas levam-nos até ao início de pequenos grupos vizinhos de galáxias, nos poucos Mpc.

Para ir mais longe, criam-se indicadores secundários, isto é, procuram-se objectos de magnitude absoluta calibradas e intrinsecamente superbrilhantes, para se poderem observar a distâncias das centenas de Mpc. Surgiram os enxames globulares de estrelas que nos levam às dezenas de Mpc. Em 1977 a relação de Tully-Fisher descreveu o facto da velocidade de rotação de uma galáxia espiral (obtida na largura da risca de 21 cm) ser proporcional à massa da galáxia. Quanto maior for a massa maior será também a velocidade de rotação permitida. A massa é medida indirectamente através da quantidade de estrelas azuis que se formam nos seus braços (brilho emitido). A calibração da relação permite medir galáxias quase à centena de Mpc, isto é, no supergrupo da Cabeleira de Berenice e de Abel 1367.

A utilização de supernovas representa hoje um outro marco importante. As supernovas do tipo Ia são estrelas anãs brancas que, ao receberem massa de uma estrela companheira, ultrapassam o limite de Chandrasekhar ( $1,4 M_{\text{sol}}$ ) e explodem por ignição do carbono. Esta massa limite garante uma explosão de brilho quase constante. As supernovas têm sido usadas para atingir as muitas centenas de Mpc.

As calibrações da astrofísica, o conhecimento da importância da poeira interestelar e das nuvens gasosas intergalácticas permitem reduzir (em finais dos anos 70) a constante de Hubble para o valor realista de 75 (km/s) Mpc (actual), calibrar as idades das estrelas velhas e das galáxias em cerca de 14 mil milhões de anos. Aos poucos foi-se delineando a estrutura de buracos, vazios, grupos, enxames e aglomerados de galáxias e de grupos destas. Foi-se também desatando o intrincado novelo de velocidades relativas entre estes habitantes do cosmos, e descobre-se que o Grupo Local se move em direcção ao supergrupo da Virgem a cerca de 220 km/s, que por sua vez tem uma velocidade de 630 km/s em relação à radiação cósmica de fundo (referencial por excelência do Universo); e que o Grupo Local tem uma componente de cerca de 500 km/s em direcção ao super-aglomerado da Hidra-Centauro. Em 1987 o grupo dos "Sete Samurais" descobriu que este super-aglomerado está a ser puxado para o Grande Atractor, uma estrutura com massa equivalente a  $10^{16} M_{\text{sol}}$  ( $\sim 10^5$  galáxias) e duas vezes mais longínqua. Contudo, o Grande Atractor também se move, atraído

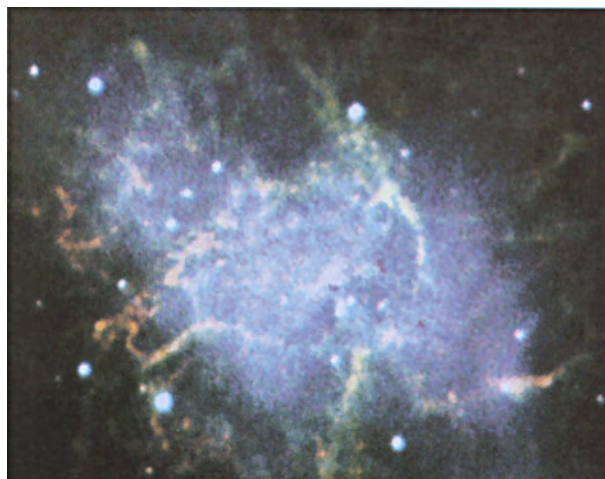
pelas chamadas Grandes Muralhas! Os levantamentos recentes elevam o número conhecido de medições e *red-shifts* (até aos 50 000 km/s ou  $d \sim 600$  Mpc) a mais de 28 000 galáxias.

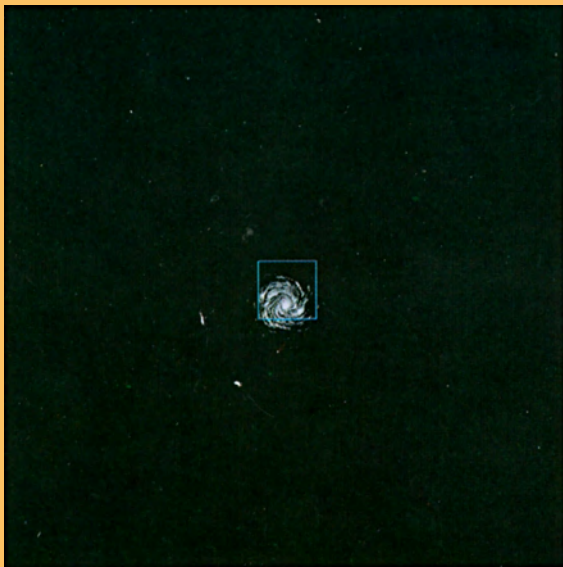
## PRÓLOGO AO TERCEIRO MILÉNIO

O Universo parece ter uma estrutura esponjosa na distribuição da matéria bariónica. A calibração da magnitude absoluta de supernovas próximas de tipo Ia mostra que o Universo está em expansão acelerada em vez da desaceleração buscada por todos durante décadas. A existência de um universo de matéria exclusivamente bariónico transforma-se em apenas 5% deste, no aparecimento de 30% de massa/energia escura exótica e até 65% de energia cósmica (vácuo) de natureza desconhecida. O Universo, que todos esperavam ter curvatura, mostra-se afinal globalmente plano. A inflação e o *big-bang* continuam a ser a melhor teoria disponível.

A nova geração de telescópios ópticos com interferometria será capaz de ver a formação das galáxias até aos primeiros momentos após o *big-bang*. Poderemos medir a nucleosíntese primordial, a sua evolução em galáxias primitivas até aos dias de hoje. Poderemos seguir a formação de estrelas e planetas em directo, qual programa que se assiste ao vivo na televisão. Os novos interferómetros gigantes no milímetro permitirão observar coisas nunca antes vistas por olhos humanos. Saberemos se a expansão acelerada é apenas um efeito local ou global. Se o Universo é fractal, perfeitamente uniforme, ou assimétrico. Esperamos finalmente entender o tempo e a energia.

A porta do Universo abre-se de par em par...





$10^{22}$  m

O que é o infinitamente grande? O que é o infinitamente pequeno? Como podemos pensar com eles?

JORGE BUESCU

Departamento de Matemática do Instituto Superior Técnico

jbuescu@math.ist.utl.pt

JOÃO PAULO TEIXEIRA

Departamento de Matemática do Instituto Superior Técnico

jteix@math.ist.utl.pt

# GALÁXIAS INFINITAS HALOS INFINITESIMOS

O problema das ordens de grandeza e escalas coloca-se em Matemática com uma importância ao nível dos fundamentos, como provavelmente em nenhuma outra ciência. Questões como "O que é o infinitamente grande? O que é o infinitamente pequeno? Como podemos pensar com eles?" deixam, na Matemática, de ser perguntas metafísicas para estarem na base do Cálculo Infinitesimal e da própria Matemática. E, como é claro, não estamos a falar sobre o modo como se transformam os objectos matemáticos a escalas mais finas ou mais grosseiras, mas sim a escalas *infinitamente pequenas* (infinitesimais) ou infinitamente grandes. É a Matemática para além de todas as escalas!

A introdução dos infinitésimos, grandezas "infinitamente pequenas", ou seja, positivas mas menores do que qualquer real positivo, bem como dos "infinitamente grandes", deu-se com a formulação do Cálculo Infinitesimal no século XVII, na versão de Leibniz. Na ideia de Leibniz, um integral é uma soma infinita de parcelas infinitamente pequenas, e uma derivada um quociente de acréscimos infinitesimais. É uma abordagem extremamente intuitiva que ainda hoje se preserva quer na notação de Leibniz para derivadas e integrais quer – sobretudo – na maneira de pensar o Cálculo.

Para exemplificar a derivada sob o ponto de vista infinitesimal, vejamos um exemplo: a definição de velocidade instantânea para o movimento unidimensional de uma partícula. Admitindo que a posição da partícula é dada por  $s(t)$ , a sua velocidade média no intervalo de tempo



# MENTE GRANDES, AIS

$[t, t+h]$  é dada por

$$\frac{s(t+h) - s(t)}{h}$$

A velocidade instantânea pode obter-se tomando  $h$  infinitesimal, desenvolvendo o numerador e desprezando neste quociente termos "infinitesimais", isto é, que envolvam  $h$ .

As ideias de números infinitesimal e infinitamente grande de Leibniz revelaram-se de extrema importância para a explosão e florescimento simultâneas do Cálculo e da Mecânica Clássica no século XVIII. De resto, não é por acaso que os grandes nomes deste período – Euler, os Bernoulli, Lagrange, Laplace, etc. – são simultaneamente grandes físicos e grandes matemáticos. Por exemplo, em todos os trabalhos que envolvem séries ou produtos infinitos, Euler, "o Mestre de todos nós" nas palavras de Lagrange, não tem qualquer problema em deduzir identidades para  $n$  finito e argumentar "tomando agora  $n$  infinitamente grande, esta grandeza está infinitamente próxima de...". E, como sabemos, os resultados a que Euler chegou estavam correctos.

As primeiras objecções ao Cálculo Infinitesimal surgiram no âmbito das ferozes discussões ideológicas que permearam o século das luzes. Por esta ocasião, a ciência e o conhecimento "racional" iniciaram um aceso combate (que ainda hoje perdura...) por um espaço e influência culturais que entrava em colisão com o monopólio cultural das doutrinas religiosas. Em 1734, o Bispo Berkeley tomou em mãos a tarefa de provar que o Cálculo tinha

fundamentos tão pouco racionais como os da própria religião. Assinalava ele em "O Analista – Sermão a um matemático infiel" que um incremento  $h$ , por mais pequeno que fosse, não poderia ser ignorado, sob o risco de se mergulhar toda a Matemática no "vazio absoluto, escuridão e confusão". Se  $h$  fosse zero, como se poderia passar o tempo a dividir por  $h$ ? Se fosse diferente de zero, como ignorá-lo no final dos cálculos? Berkeley termina o seu sermão com a famosa afirmação de que os infinitésimos não são, afinal, mais do que "fantasmas de quantidades desaparecidas"!

Mas os físicos e matemáticos do século XVIII não se deixaram perturbar. O Cálculo Infinitesimal funcionava, era intuitivo, produzia a Mecânica do Contínuo e a explosão da Física Teórica. Esta tradição prolongou-se por muito do século XIX; o próprio Cauchy, um dos mestres do rigor fundacional da Análise, utilizou durante muito tempo infinitésimos.

No entanto, as críticas de Berkeley permaneceram sem resposta eficaz. A batalha pelo rigor na Análise é travada em meados do século XIX e emerge vitoriosa da Alemanha, sob a batuta de Weierstrass. Os números reais são axiomatizados e demonstra-se que, no âmbito dessa axiomática, não há lugar para infinitésimos nem infinitamente grandes. Estes vêm-se subitamente relegados para um lugar de segundo plano: o de uma abordagem tão intuitiva quanto ingénua da ideia de limite, sobre a qual a Análise passa a ser fundamentada. É o triunfo do rigor sobre a intuição. A definição de derivada passa a ser

$$\varepsilon > 0 \quad \delta > 0 \quad h > 0 \quad 0 < |h| < \delta$$

$$\left| \frac{s(x+h) - s(x)}{h} - \frac{ds}{dx}(x) \right| < \varepsilon.$$

Os infinitésimos e infinitamente grandes são erradicados da Matemática; cem anos depois de Weierstrass, nenhum texto sério de Análise os refere. Até dos nomes das cadeiras universitárias de Análise o adjectivo "Infinitesimal" está hoje banido (ao contrário do que acontecia há 20 anos).

No entanto... quase apetece dizer, inspirando-nos em Galileu, "no entanto eles existem"! A tradição dos infinitésimos manteve-se – não no campo dos matemáticos (o rigor não o permitiria) – mas no campo dos *utilizadores da Matemática*. Físicos, matemáticos aplicados, engenheiros continuam a pensar "como se" eles existissem. Ouçamos por exemplo Feynman nas suas *Lectures*

*on Physics*: "Any volume can be thought of as completely made up of truncated cones. The flux of  $E$  from one end of each conical segment is equal and opposite to the flux from the other end. The total flux from the surface  $S$  is therefore zero". Feynman demonstra a Lei de Gauss da Electrostática com elementos de volume infinitesimais. E funciona!

Este fenómeno continua a gerar uma tensão permanente entre matemáticos puros, por um lado, e físicos, matemáticos aplicados e engenheiros, por outro. Os primeiros acusam os segundos de falta de rigor nos seus raciocínios "à século XVIII", censurando-os por não utilizarem argumentos  $\epsilon$ - $\delta$  à la Weierstrass. Os mais radicais chegam a falar de laxismo intelectual. Os segundos acusam os primeiros de não olharem para o mundo real. Os argumentos infinitesimais *funcionam e dão sempre o resultado correcto, desde que bem aplicados!* O que interessa se não temos a bênção da irmandade matemática para os utilizar? Os fenómenos físicos são demasiado complexos; temos de pensar neles com intuição, tentando compreender o que se passa, e não perdermo-nos num oceano de  $\delta$ 's e  $\epsilon$ 's. Os mais radicais chegam a falar de pedantismo intelectual.

É uma pena que estas duas comunidades vivam de costas voltadas uma para a outra. Esta discussão é completamente estéril. Desde os anos 60 do século passado que os infinitesimais e os infinitamente grandes estão de regresso à Matemática – e desta vez pela porta grande, satisfazendo todos os requisitos do rigor matemático. Esta porta foi aberta pelo matemático Abraham Robinson.



Fig.1. Abraham Robinson.

Robinson, um brilhante lógico matemático, tinha estudado Engenharia na sua juventude. Durante a Segunda Guerra Mundial, trabalhou na indústria aeronáutica inglesa. Talvez daí tenha vindo a sua convicção acerca da validade dos raciocínios envolvendo infinitesimais; há, no campo da aeronáutica, uma enorme tradição no uso destes conceitos – por exemplo, a noção de camada-limite, usada no estudo e projecto das asas dos aviões. Nos anos 60, nos Estados Unidos, Robinson criou a Análise Não-Standard – disciplina na intersecção entre a Lógica Matemática e a Análise que se debruça sobre a construção e o uso de estruturas matemáticas com propriedades que se prestam, por exemplo, à fundamentação da Análise Infinitesimal. No seu livro "Non-Standard Analysis", Robinson responde a todas as objecções de Berkeley através da criação de uma estrutura – os números hiper-reais, cujo conjunto é designado por  ${}^*\mathbb{R}$  – que é uma extensão da estrutura dos números reais  $\mathbb{R}$ . Ao contrário de  $\mathbb{R}$ ,  ${}^*\mathbb{R}$ , possui infinitesimais: um número hiper-real  $h$  diz-se infinitesimal se  $|h| < r$ , para qualquer número real  $r$ .

Tendo definido este novo conjunto dos hiper-reais, põe-se então a questão: como operar com estes números? Sendo  $h$  um infinitesimal, poderemos falar em  $2h$ ,  $h+h$ , ou mesmo  $\sin(x+h)$ ? Sim! Na construção da estrutura dos hiper-reais, as operações unárias (como o simétrico e o inverso) e binárias (soma, subtracção, etc.), bem como todas as funções reais de variável real (como o seno, exponencial, logaritmo, etc.), ou os subconjuntos de  $\mathbb{R}$  (como, por exemplo, o conjunto dos números naturais,  $\mathbb{N}$ , ou o dos inteiros,  $\mathbb{Z}$ ) podem ser prolongados por extensão a  ${}^*\mathbb{R}$ , mantendo todas as propriedades de primeira ordem da estrutura de  $\mathbb{R}$ . Por exemplo, em  $\mathbb{R}$  é válida a propriedade da existência de inverso:

"para qualquer  $x$  em  $\mathbb{R}$  que não 0, existe um único  $y$  em  $\mathbb{R}$  tal que  $xy = 1$ ".

Por isso, essa mesma propriedade permanece válida em  ${}^*\mathbb{R}$ . Em particular, os infinitesimais têm inversos: se  $h$  for infinitesimal,  $1/h$  é infinitamente grande, no sentido em que  $|1/h| > 0$  para qualquer número real  $r$ . Se um número hiper-real não for infinitamente grande, diz-se finito.

Diz-se assim que as propriedades de primeira ordem são *transferidas* para  ${}^*\mathbb{R}$ . Resta então saber o que são propriedades de primeira ordem. Se repararmos no exemplo anterior, verificamos que as variáveis só tomam valores numéricos. As propriedades de  $\mathbb{R}$  cujo enunciado é do tipo "para qualquer função real de variável real  $f$ , ..." (aqui a

variável toma valores no conjunto de todas as funções), ou do tipo "para qualquer subconjunto  $A$  de  $\mathbb{R}$ , ..." não são de primeira ordem, e por isso não são transferidas. E, como boa parte da Matemática é efectivamente construída partindo dos números e caminhando por aí acima, isto é quanto basta!

Para obter então a definição correcta de derivada no Cálculo Infinitesimal, comecemos por definir a relação "infinitamente próximo" da forma óbvia:  $x, y$  em  ${}^*\mathbb{R}$  dizem-se infinitamente próximos se  $|x-y|$  for infinitesimal, escrevendo-se então  $x \approx y$ . Prova-se facilmente que se um hiper-real  $x$  é finito, existe então um único real  $r$  tal que  $x \approx r$ . Este real toma o nome de *parte standard* de  $x$  ou, abreviadamente,  $r = st(x)$

De um ponto de vista intuitivo, tudo se passa como se em  ${}^*\mathbb{R}$  cada número real  $r$  estivesse rodeado por um "halo" de infinitésimos indistinguíveis de 0 a qualquer escala finita. Robinson chama a este halo a "mónada de  $r$ ", em honra de Leibniz: afinal, as suas intuições sobre a natureza dos infinitésimos eram, 300 anos depois, colocadas numa base perfeitamente rigorosa. De forma análoga, definem-se na recta hiper-real diferentes "galáxias" que possuem apenas números a distâncias finitas uns dos outros. Por exemplo, a chamada *galáxia principal* de  ${}^*\mathbb{R}$  corresponde a todos os hiper-reais a distância finita de 0, ou seja, é constituída pelas mónadas de todos os números reais. Cada ordem de grandeza infinitamente grande é também representável por uma galáxia.

Regressando então ao nosso exemplo, podemos dizer que a velocidade instantânea é dada por

$$v(t) = st\left(\frac{s(t+h) - s(t)}{h}\right)$$

para qualquer  $h \neq 0$ . Mais genericamente, uma função real de variável real diz-se diferenciável em  $x$  com derivada  $df/dx$  se

$$\frac{df}{dx} = st\left(\frac{f(x+h) - f(x)}{h}\right)$$

der o mesmo resultado, qualquer que seja o acréscimo infinitesimal  $h \neq 0$ .

No estudo de problemas envolvendo conexões entre o discreto e o contínuo assumem enorme importância as extensões não-standard do conjunto dos números naturais – o conjunto dos naturais não-standard,  ${}^*\mathbb{N}$  – e do conjunto dos números inteiros – o conjunto dos

hiper-inteiros,  ${}^*\mathbb{Z}$ . Ao contrário de  $\mathbb{Z}$ , o conjunto dos hiper-inteiros contém inteiros infinitamente grandes positivos e negativos, que podem ser usados para construir somas hiper-finitas. Neste contexto, o integral define-se formalmente tal como aquilo que é nas mentes de quem trabalha com ele: a parte standard de uma soma (hiper-finita).

Outra aplicação importante é na construção de soluções de equações diferenciais. Considere-se a equação de Laplace

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 & , \text{ em } D \\ u(x,y) = g(x,y) & , \text{ na fronteira de } D \end{cases}$$

Se  $D$  for um subconjunto do plano (limitado e aberto), a solução deste problema descreve a distribuição estacionária de temperatura,  $u(x,y)$ , numa placa representada por  $D$ , sendo a temperatura na fronteira  $g(x,y)$ . Para construir (matematicamente!) a solução deste problema usando a nossa intuição física consideremos  $D$  dividido em células quadradas de lado infinitesimal,  $h$ . Para simplificar, consideremos o caso simples que corresponde a  $D$  ser o quadrado  $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$  (Fig. 2). Seja  $N > 0$  um hiper-inteiro infinitamente grande e  $h = 1/N \neq 0$ . Considerando os pontos  $x_i = ih$  (para  $i$  entre 0 e  $N$ ) e  $y_j = jh$  (para  $j$  também entre 0 e  $N$ ), e traçando todas as rectas verticais e horizontais passando nesses pontos, obtém-se uma decomposição de  $D$  em  $N^2$  células infinitesimais quadradas de lado  $h$ . Chamemos célula  $(i,j)$  à célula cujo canto inferior direito é  $x_i, y_j$ . Seja  $u_{i,j}$  a temperatura da célula  $(i,j)$ . Substituindo as derivadas parciais envolvidas na equação pelas razões incrementais correspondentes, o operador laplaciano é substituído pela sua discretização. Obtemos assim o problema discreto.

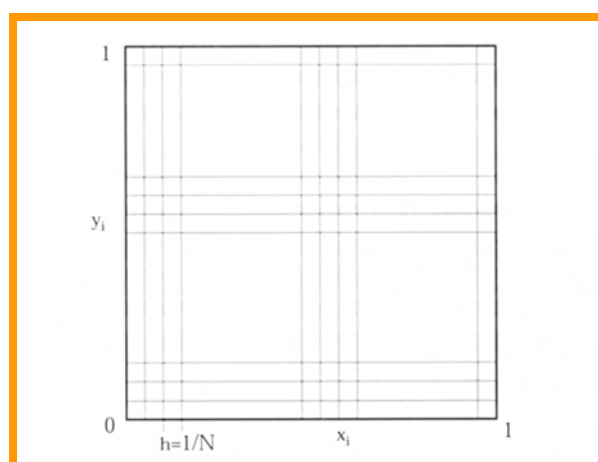


Fig.2. Célula quadrada para a discretização da equação de Laplace.

$$\begin{cases} U_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} + U_{i-1,j} + U_{i,j+1} + U_{i,j-1}}{4} & \text{para células interiores;} \\ U_{i,j} = G_{i,j} & \text{para células fronteiras.} \end{cases}$$

Isto é nem mais nem menos do que um sistema linear de  $N^2$  equações a  $N^2$  incógnitas! Quanto à equação que substitui a equação de Laplace, ela estabelece apenas que a temperatura na célula  $(i,j)$  é igual à média das temperaturas das quatro células vizinhas. Como consequência imediata desta observação quase infantil, obtém-se o *princípio do máximo*: o máximo (e o mínimo) dos valores de temperatura ocorre obrigatoriamente em pelo menos uma célula fronteira. Usando este princípio, demonstra-se que o problema discreto tem uma única solução. A partir dessa solução, podemos definir um candidato à solução do problema contínuo original por  $u(x, y) = (U_{i,j})$ . Usando algumas consequências do princípio do máximo, é possível provar que esta função  $u$  está bem definida, é indefinidamente diferenciável em  $D$ , e satisfaz o problema original. Ou seja, tudo o que um físico precisa de saber sobre uma equação antes de a tentar resolver mas tem medo de perguntar a matemáticos!

Observe-se como, nesta abordagem, se inverte completamente a relação tradicional entre o discreto e o contínuo. Normalmente, a discretização de uma equação diferencial é uma aproximação à equação realizada com o objectivo de a estudar numericamente, na esperança de que a respectiva solução seja "próxima" da da equação diferencial parcial. Aqui, a equação às diferenças hiperfinitas é o objecto essencial, e a equação diferencial parcial apenas o seu análogo contínuo. O argumento acima mostra que a solução da equação do cimo da página é independente da escala  $h=1/N$  infinitamente pequena que se tome. E é isto que torna a solução  $u$  um invariante do problema, o que, além de garantir a existência de solução única do problema contínuo, dá o devido significado a esse mesmo problema: o de representar todos os problemas hiperfinitos descritos, a *qualquer* escala infinitesimal.

A Análise não-standard é hoje muito mais do que uma curiosa justificação a *posteriori* de Leibniz. Em primeiro lugar, é possível reconstruir qualquer área da Matemática "standard" com o seu análogo não-standard à custa do Princípio de Transferência. Isso mesmo foi feito em áreas como a Geometria, a Análise Funcional ou a Topologia.

Em segundo lugar, a Análise não-standard tem enormes virtudes de transparência e intuição. Um resultado mate-

mático raramente se descobre justapondo cuidadosamente todos os passos de uma demonstração até chegar ao teorema. Normalmente, é necessário utilizar argumentos intuitivos ou heurísticos para formular uma conjectura, que depois nos esforçaremos por demonstrar – muitas vezes com argumentos indirectos. Ora, a Análise não-standard permite por natureza utilizar argumentos provenientes da intuição física e encurtar demonstrações podendo constituir, tal como no século XVIII, uma ferramenta extraordinária para a descoberta de Matemática nova.

Dois exemplos paradigmáticos são a demonstração de um famoso problema em aberto da Teoria de Operadores, nos anos 60, por Robinson e Bernstein, e a *descoberta de canards* em equações diferenciais nos anos 80. Estes resultados foram depois redemonstrados com Matemática standard; mas a sua descoberta foi não-standard. Hoje em dia, um tópico quente de aplicação da Análise não-standard é a relação entre as Geometrias discreta e contínua.

Um breve comentário final. Por que é que a Análise não-standard tem 40 anos e ainda hoje é quase desconhecida por potenciais utilizadores e quase nunca utilizada pela comunidade matemática? A resposta é complexa, mas está sem dúvida relacionada com o cepticismo da comunidade científica. Notemos que este cepticismo é muito necessário, pois permite a depuração de erros; mas implica também uma grande inércia na aceitação de novas ideias, forçando-as a provar a sua utilidade de forma incontestável. A Análise *à la Weierstrass* demorou cerca de um século a erradicar os infinitésimos. Talvez a Análise *à la Robinson* demore outro século... a reabilitá-los.

## O que é o Eames Office



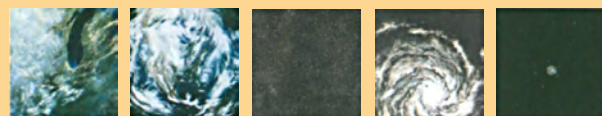
No início de tudo havia o interesse pela ciência de um casal de arquitectos e "designers" norte-americanos, os Eames. Contemporâneos do enorme desenvolvimento e interesse público pela ciência, nos anos 70, ficaram fascinados pelas escalas e pelas quase infinitas possibilidades de exploração do tema. A expressão inicial dessa curiosidade foi, já no final daquela década, um vídeo que dá a conhecer as várias escalas, a partir do homem, em direcção ao infinitamente grande e ao infinitamente pequeno. O êxito do filme foi tal que encorajou o casal a desenvolver outros produtos similares, e assim surge, em 1982, um livro sobre o mesmo assunto, que conhece agora a sua edição portuguesa (Porto Editora). Há dois anos atrás surgiu também um CD-ROM sobre a mesma temática, que estará também disponível no âmbito da exposição da Fundação Calouste Gulbenkian, onde poderá ser explorado pelos visitantes.

Demetrios Eames, neto do casal e seu herdeiro material e espiritual, deu seguimento ao projecto. Uma empresa explora, assim, o património gerado e, em especial, uma exposição que mostra o mundo às várias escalas tendo como centro o homem – até às galáxias e aos limites do universo conhecido (grandes escalas), por um lado, e até ao núcleo do átomo de carbono (pequenas escalas), por outro. São as 44 imagens e respectivos textos que constituem o "núcleo" da exposição patente ao público nas instalações da Gulbenkian. Esta é a primeira vez que a exposição do Eames Office se apresenta fora de um país de língua inglesa.

CARLOS PESSOA  
gazeta@teor.fis.uc.pt



## Uma Visita Guiada à Exposição



Comece na nossa escala, a **Dimensão Humana**. Sinta a força que emana das máscaras evocadoras dos espíritos e reflecta sobre os efeitos de escala no desenvolvimento do homem.

Veja depois o filme das **Potências de Dez no espaço** – uma sucessão continua dos cenários do Mundo ao longo de uma viagem em linha recta, desde o interior de um átomo de carbono, por baixo da pele de um homem que dorme ao sol, até às fronteiras do cosmos mais longínquas que conhecemos.

Percorra então o corredor e observe os painéis, que são as paisagens em cada "estação" dessa viagem. Poderá explorar as grandes dimensões começando pelas **Escalas da Terra** para observar o chão que pisamos, à escala da cidade, do país ou do próprio planeta, seguindo depois por uma visita à **Sala Cósmica**, onde encontrará os planetas do sistema solar, poderá medir a distância às estrelas ou contemplar as galáxias do Grupo Local. Explore em seguida as dimensões do muito pequeno. Visite a **Casa do Nano** e observe os movimentos das moléculas da água ou mergulhe no invisível até à estrutura atómica. Entre de seguida **Dentro do Átomo** e descubra o coração da matéria até aos limites do que já foi possível conhecer.

Depois de tomar consciência das **Escalas do Tempo**, vendo o filme **Potências de Dez no tempo**, viaje desde os dias de hoje até às origens do mundo, através de objectos que testemunham a nossa história. Aprecie depois a peça de Fernando Lanhas, "**O quadro das grandezas físicas**", entretenha-se a explorar o CD-Rom "Powers of Ten" e, finalmente, deleite-se com a maneira como os mais jovens vêem o muito grande e o muito pequeno.

Do infinitamente grande ao infinitamente pequeno tendo como elemento mediador o homem: este é o fio condutor da exposição "Potências de 10 — o mundo às várias escalas", patente ao público de 21 de Fevereiro a 26 de Maio na Fundação Calouste Gulbenkian, em Lisboa. A partir de um projecto inicialmente apresentado por uma empresa norte-americana, Ana Maria Eiró e Carlos Matos Ferreira, físicos e professores universitários, aceitaram o desafio de dar corpo e conteúdo a esta viagem pelo mundo da ciência e do conhecimento. Porquê e como, é o que aceitaram revelar à "Gazeta" nesta entrevista, onde explicam também o que está à espera do visitante deste importante acontecimento do ano científico português.

Entrevistados por:  
CARLOS PESSOA  
gazeta@teor.fis.us.pt

Ana Maria Eiró e Carlos Matos Ferreira, comissários da

## OBSERVAR O MUNDO A

*Gazeta de Física — Como surgiu a ideia de realizar esta exposição?*

Ana Maria Eiró — A ideia surgiu na sequência de um contacto feito pela Eames Office, uma empresa norte-americana sediada em Los Angeles, junto da Fundação Gulbenkian para saber do interesse desta num pacote expositivo sobre o tema das "Potências de 10". A Fundação, através do Serviço de Ciência, decidiu celebrar um contrato com aquela instituição e assim nasceu este projecto.

Carlos Matos Ferreira — A ideia de base da exposição é muito simples mas genial. Tendo como ponto de partida a escala do homem, as imagens são construídas de forma muito engenhosa, ao longo de uma linha que segue em direcção ao infinitamente grande e depois, passando de novo pelo homem, até ao infinitamente pequeno. Um aspecto muito interessante de todo o material produzido pela Eames Office é que os textos de acompanhamento das imagens são atravessados por uma certa profundidade filosófica que remete para uma certa concepção do mundo, procurando transmitir uma imagem de beleza e harmonia na criação. Ou seja, procura-se relacionar as imagens físicas do mundo, tal como o vemos, com as grandes ideologias da dualidade e os grandes períodos históricos.

*P. — Propondo uma cosmovisão...*

CMF — Exactamente. É evidente em todo o material a preocupação de transmitir uma mensagem, o que proporciona incursões curiosíssimas no terreno da filosofia e

Exposição

## PARTIR DO HOMEM



do pensamento, das culturas e das religiões, a Leste e a Oeste. Por isso, pode dizer-se que o tema desta exposição não se confina ao mundo da ciência, alargando-se ao mundo do pensamento e das ideias...

P. — E tendo o homem no centro de tudo?...

AME — Digamos que ele é o ponto de partida, o local de onde se observa o mundo. É a nossa escala e também a referência. Como é ele quem pensa e aprofunda, fica assim feita a ligação da ciência com a estética e a sensibilidade, na enorme ambição de compreender. Por isso, será sem dúvida muito interessante para o cidadão comum ter consciência de que a janela dos nossos sentidos é muito estreita, e que aquilo que sensorialmente somos capazes de perceber apenas abarca três ou quatro escalas.

CMF — É o homem que constrói o telescópio, é o homem que constrói o microscópio, é ele que faz a teoria onde não se vê mas se concebe – nunca ninguém viu um protão... É ele, em suma, que faz as escalas.

P. — Como vai ser apresentada a exposição?

AME — Uma exposição com este tema não podia resumir-se aos 44 painéis cedidos pela Eames Office e ao filme mostrado. A ideia é, como se disse, fantástica, mas a verdade é que estava tudo por fazer se pensarmos no espaço pensado para o projecto. É assim que surge o desafio da Fundação para comissariarmos a exposição.

CMF — Era para nós evidente que o material existente não tinha dignidade, por si só, para ser mostrado numa instituição com a tradição da Gulbenkian. Por isso, o nosso objectivo não foi exactamente "alargar" a exposição. O mote era excelente e devia ser glosado de modo a podermos apresentar uma grande exposição de ciência contemporânea. Foi essa a nossa ideia de base.

AME — À excepção de uma grande exposição sobre instrumentos científicos do Museu de Física de Coimbra, que esteve na Europália, não houve exposições científicas na Fundação Gulbenkian. As pessoas que visitam a Gulbenkian são cultas e exigentes, mas estão mais "habitadas" às artes do que às ciências. Por isso, o desafio é

enorme e redobra a nossa responsabilidade no esforço de tentar captar a sensibilidade desse público para os aspectos científicos do nosso mundo.

**P. — Como estão organizados os conteúdos no espaço da exposição?**

AME — Procurámos conceber uma organização do espaço de forma a ajudar o visitante a contextualizar aquelas escalas. Uma imagem de galáxias, por exemplo, precisa de mais qualquer coisa do que dá-las a ver simplesmente. Além disso, quisemos ligar aquilo que é dado a ver com o trabalho de grupos de investigação portugueses. Finalmente, preocupámo-nos com a organização espacial dos conteúdos de forma "artística", trazendo nomeadamente à exposição uma interessantíssima peça de um artista português, o arquitecto Fernando Lanhas, sobre as grandezas físicas, que esteve exposta no Museu de Serralves há pouco tempo.

CMF — Além dos painéis que fazem parte do percurso, existem em certas escalas uma espécie de ramificações, a que chamámos módulos expositivos. São salas onde essa escala é mais explorada, de forma a poderem estar nela representadas várias ciências. É aí que procuramos igualmente mostrar contribuições portuguesas.

**P. — Quantos são os módulos?**

AME — Nós começamos por caracterizar a escala do zero – o metro –, que é a escala do homem. Mas como tivemos a preocupação de não pôr na exposição só física mas contemplar ciências diferentes, é um módulo de entrada ligado à antropologia. A partir desta sala de entrada há um percurso onde estarão os painéis e dois módulos expositivos no sentido das escalas crescentes outros dois para as escalas decrescentes.

O primeiro chama-se "A escala da Terra: o chão que pisamos" e a ideia é percorrer a cidade, o país e o planeta.

O segundo percorre as potências mais elevadas, é a "Sala Cósmica". A ideia é, de novo, levar o visitante a tomar consciência do que existe para além da Terra – os planetas, as estrelas e as galáxias.

Na escala descendente, existe a "Casa do Nano", onde se penetra na matéria até ao nanometro, para nos situarmos na dimensão das moléculas. O último módulo "entra" dentro do átomo, procurando dar uma ideia do seu conteúdo e do que se mede a uma escala tão pequena.

CMF — A concluir, há uma área que, ao contrário dos módulos anteriores, não percorre as escalas de espaço, mas de tempo. O que se propõe é um recuo no tempo em potências de 10, percebendo o que existe em cada uma dessas estações. Como é óbvio, o visitante entrará rapidamente na história, na geologia e nos primórdios da formação da Terra.

A perspectiva das escalas no tempo é diferente nas escalas do espaço, embora estejam relacionadas. No entanto, é claramente outro sistema de escalas a explorar e que tem uma imensa riqueza física por trás — é não só a escala de evolução do universo até aos nossos dias, mas também as escalas muito curtas, em que a matéria vai congelando os movimentos.

**P. — Que conteúdos foram pensados e seleccionados para o "miolo" de cada módulo?**

CMF — Propositadamente, não quisemos dar uma massa de informação enorme, mas ter em cada módulo dois ou três objectos que sejam visualmente interessantes e explicativos. Ou, se quiser, exemplares daquela escala. Há ainda vídeos projectados e textos curtos que situem a temática, mas sempre sem sobrecarregar, pois é muito fácil atingir a saturação. Um exemplo para se perceber do que estamos a falar: pareceu-nos interessante ter um grande modelo tridimensional de uma molécula. Vamos também ter um microscópio de varrimento com uma imagem em tempo real de uma amostra. Como é muito sensível, só estará disponível uma ou duas horas por dia, com o apoio de um assistente. Mas isso não será impeditivo de se ver o que ele proporciona, pois haverá projecções de filmes que mostram em diferido como é a estrutura da matéria vista através de microscópios electrónicos e outros.

AME — A informação que se pode dar em cada escala é muita e muito rica. Mas, paradoxalmente, é impossível passar muita informação. Por isso, é importante que quem visita a exposição se centre naquilo que lhe interessa mais.

**P. — O que mais tem a exposição a oferecer?**

AME — Há uma área reservada às crianças, onde estará exposta uma selecção dos trabalhos de um concurso escolar. Além disso, procuraremos ter algumas actividades para os mais novos, relacionadas com a medição e a dimensão, o grande e o pequeno. É esta iniciação ao processo científico que nós estamos interessados em passar para o público mais jovem.

**P. — Estão previstas actividades paralelas?**

CMF — Entendemos que devia haver um conjunto de colóquios, para o grande público interessado, com uma periodicidade semanal (terça-feira). Procurámos escolher um leque de pessoas que são, simultaneamente, bons comunicadores e bons cientistas – portanto, interessados pela divulgação científica –, abrangendo todos os temas articulados com as áreas da exposição, da física à matemática, da biologia à química, da estatística à geologia. Os animadores deste ciclo de colóquios são também os autores de um conjunto de artigos a publicar num número especial da "Gazeta de Física" [estes artigos formam o conteúdo essencial desta edição].





# POTÊNCIAS de DEZ o mundo às várias escalas

## Exposição

21 Fevereiro - 26 Maio 2002

Galeria de Exposições Temporárias da Sede



FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN  
Serviço de Ciência



A dimensão humana

As escalas da Terra: o chão que pisamos

O mundo das moléculas de água

Escalas de tempo

Descrevem-se aqui alguns dos módulos da exposição "Potências de Dez - o mundo às várias escalas".

"A dimensão humana" aborda a escala  $10^0$  m, "As escalas da Terra" as escalas  $10^4$  -  $10^6$  m, e o mundo das moléculas de água" as escalas  $10^9$  -  $10^9$  m. Finalmente, as "Escalas do tempo" passa em revista as escalas do tempo, começando por dias de hoje.

# NOTÍCIAS DO MUNDO A

## A DIMENSÃO HUMANA

*"O Homem é a medida de todas as coisas"*  
Protágoras

Um metro, ou  $10^0$  m (dez elevado a zero metros), é a nossa escala! É certamente a escala menos surpreendente, porque tem a dimensão de nós próprios, dos animais com que mais convivemos (cão, gato, etc.), dos objectos e situações do dia a dia, etc. É, por exemplo, a distância a que conversamos com alguém.

A nossa capacidade para lidar com a realidade que nos rodeia evoluiu na parte do mundo onde vivemos e não noutra. Nesse sentido ela está muito ligada às propriedades físicas da nossa região do Universo. Propriedades físicas, como o facto de um copo cair de uma mesa e partir-se, só existem em situações muito particulares no Universo, isto é, num planeta com uma certa gravidade à superfície. Sabemos que ocorrerão de forma diferente em planetas diferentes. Para conseguirmos viver, o nosso organismo evoluiu no sentido de possuir capacidades que nos permitem interagir no mundo à nossa escala.

A nossa percepção pode enganar-nos, porque fazemos uma apreciação dos fenómenos a partir da forma como os vemos e percebemos à nossa escala. A crença de que o Sol roda em torno da Terra deriva da mais pura intuição, pois é isso que os nossos olhos testemunham. Mas a Natureza, que é natural aos nossos olhos, não é tão natural assim [1]. A frase de Protágoras justifica-se porque nós vemos, percebemos e interpretamos os fe-

# VÁRIAS ESCALAS

nómenos do mundo que nos rodeia à nossa dimensão. Contudo, o que percebemos perto de nós é apenas um fragmento, muitas vezes ilusório, de uma realidade vasta e complexa.

À nossa dimensão, em muitos aspectos que influenciam directamente as nossas vidas, a escala tem uma enorme importância. É isso que procurarei mostrar, através de três exemplos.

## A escala na construção de um ser humano

A escala é essencial no funcionamento de um organismo. A taxa metabólica e o consumo energético variam muito com o tamanho. Nos mamíferos terrestres, a relação entre a energia consumida na locomoção ( $E$ ) e o peso corporal ( $W$ ) é  $E = 0,533 \times W^{-0,316}$ . O expoente negativo significa que os animais maiores são mais eficientes na locomoção terrestre do que os animais menores.

O desenvolvimento de um ser vivo ocorre através de mudanças de proporções das várias partes do corpo, resultantes de variações das suas taxas de crescimento. Se umas partes crescerem mais rapidamente do que outras, as suas proporções alteram-se. Os cientistas chamam "alometria" a essas variações. Contrariamente ao que se poderia pensar, esse tipo de modificações é muito frequente e tanto se pode observar no desenvolvimento de um organismo, à escala da vida de um organismo, como ao longo da evolução de várias espécies, à escala do tempo evolutivo.

As relações alométricas são também importantes na configuração física dos

organismos. Certas histórias de ficção, que nos mostram uma invasão de insectos gigantes, que teriam resistido a uma guerra nuclear e sofrido mutações que os tornaram enormes, são pura e simplesmente impossíveis. Um mosquito gigante que pesasse 200 kg nunca se aguentaria nas suas patas gigantes, mas demasiado finas. Por isso nunca veremos elefantes com patas de gazela. Mesmo que essa mutação ocorresse, o organismo resultante não seria viável.

Na nossa espécie, o crescimento do cérebro, e do crânio que o contém, ocorre a uma taxa mais elevada do que o crescimento do resto do corpo, durante o período de desenvolvimento embrionário, isto é, nos primeiros três meses de gestação. Essa relação entre as taxas de crescimento da cabeça e do corpo inverte-se a partir daí, passando o corpo a crescer mais depressa do que a cabeça. À nascença, um feto possui uma cabeça relativamente grande, ligada a um corpo de tamanho médio, com pernas e pés diminutos. Os bebés são muito "cabecudos", já que têm cabeças proporcionalmente maiores do que os adultos relativamente ao resto do corpo. Como o crescimento diferencial se mantém, o corpo e os membros vão crescer mais rapidamente do que a cabeça, o que faz com que o tamanho relativo da cabeça diminua. Esta tendência mantém-se até à idade adulta. As mudanças alométricas ocorrem na própria cabeça, em que os olhos grandes, a testa grande e arredondada, num crânio bulboso e a boca pequena dão lugar a uma configuração mais longilínea, com olhos proporcionalmente mais pequenos, uma testa menor e uma mandíbula muito mais proeminente. Os olhos não crescem, praticamente, pelo que o seu tamanho relativo decresce de forma acentuada.

A nossa psicologia evoluiu no sentido de os traços infantis invocarem sentimentos de afecto e simpatia [2]. Assim, formas que se aproximem das proporções de um bebé são-nos mais agradáveis. Essas preferências são susceptíveis de serem exploradas, na publicidade ou na indústria de

diversões. Um exemplo clássico é o da "evolução" da fisionomia do rato Mickey, um dos símbolos essenciais da Disney, que o biólogo norte-americano Stephen Jay Gould descreveu de forma exemplar [3]. Walt Disney foi mudando, ao longo dos anos, a forma do seu herói mais famoso até lhe dar um aspecto mais infantil (Fig. 1), em que os olhos e a cabeça assumiram proporções maiores relativamente ao corpo: trata-se de um processo evolutivo designado por neotenia. Essa "evolução" foi tornando o rato Mickey mais simpático aos nossos olhos, facilitando a adesão à sua imagem. De resto, a infantilização das figuras relativamente às quais se pretende obter uma vinculação positiva é generalizada. Se experimentarmos medir a relação tamanho da cabeça/tamanho do corpo em vários heróis de banda desenhada, particularmente dirigidos a crianças, como a Mônica, ou as personagens da Rua Sésamo, verificaremos que essa relação se aproxima da que encontramos nos bebés. Inversamente, se à figura se pretende associar uma imagem antipática ou agressiva, o valor da relação cabeça/corpo diminui, ficando a figura mais adulta.



Fig.1. A evolução do Rato Mickey para proporções mais infantis foi acompanhada pela representação de figuras da banda desenhada infantil, como a Mônica ou o Egas, apresentando cabeça e olhos desproporcionalmente grandes para o corpo que os suporta.

As variações das proporções da forma humana nas várias idades da vida foram um assunto de reflexão para os mestres da pintura que pintaram formas humanas reconhecíveis. Mestres como o italiano Leonardo da Vinci ou o alemão

Albrecht Dürer produziram autênticos tratados sobre as proporções do corpo humano e a sua variação entre crianças e adultos, tanto para homens como para mulheres. Dürer afirmou que a mulher tem 17/18 da altura de um homem, ou seja 0,943, que é um valor muito próximo do que o antropólogo inglês do século XIX, Francis Galton, encontrou e corresponde aos valores actuais (0,926). Mas, foi o pintor alemão Johann Bergmüller quem formulou, pela primeira vez (em 1723), uma lei geométrica do crescimento de uma criança, que ilustrou com belíssimos desenhos.

#### A escala como "instrumento" da evolução

As variações alométricas no decurso da evolução das espécies constituem um processo recorrente, designado por heterocronia. Por vezes, dá-se a retenção de alguns traços infantis no estado adulto, noutros casos uma aceleração no sentido do adulto, exagerando certos traços anteriores. Noutros casos ainda, alteram-se as proporções para surgir uma cauda maior ou fazê-la desaparecer. A natureza é económica. A evolução procede não como um engenheiro criando coisas completamente novas, mas adaptando o material pré-existente, como um "bricoleur", para usar a expressão do biólogo francês François Jacob [4]. Muitas mudanças evolutivas na forma dos organismos resultam de ligeiras modificações nas taxas de crescimento das várias partes do corpo. Por exemplo, o biólogo D'Arcy Thompson sugeriu e David Raup demonstrou [5, 6] que é possível descrever todas as formas de conchas produzidas pelos moluscos através da variação de apenas três parâmetros.

Esses efeitos de heterocronia resultam, por exemplo, de uma acção mais ou menos prolongada de determinados genes, durante o processo de desenvolvimento. Uma pequena diferença na taxa de crescimento, continuada ao longo de um intervalo de tempo suficiente, pode produzir um resultado final bastante diferente. A nossa espécie partilha noventa e oito por cento da informação genética com os chimpanzés, os nossos parentes

mais próximos, o que significa que o que nos diferencia deles reside apenas em dois por cento do nosso DNA. Contudo, somos fisicamente bastante diferentes. E isso resulta, em parte, das pequenas alterações nas trajectórias de desenvolvimento que se vão ampliando à medida que o organismo se desenvolve. Assim, não surpreende que os fetos das duas espécies sejam bastante mais parecidos do que os respectivos adultos. As trajectórias divergentes das duas espécies são particularmente visíveis no desenvolvimento do crânio.

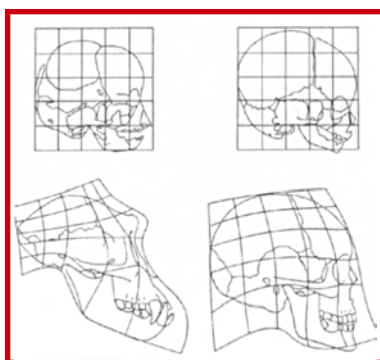


Fig.2. Os diagramas representam, de cima para baixo, os estádios de feto e adulto nos chimpanzés e nos humanos. A grelha apresenta-se deformada, em baixo, para melhor representar as variações de proporção entre as diversas partes do crânio.

A Fig. 2 representa o efeito da neotenia na evolução do crânio humano, por comparação com o do chimpanzé. As transformações sofridas do feto a adulto no chimpanzé são muito maiores do que nos humanos. Em ambas as espécies, a forma adulta apresenta uma redução da calote craniana e um aumento acentuado da parte inferior da face. Mas verifica-se uma desaceleração da transformação na forma adulta na espécie humana, atingindo-se o estado adulto com traços juvenis, por comparação com os outros antropóides. Essa modificação possibilitou, entre outras, a evolução de uma capacidade craniana de 1400 cm<sup>3</sup>, o que contrasta com os menos de 500 cm<sup>3</sup> dos chimpanzés. Se mantivéssemos a mesma taxa de crescimento do crânio dos restantes primatas, para um peso corporal médio de 60 kg, o nosso cérebro pesaria 460 g em vez de 1300 g, que é o que efectivamente pesa em média.

#### Os efeitos sociais das escalas

A mudança de escala tem efeitos muito importantes na nossa percepção da realidade. De facto, o exagero de certas formas e tamanhos tem efeitos significativos sobre os nossos sentidos. Por exemplo, as máscaras estão presentes em quase todas as culturas desde tempos muito remotos. A sua simbologia tem desafiado a capacidade de interpretação de gerações de antropólogos. Parece, contudo, inegável que, para lá de visarem ocultar a identidade, ou criar uma outra identidade, elas têm também como função causar emoções fortes. Uma escala maior suscita um efeito sobre-humano, por vezes mesmo assustador, nomeadamente ao exhibir olhos e boca muito aumentados. Por vezes é o tamanho de todo o indivíduo que se modifica, quer deslocando-se sobre andas, quer usando cabeças enormes, como os gigantones das festas carnavalescas que existem em várias culturas. Noutros casos, ocorre uma redução de tamanho, como nas famosas caveiras de açúcar das festas mexicanas. Podem também provocar-se emoções fortes através do exagero das expressões faciais, um efeito bem conhecido no teatro tradicional japonês Kabuki. A representação dos espíritos em muitas culturas tradicionais, feita por meio de máscaras, envolve a mudança do tamanho e das proporções, o que perturba e intimida.

Nós próprios, membros da cultura ocidental, dita racionalista, não deixamos de nos sentir impressionados pelas expressões de alguns desses objectos, mesmo quando apresentados fora do seu contexto normal.



Fig.3. Desenho do riscador Joaquim José Codina, que acompanhou o naturalista Alexandre Rodrigues Ferreira, na "Viagem philosophica" à Amazónia (1783-1792), representando dois índios da tribo Jurupixuna, em trajes cerimoniais, envergando máscaras sobre as cabeças.

PAULO GAMA MOTA

Departamento de Antropologia da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
fgmota@pop.ci.uc.pt

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Wolpert, L.1993. The (Un)natural Nature of Science. Harvard University Press.
- [2] Chalmers, N.1983. The development of social relationships. In Animal Behaviour. 3. Genes and development (Eds., T. R. Halliday and P. J. B. Slater). Blackwell Scientific Publications.
- [3] Gould, S.J.2000. O Polegar do Panda. Gradiva.
- [4] Jacob, F. 1985. O Logo dos Possíveis. Gradiva.
- [5] Thompson, D. 1917. On Growth and Form. Cambridge University Press, Cambridge.
- [6] Dawkins, R.1999. A Escalada do Monte Improvável. Gradiva/Universidade de Aveiro.

#### AS ESCALAS DA TERRA: O CHÃO QUE PISAMOS

Convivemos dia-a-dia com objectos de variadas dimensões que cabem dentro da nossa percepção directa do mundo. São os objectos comuns que estão à nossa escala, é o chão que pisamos. Apreendemos as proporções das ruas, da cidade, do país ou da própria Terra vista do espaço, a partir de plantas e mapas, de fotografias aéreas e imagens de satélite (Fig. 1).



Fig.1. O estuário do rio Tejo numa imagem do satélite Landsat 5.

A consciência que temos do espaço está muitas vezes para além da percepção directa. Dentro do nosso bairro, para explicar por exemplo onde fica a farmácia, temos de usar papel e caneta para exprimir a relação espacial entre o sítio onde estamos e o local que queremos indicar. E o que acontece neste pedaço de papel? Crescemos várias ordens de grandeza até abrangermos vários quarteirões num só olhar.

Na primeira escala -  $10^0$  m -, cabe tudo aquilo com que nos relacionamos no dia a dia. Para os geólogos as rochas são objectos do quotidiano; em amostra de mão (pouco maiores que uma pedra de calçada) ou em pequenas lâminas, tão delgadas que se tornam transparentes para serem observadas ao microscópio. Não são objectos muito representativos da vivência da maior parte das pessoas, mas o conhecimento que temos da Natureza, da dinâmica e da evolução do nosso planeta é extraído essencialmente das rochas. Foi pelo seu estudo que, ao longo dos dois últimos séculos, se escreveu a História da Terra e da Vida, se identificaram recursos e se garantiu a segurança da instalação das grandes obras

de construção civil. Além do seu interesse económico ou das suas características geotécnicas, as rochas revelam-nos sempre grandes e antigos segredos. A Fundação Calouste Gulbenkian, por exemplo, está edificada sobre escoadas de lava que se formaram há cerca de  $7 \times 10^7$  anos, quando na região entre Lisboa e Mafra existiam vários vulcões em actividade (por exemplo em Manique e na Brandoa). Cerca de  $3 \times 10^7$  anos mais tarde, sob um clima subtropical, fortes enxurradas de sedimentos grosseiros cobriram grandes extensões destes basaltos dando origem ao Complexo de Benfica. Foi este o testemunho recolhido por sondagens na Avenida de Berna.

Ao longo das escalas  $10^1$ ,  $10^2$  e  $10^3$  m, vamos crescendo das dezenas aos milhares de metros e dominando sucessivamente uma rua ou um quarteirão; na última escala galgaríamos todo o nosso bairro num só passo. É este passeio de gigantes, ao longo da baixa de Lisboa, que procuramos proporcionar na exposição, exibindo duas maquetas do Museu da Cidade (escalas 1/500 e 1/1000). Saltamos do Castelo para o miradouro da Senhora do Monte, cruzamos para o de São Pedro de Alcântara, ou seguimos avenida acima, da beira rio ao Parque Eduardo VII. Recuámos porém mais de 60 anos, antes da rua da Ribeira das Naus ligar o Cais do Sodré ao Terreiro do Paço. Ainda podemos ver as Tercenas de D. Manuel, onde se construíram embarcações entre 1500 e 1939.

$10^4$  m é a escala de toda a cidade, e ao mesmo tempo o limite da percepção de um espaço humanizado. A resolução do nosso olhar deixa de alcançar o bulício dos bairros ou a harmonia dos jardins. Em menos de  $3 \text{ m}^2$  representa-se uma cidade pelos seus edifícios, ruas, colinas e pelas rochas que sustentam os nossos passos. A partir desta escala tudo são simples formas geométricas e manchas de cor planificadas.

Na escala  $10^5$  m já cabe todo um país. Podemos representar as características da população: como ocupa o território, o que produz, a localização dos seus recur-

tos naturais, o relevo e a variabilidade do clima. Representam-se os caminhos que nos conduzem ao longo da serenidade de um vale ou à conquista de uma montanha. Seleccionámos dois exemplos para esta exposição: o Anáglifo de Portugal Continental (isto é, o mapa tridimensional do relevo), publicado pelo Instituto Geográfico do Exército na escala 1/600000, e a Carta Geológica de Portugal na escala 1/500000, na 5ª edição, publicada pelo Instituto Geológico e Mineiro. Portugal foi, em 1876, um dos primeiros países a publicar uma Carta Geológica de todo o território continental. Essa 1ª edição obteve uma medalha na Exposição Internacional de Filadélfia. A 3ª edição da Carta Geológica de Portugal, publicada em 1899, foi uma vez mais distinguida com medalhas de ouro para os autores e um "Grande Prémio" para a instituição, na Exposição de Paris de 1900.

À distância da última escala,  $10^6$  m, alcançamos todo o planeta num só olhar. Planeta Terra ou Planeta Oceano?

É uma interrogação legítima quando vemos que 71% da sua superfície está coberta pelo oceano. De uma forma ou de outra, um Planeta Vivo. As imagens da Lua mostram-nos uma superfície coberta pelas crateras resultantes dos impactos de meteoritos, a maior parte dos quais ocorridos há milhares de milhões de anos. Na Terra, o calor proveniente do interior alimenta o vulcanismo e os processos da tectónica de placas, que vão continuamente criando novas ilhas e cadeias de montanhas (Fig. 2). Mas a energia do Sol também alimenta, permanentemente, os fenómenos atmosféricos, que conduzem à erosão das rochas, ao transporte e à deposição dos sedimentos, arrasando os relevos e preenchendo as depressões. É este balanço entre os processos da geodinâmica interna e externa que rejuvenesce diariamente a face da Terra e a torna um Planeta Vivo (Fig. 3).

Daqui em diante entraríamos noutras escalas, onde a Terra é apenas um entre incontáveis planetas, a Via Láctea é apenas mais uma entre tantas galáxias, onde as distâncias são difíceis de imaginar...



Fig. 2. Rochas dobradas durante a formação da cadeia de montanhas hercínica, há cerca de  $3 \times 10^8$  anos; SW alentejano (foto F. Ornelas - LATTEX/FCUL, Proj.GEOMODELS).

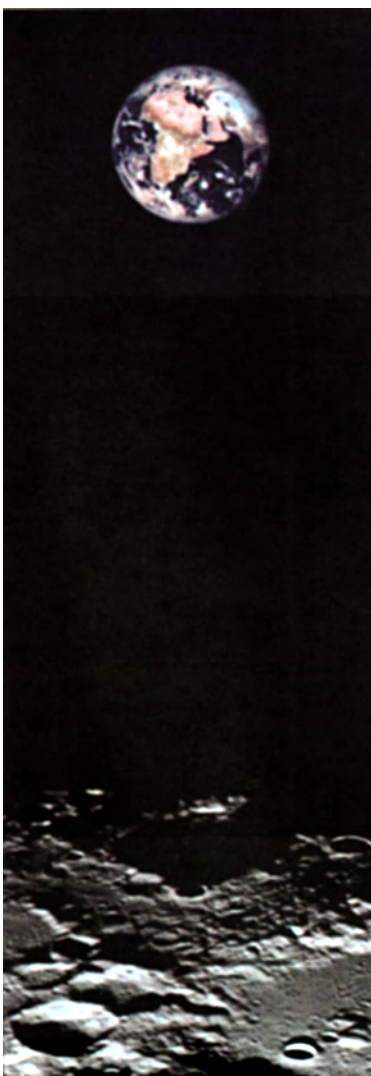


Fig.3. A Terra vista da Lua (foto NASA).

FRANCISCO FATELA  
Departamento de Geologia da Faculdade  
de Ciências da Universidade de Lisboa  
ffatela@fc.ul.pt

#### BIBLIOGRAFIA

Caron, J.M.; Gauthier, A.; Schaff, A.; Ulysse, J. & Wozniak, J. (1995) - *Comprendre et enseigner la planète Terre*. Ed. Ophrys, 3<sup>ème</sup> edition.

Levin, H.L. (1994) - *The Earth through Time*. Saunders College Publishing, 4<sup>th</sup> edition.

Rebelo, J.A. (2001) - *As Cartas Geológicas ao Serviço do Desenvolvimento*. Instituto Geológico e Mineiro.

Teixeira, C.; Pais, J. & Rocha, R. (1979) - *Quadros de Unidades Estratigráficas e da Estratigrafia Portuguesa*. Instituto Nacional de Investigação Científica.

## O MUNDO DAS MOLÉCULAS DE ÁGUA

A água é uma substância tão comum na Terra que muitas vezes não nos apercebemos da sua natureza única. Trata-se de um composto molecular cujas propriedades continuam a desafiar físicos e químicos. O seu estudo é importante em áreas como a nucleação em fase gasosa, fenómenos de catálise, a física e a química da atmosfera e o comportamento de soluções aquosas em Biologia e Química. É necessário, em qualquer um dos casos, que o comportamento da água seja bem compreendido ao nível molecular. Compreender os mecanismos que presidem às mudanças de estado, estudar o comportamento de agregados de água e descobrir e prever novas estruturas (como o gelo XII, que existe a altas pressões e a temperaturas Celsius negativas) são desafios que têm motivado intensa investigação. Simulações moleculares, mais simples ou mais sofisticadas, são essenciais nessa compreensão.

Por exemplo, o programa *Água Virtual*, foi desenvolvido no Centro de Física Computacional do Departamento de Física da Universidade de Coimbra, com o objectivo de ajudar estudantes a compreender as fases e transições de fase da água (Fig. 1). Neste programa é possível visualizar, por exemplo, na fase líquida, as estruturas tridimensionais de alguns agregados de moléculas (dímero, trímero e hexâmero, com, respectivamente, duas, três e seis moléculas) e, na fase sólida, estudar, para além da estrutura normal do gelo (Fig. 2), a estrutura do gelo XII (Fig. 3).

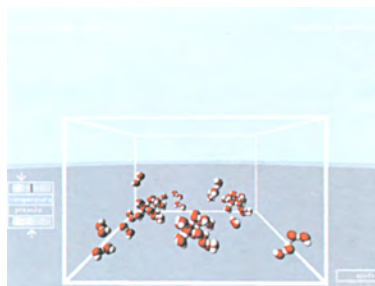


Fig. 1. A transição líquido – sólido no programa *Água Virtual*. Os comportamentos mais relevantes são a contínua perda de velocidade dos agregados moleculares e a formação de novas ligações de modo a emergir a estrutura do gelo.

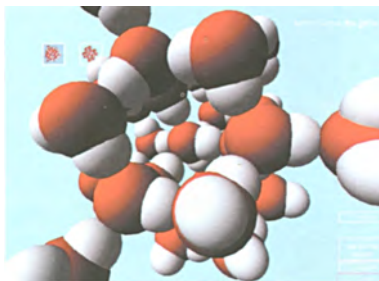


Fig. 2. A estrutura do gelo normal no programa *Água Virtual*.

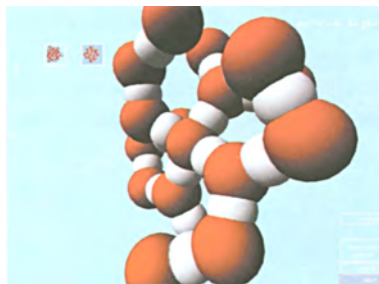


Fig. 3. A estrutura do gelo XII, uma estrutura tetragonal que existe na faixa de pressões de 0,2 GPa a 0,6 GPa ( $16\text{Pa} = 10^9$  pascal) e na gama de temperaturas de  $-100^\circ\text{C}$  a  $0^\circ\text{C}$ .

A molécula de água é composta por um átomo de oxigénio e dois átomos de hidrogénio (Fig. 4). Mede cerca de 0,1 nanómetros, sendo  $1\text{ nanómetro} = 10^{-9}\text{ m}$ . Esta constituição molecular, apesar de simples, conduz a comportamentos complexos da água. Por exemplo, a sua fase líquida possui algumas propriedades invulgares que a distinguem de um qualquer outro líquido.

Algumas dessas propriedades (por exemplo, maior densidade na fase líquida do que na sólida – por isso é que o gelo flutua, altas temperaturas de fusão e evaporação, elevado valor da sua capacidade térmica, valor máximo da sua densidade a  $4^\circ\text{C}$ , etc.) advêm das ligações por pontes de hidrogénio.

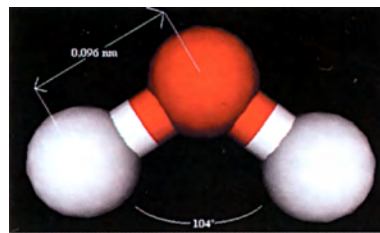


Fig. 4. Modelo da molécula de água. A vermelho está representado o átomo de oxigénio e a cinzento os dois átomos de hidrogénio. A distância entre os átomos de oxigénio e de hidrogénio é de 0,096 nm e o ângulo de ligação é de  $104^\circ$ .

As ligações por pontes de hidrogénio ocorrem quando um átomo de hidrogénio de uma molécula de água se liga ao átomo de oxigénio de uma outra molécula de água (Fig. 5). Trata-se de uma atracção dipolo-dipolo entre o hidrogénio e o oxigénio.

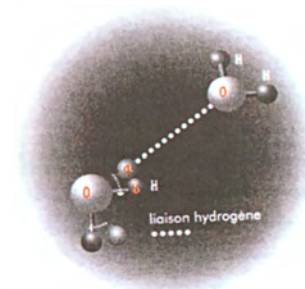


Fig. 5. Esquema de uma ligação por ponte de hidrogénio. A carga positiva do núcleo de um átomo de hidrogénio de uma molécula de água é atraído pela carga negativa da nuvem electrónica de um átomo de oxigénio vizinho. Estabelece-se então uma ligação de hidrogénio entre as duas moléculas: o átomo de hidrogénio alinha-se com os átomos de oxigénio das duas moléculas (a). Se, por rotação molecular, o átomo de hidrogénio de uma ligação for desalinhado do eixo formado pelos átomos de oxigénio, a ligação rompe-se (b) [1]

Esta ligação é dominante no comportamento da água líquida (na qual as moléculas estão, em média, separadas por 0,19 nm). As ligações por pontes de hidrogénio formam-se e quebram-se milhares de vezes por segundo.

Na fase sólida (gelo), as ligações por pontes de hidrogénio são responsáveis pelo arranjo das moléculas de água numa malha tetraédrica, que se repete em toda a estrutura cristalina (Fig. 6). A distância entre os átomos de oxigénio nesta estrutura é de aproximadamente 0,28 nm. Mesmo depois do gelo fundir continuam a existir 90% das ligações por pontes de hidrogénio que existiam na fase sólida

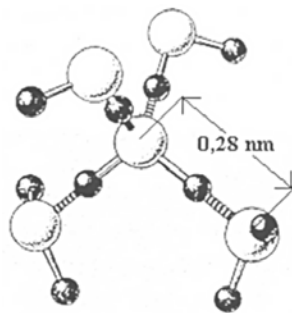


Fig.6. Estrutura tetraédrica do gelo cristalino. Cada molécula de água está rodeada de quatro outras. A ligação entre as moléculas é feita por pontes de hidrogénio. A distância entre os átomos de oxigénio (representados a branco) é de 0,28 nm [2].

Na fase gasosa (vapor de água) estas ligações são quase inexistentes devido à elevada energia cinética das moléculas. A pressão constante, o aquecimento da água líquida leva a um aumento da energia de vibração das moléculas de água, que conduz a uma quebra das ligações por pontes de hidrogénio. As moléculas ficam quase todas livres e afastadas por distâncias superiores a 0,2 nm.

JORGE TRINDADE

Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico da Guarda  
jtrindade@ipg.pt

CARLOS FIOLEAIS

Departamento de Física e Centro de Física Computacional da Universidade de Coimbra  
3004-516 Coimbra

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a colaboração do Dr. José Carlos Teixeira e do Dr. Victor Gil no Projecto Água Virtual.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] José Teixeira, L'eau, liquide ou cristal déliquescents?, *La Recherche*, 324, Outubro, 1999.  
[2] S. Sugano e H. Koizumi, "Microcluster Physics", Springer, 1998.

## ESCALAS DO TEMPO

As escalas de espaço permitem-nos compreender e integrar distâncias. Traçamos caminhos e planeamos viagens. Podemos mesmo fazê-lo em distâncias muito para cá do que vemos, por exemplo dentro de nós próprios, ou muito para além do que jamais conseguiríamos percorrer. Mesmo à velocidade da luz, seria impossível viajarmos até ao outro lado da nossa Galáxia, porque a distância é grande de mais em relação ao tempo da nossa vida. Aqui podemos mesmo dizer: não temos tempo.

Cada um de nós conhece bastante mais do que poderia descobrir só por si, porque é privilégio da nossa espécie transmitir as memórias e os conhecimentos que se acumularam com o desenrolar do tempo. Tudo começou há tanto tempo que, tal como para o espaço, precisamos de escalas para compreender o passado.

Que unidade usar? Se perguntássemos a idade a um jovem e ele nos respondesse 536 457 600 segundos, a resposta estaria porventura correcta. Mas faz muito mais sentido que a resposta seja: 17 anos. Por isso, ninguém se importará se for utilizada uma unidade que não pertence ao Sistema Internacional - o ano.

No final de 2002 vamos assistir aos habituais balanços do ano que agora come-

çou, do ponto de vista político, económico e social. Na perspectiva pessoal, entre as várias recordações poderá estar a visita à exposição *Potências de 10, o mundo às várias escalas*, incluindo provavelmente um passeio no jardim da Fundação Gulbenkian. Esta e todas as recordações de 2002 referem-se ao tempo presente -  $10^0$  anos.

Se começarmos agora a recuar no tempo, ao longo das várias potências de dez, as recordações são mais difusas logo no primeiro passo, dezenas de anos -  $10^1$  anos. Já poucos se lembram da construção da sede da Fundação (Fig. 1), ou do modo como o respectivo espaço antes estava ocupado. Acontecimentos tão recentes, como a introdução do cartão multibanco (1985), o 25 de Abril de 1974 ou as primeiras emissões de televisão em Portugal (1956) assumem um carácter histórico, sobretudo para as pessoas que nasceram depois.

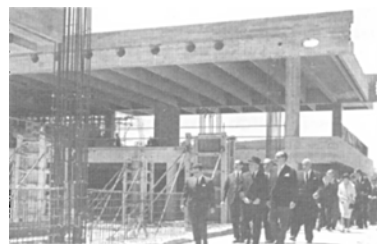


Fig.1. Construção da sede da Fundação Gulbenkian junto à Praça de Espanha, Lisboa, em 1965; anteriormente funcionava aqui a Feira Popular (cortesia da Fundação Calouste Gulbenkian).

As centenas de anos -  $10^2$  anos - incluem toda a História de Portugal. Muitos acontecimentos importantes foram construindo a nossa História, mas um dos mais marcantes foi sem dúvida o sismo de 1755. Um fenómeno natural, inerente à dinâmica interna do planeta, que se fez sentir com grande intensidade e magnitude em quase todo o País. A destruição e a perda de vidas impressionaram profundamente o resto da Europa. Philippe Le Bas, gravador régio em Paris, fez gravuras fiéis a partir de esboços feitos no local. Vários autores escreveram sobre esta tragédia, entre os quais os próprios Voltaire e Kant.



Os milhares de anos -  $10^3$  anos - correspondem ao andar mais recente da História da Terra, o Holocénico (que significa "tudo novo") (Fig 2). Este tempo inclui o Neolítico, que representa o final da pré-história, com a sedentarização das sociedades que adoptam a agricultura e a criação de animais, e ainda o desenvolvimento e declínio de todas as civilizações antigas.

Nas dezenas de milhares de anos -  $10^4$  anos - cabe toda a existência da nossa espécie. Há cerca de  $3,5 \times 10^4$  anos existiam duas variedades na Europa: o *Homo sapiens sapiens* e o *Homo sapiens neanderthalensis*. A partir desta altura verifica-se o desaparecimento da população do *Homo neanderthalensis*, excepto na Península Ibérica onde se manteve até há  $2,8 \times 10^4$  anos, sem que se conheçam bem as cau-

sas. Na véspera do Natal de 1998 foi descoberta uma sepultura de criança no Lapedo, próximo de Leiria. Os estudos revelaram que a criança fora sepultada há  $2,5 \times 10^4$  anos, quando tinha quatro anos de idade, seguindo um ritual cuidado. A Criança do Lapedo é a única criança do Paleolítico superior até hoje encontrada, representando um achado da arqueologia portuguesa com inestimável valor internacional. O seu esqueleto apresenta uma mistura de características sapiens e neandertais, reforçando a hipótese de que o desaparecimento das populações de *Homo sapiens neanderthalensis* não se deveu a uma extinção súbita, mas a uma absorção gradual pelas populações de *Homo sapiens sapiens*. Provavelmente muitos de nós ainda conservamos algumas características neandertais nos nossos genes.



Fig.3. Reconstituição da fisionomia da Criança do Lapedo (cortesia de Anglia TV).

As centenas de milhares de anos -  $10^5$  anos - caracterizam-se pelo desenvolvimento das últimas linhagens do género *Homo*, que precedem o aparecimento do *Homo sapiens*. Há  $5 \times 10^5$  anos os homínidos conseguiam dominar o fogo e acendiam as primeiras fogueiras.

O milhão de anos -  $10^6$  anos - é a unidade de tempo na História Geológica da Terra. Há  $2,2 \times 10^6$  anos surgiu a primeira população do género *Homo*, o *Homo habilis*, coincidindo praticamente com o início do último período da História da Terra: o Quaternário (há  $1,8 \times 10^6$  anos). Do ponto de vista climático, este período caracteriza-se pelo início da rápida alternância entre períodos frios (glaciares) e períodos temperados (interglaciares). Durante os períodos frios, o clima periglacial e os glaciares de montanha estendiam-se até à nossa latitude, ao passo que o mar recuava algumas

**GRANDES DIVISÕES DOS TEMPOS GEOLÓGICOS**  
Com indicação dos respectivos limites de idades absolutas, em milhões de anos -  $10^6$  (Ma)

		ERAS Grupos	PERÍODOS Sistemas	SÉRIES Épocas	CRONOLOGIA (Ma)
F E R O Z O I C O	ERA CENOZÓICA	Quaternário	Holocénico		0.01
			Plistocénico		1.8
		Neogénico	Pliocénico		5
			Miocénico		23
			Oligocénico		38
		Paleogénico	Eocénico		53
			Paleocénico		60 a 65
			SECUNDÁRIO	Cretácico	superior
		médio			
		inferior			
Jurássico	Malm	195-200			
	Dogger				
Triásico	Keuper Muschelkalk Buntsandstein	225-240			
ERA PALEOZÓICA	PRIMÁRIO	Pérmico		280	
		Carbónico		345	
		Devónico		395-410	
		Silúrico		430-440	
		Ordovícico		500	
		Câmbrico		540	
		PROTEROZÓICO (ou Algonóico)	PRECAMBRIÇO		2500
ARCAICO	4600				

Fig.2. Tabela crono-estratigráfica simplificada (adaptado de Galopim de Carvalho, 1998).

dezenas de quilómetros. Por exemplo, há  $1,8 \times 10^4$  anos a linha de costa estava localizada onde hoje encontramos a linha dos 140 m de profundidade. O último período glacial ocorreu há  $1 \times 10^4$  anos.

As dezenas de milhões de anos -  $10^7$  anos - incluem uma série de acontecimentos marcantes. Na altura da extinção dos Dinossauros, há  $6,5 \times 10^7$  anos, também muitos outros grupos se extinguíram, ou sofreram mudanças. No entanto, esta crise da biosfera libertou inúmeros nichos ecológicos, que permitiram o desenvolvimento das linhas filogenéticas que evoluíram até aos grupos actuais. É o caso dos Mamíferos, que só se desenvolveram significativamente após a extinção dos dinossauros. Há  $6,5 \times 10^7$  anos iniciou-se assim a Era Cenozóica (era dos "novos animais"). A par destes acontecimentos globais, há cerca de  $7 \times 10^7$  anos formaram-se os maciços eruptivos de Sintra, Sines e Monchique e a região de Lisboa-Mafra apresentava vários vulcões em actividade. As primeiras erupções emersas do Arquipélago da Madeira ocorreram na Ilha do Porto Santo muito mais tarde, há  $1,9 \times 10^7$  anos, e no Arquipélago dos Açores há  $1,0 \times 10^7$  anos.

Nas centenas de milhões de anos -  $10^8$  anos - cabem grande parte dos avanços mais significativos da evolução da vida na Terra. Apesar do seu desenvolvimento relativamente tardio, os mamíferos surgiram há mais de  $2 \times 10^8$  anos e as aves há cerca de  $1,5 \times 10^8$  anos. Os primeiros animais multicelulares, com vários tipos de células organizadas em órgãos, surgem pela primeira vez no registo geológico há  $9 \times 10^8$  anos (Proterozóico Superior), fossilizados nas rochas quartzíticas de Ediacara (Austrália). Há cerca de  $2,0 \times 10^8$  anos, a dinâmica interna do planeta levou à fracturação do único supercontinente que se tinha formado no final do Paleozóico - Pangea - iniciando o actual ciclo de abertura de bacias oceânicas por acção dos processos da tectónica de placas. O Atlântico Norte começou a abrir por volta dos  $1,5 \times 10^8$  anos, altura em que o bloco de continente norte americano se separou do bloco euro-asiático. As Ilhas Berlengas,

ao largo de Peniche, correspondem a um fragmento de América do Norte que permaneceu junto à Europa.

Com os milhares de milhões de anos -  $10^9$  anos - chegamos finalmente ao início da História da Terra. As rochas mais antigas da crosta terrestre são os gnaisses de Acasta, no Canadá, com  $3,96 \times 10^9$  anos e os minerais mais antigos são grãos de zircão detritico, com cerca de  $4,3 \times 10^9$  anos, provenientes de rochas sedimentares da Austrália. Os fósseis mais antigos que se conhecem foram encontrados em Pilbara, também na Austrália, em rochas com uma idade em torno de  $3,5 \times 10^9$  anos. Porém, no sul da Gronelândia, há matéria carbonosa (eventualmente microfósseis) nas formações bandadas de ferro mais antigas que apresenta uma razão  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  semelhante à dos organismos actuais, sugerindo que a vida pode ter surgido na Terra há cerca de  $3,8 \times 10^9$  anos. Datações efectuadas em amostras de meteoritos e de rochas da Lua mostram que a Terra se formou aproximadamente há  $4,6 \times 10^9$  anos, na companhia das restantes nuvens de poeira que deram origem ao sistema solar.

E para a frente?... Seria fantasioso tentar prosseguir com a mesma regularidade ao longo das escalas de tempo no futuro. Atendendo ao fluxo de calor que hoje emana do interior da Terra sabemos que, por exemplo, a deriva dos continentes vai continuar por muitos milhões de anos. Todavia a abertura do Atlântico Norte, a que assistimos hoje à velocidade de  $7,9 \times 10^{-10} \text{ m s}^{-1}$  (2,5 cm/ano), irá cessar um dia e inverter-se. O Atlântico

começará então a fechar-se e é provável que daqui a  $2 \times 10^8$  anos as placas norte-americana e euroasiática voltem a estar unidas. Mas este é um futuro longínquo, distante da nossa vontade e alheio à nossa presença sobre o planeta.

Devemos, no entanto, pensar no futuro mais próximo, que está condicionado pelo modo como utilizamos os recursos da Terra. Aqui a incerteza é grande, porque os impactes das nossas decisões, nomeadamente as que dizem respeito à introdução de poluentes no ambiente, ocorrem numa escala de tempo muito superior à duração de um governo ou mesmo da nossa vida (Fig. 4). Para além dos factores de ordem económica e política que pesam nestas decisões, uma noção abrangente do tempo torna-se imprescindível para gerir os recursos naturais de uma forma sustentada, sem comprometer a qualidade de vida das gerações futuras.

FRANCISCO FATELA

Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa  
ffatela@fc.ul.pt

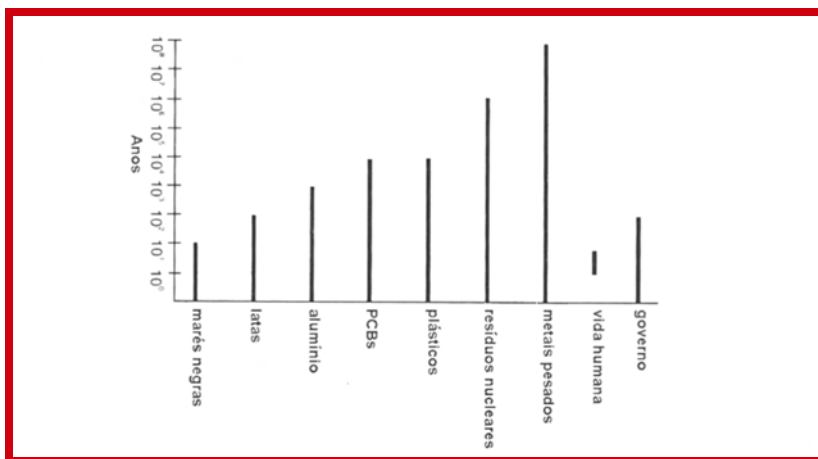


Fig.4. Comparação entre o tempo de permanência de alguns poluentes no ambiente natural e a duração dos governos e da vida humana (adaptado de Cook,1998).

## BIBLIOGRAFIA

Caron, J.M.; Gauthier, A.; Schaff, A.; Ulysse, J. & Wozniak, J. (1995) - *Comprendre et enseigner la planète Terre*. Ed. Ophrys, 3ème édition.

Cook, P. (1998) - The role of Earth sciences in sustaining our life-support system. *Comun. Inst. Geol. e Mineiro*, t. 03-18.

Dias, J.M.A.; Boski, T.; Rodrigues, A. & Magalhães, F. (2000) - Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum. *Marine Geology*, vol. 170, 177 - 186.

França, J.-A. (1989) - *A Reconstrução de Lisboa e a Arquitectura Pombalina*. Col. Biblioteca Breve, Instituto de Cultura e Língua Portuguesa.

Galopim de Carvalho, A.M. (1998) - Evolução da Terra e da Vida. *Pavilhão do Futuro (Catálogo Oficial)*, pp. 73-85, EXPO'98.

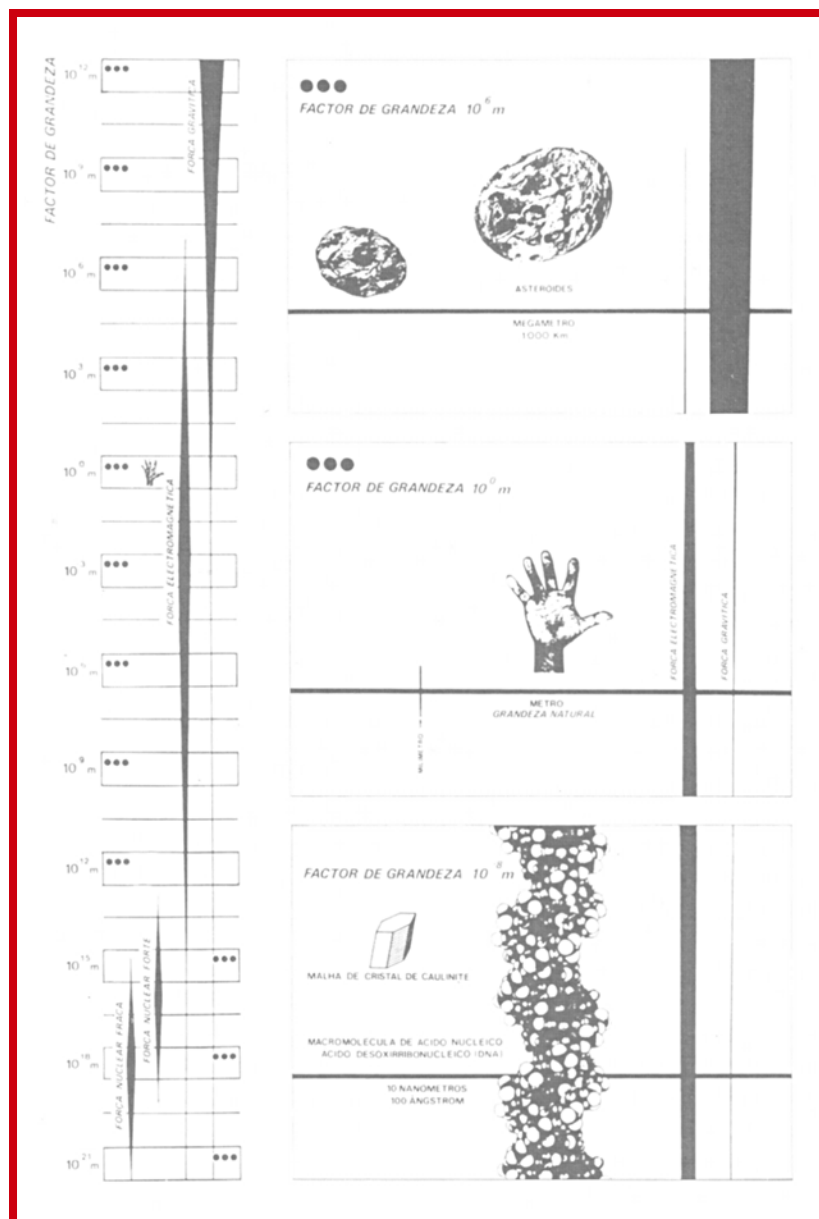
Levin, H.L. (1994) - *The Earth through Time*. Saunders College Publishing, 4th edition.

Pinto, A.C.; Ferreira, C.; Silva, J.A.; Ramalho, M.M. & Reis, P. (1999) - *Liberdade e cidadania, 100 anos portugueses*.

Ribeiro, A. (1998) - *Uma Breve História Tectónica da Terra*. Monografias, EXPO'98.

RTP (2001) - *A Criança do Lapedo* (documentário).

Teixeira, C.; Pais, J. & Rocha, R. (1979) - *Quadros de Unidades Estratigráficas e da Estratigrafia Portuguesa*. Instituto Nacional de Investigação Científica.



Quadro das grandezas físicas (pormenores)  
Fernando Lanhas, Lugar do Desenho e Museu de Serralves, Edições Asa, 2001.

"Potências de Dez – O mundo às várias escalas", Philip Morrison & Phylis Morrison e The Office of Charles and Ray Eames, Porto Editora, 2001.

"Le Relief de l'Invisible", Série realizada por Gabriel Turkieh, Pierre-Oscar Levy e Jean- Michel Sanchez, co-produção Altomedia, cité des Sciences et de l'Industrie, Ex Nihilo, Aune productions, 1998 (vídeo 1) e 2000 (vídeo 2).

CD-ROM "Powers of Ten Interactive" produzido pelo Eames Office.

<http://www.powersof10.com>.

Agenda dos Correios 2002, Correios de Portugal, 2001.

"Fernando Lanhas", Lugar do Desenho e Museu de Serralves, Edições Asa, 2002.

## O LIVRO DAS "POTÊNCIAS DE DEZ"



"Potências de Dez – O mundo às várias escalas", Philip Morrison, Phylis Morrison e The Office of Charles and Ray Eames, Porto Editora, 2002.

Este livro é um clássico da literatura de divulgação científica. A ideia do filme do Eames Office é enriquecida com o texto dos físicos de Harvard Philip Morrison e Phylis Morrison. Como escreveu o biólogo Stephen Jay Gould, na "The New York Times Book Review", trata-se de uma *brilhante incorporação pictórica e textual de uma ideia maravilhosa*. E continua ele: *O efeito é impressionante e ensina-nos mais sobre o tamanho das coisas do que um tratado maçudo conseguiria fazer*. Não vale a pena acrescentar mais nada sobre o conteúdo do livro...

Mas há que louvar a edição portuguesa da Porto Editora. O original estava integrado na prestigiada colecção "Scientific American Library" da editora norte-americana Freeman. A Porto Editora forneceu-nos uma tradução em português, cuja qualidade está assegurada pela revisão científica efectuada por Ana Maria Eiró e Carlos Matos Ferreira, precisamente os comissários da exposição "Potências de Dez – O mundo às várias escalas" na Fundação Calouste Gulbenkian. A Porto Editora está de parabéns pela edição e por ter conseguido fazê-la coincidir com a exposição. Aliás, a "Gazeta de Física" quer agradecer aquela edi-

tora a amável cedência das imagens que acompanham as entradas dos artigos principais deste número especial da Gazeta (vários quadros do mundo a várias escalas). Agradece também a autorização para reproduzir o excerto do livro que é publicado a seguir.

CARLOS FIOLEHAIS  
tcarlos@teor.fis.uc.pt

## POTÊNCIAS DE DEZ

### O mundo às várias escalas

#### A DIVERSIDADE DAS CIÊNCIAS

O mundo à distância de um braço – correspondendo a mais ou menos um metro na escala – é o mundo da maior parte dos artefactos e das formas vivas mais familiares. Não há nenhum edifício que ultrapasse a escala do quilómetro; nenhuma arquitectura maciça, desde a pirâmide ao Pentágono, é tão grande. Um limite semelhante é aplicado às formas vivas. As árvores gigantes raramente atingem uma centena de metros de altura e não existem nem nunca existiram animais tão grandes. Os artefactos individuais mais pequenos que podemos utilizar e apreciar directamente – as letras primorosas de alguns manuscritos admiráveis, ou o fundo polido de uma agulha fina – podem ter talvez alguns décimos de milímetro. São seis as ordens de grandeza que abrangem o domínio da familiaridade. A ciência que se faz a estas escalas é bastante implícita: as disciplinas mais importantes são as que se dedicam às raízes do comportamento humano.

Começamos por ordenar o conteúdo do nosso mundo de acordo com a sua dimensão física. Nas escalas maiores, só ocasionalmente é visível o trabalho da nossa activa espécie: uma ponte, um muro, uma barragem ou uma estrada. Normalmente, estes não são completamente tridimensionais. Quando captados por vista aérea, fazem lembrar fitas compridas. Só quando considerados no seu con-

junto conseguimos ver artefactos humanos que ocupam grandes áreas (embora não tridimensionais) oscilando entre os dez e os cem quilómetros, por vezes até mais. Trata-se das planícies e socacos cultivados, dos terrenos irrigados, das clareiras da antiga floresta, das grandes cidades e seus arredores. A sua história tem mais a ver com crescimento do que com planeamento. Também em relação aos restantes elementos da vida, encontramos uma disposição semelhante. As folhas de erva são pequenas mas as terras de pasto e as áreas de savana, tal como as florestas densas a norte e a sul, estendem-se ao longo de regiões inteiras, chegando a cobrir mil quilómetros. São estas regiões que constituem a paisagem visível em grande escala. Neste caso, as ciências cognitivas são as que têm como objectivo a natureza e a utilização das terras. Talvez ainda mais pertinentes sejam as descrições feitas pelos antigos historiadores e geógrafos e as apresentadas por defensores de elaboradas tecnologias aplicadas, desde a agricultura à florestação e engenharia, tanto antigas como modernas.

Uma vez ultrapassada a escala dos mil quilómetros, perdemos de vista a nossa espécie. À escala global e regional, até dez mil quilómetros, as ciências mais "frias" entram em força. As rápidas deslocções de ar, as suas nuvens e ventos incessantes, o curso mais lento dos rios, as correntes oceánicas, os gelos glaciares e a deslocação majestosamente lenta dos próprios continentes sólidos estão para além da simples observação. Estas fazem parte das ciências dinâmicas como a meteorologia, a oceanografia, a hidrologia e a geologia. Na actual geração, a geologia alargou muito o seu alcance; até há bem pouco tempo, o globo, considerado no seu conjunto, dificilmente era matéria da geologia. As regiões eram bem conhecidas, mas não havia nenhum processo conhecido que ligasse as margens distantes dos vastos oceanos ou o globo terrestre como um todo. Tudo isso mudou: hoje em dia, um geólogo pode considerar a Terra como sua província.

Para além do limite dos dez mil quilómetros podemos deixar a Terra, sem

que isso signifique abandonar ainda o domínio da humanidade. Enviámos à Lua corajosos exploradores, enquanto que a órbita geossíncrona da Terra, um anel que se estende no espaço com cinco vezes o raio da Terra, constitui actualmente um recurso natural bem explorado. Os satélites que percorrem a sua órbita dentro daquela faixa gravitacional não nascem nem se põem, quando observados da Terra em rotação, mas permanecem sempre no campo de alcance das parabólicas fixas cuidadosamente direccionadas; eles retransmitem palavras e imagens através de ligações de rádio para e de quase todos os países.

É necessária uma escala de mais seis potências de dez para alcançar os limites do nosso sistema solar, lá longe entre os cometas ocultos. As ciências do sistema solar – os estudos das superfícies e do interior dos planetas, grandes e pequenos, dos respectivos satélites, dos meteoritos, dos cometas, das poeiras dispersas – representam actualmente mais do que simples astronomia. Deixámos de observar apenas de longe; agora, com as nossas sondas automáticas tocamos e testamos, ainda que indirectamente. Hoje em dia a astronomia propriamente dita começa com as estrelas; uma delas, o Sol, é a nossa vivificante fonte de calor, a única estrela suficientemente próxima para permitir o seu estudo em pormenor. Entre a região que habitamos perto do Sol e a segunda estrela mais próxima encontra-se um grande abismo; têm que se atravessar quatro ou cinco potências de dez até entrarmos no reino das estrelas. É uma história notável contada pela primeira vez no nosso século: o nascimento, o desenvolvimento e a história da vida das estrelas, diferentes esferas de gás a que a maior parte da massa visível de todo o universo se encontra ligada. Este é o tipo de astronomia que se baseia nas raízes da própria palavra: o estudo das estrelas. É um tema hoje amadurecido, embora certamente inacabado.

Olhemos agora no sentido inverso, para dentro, partindo do mundo submilimétrico do olhar atento mas não auxiliado até ao microcosmo. Por ordem de in-

teresse, temos em primeiro lugar a maquinaria intrincada dos nossos próprios corpos e dos seus equivalentes em todas as maiores formas de vida. Nesta área entram a anatomia, a fisiologia, a histologia, a citologia – um conjunto de especialidades que acaba no estudo da própria célula, a unidade ubíqua das formas vivas. Mais três ou quatro potências de dez atravessam todo aquele mundo de vida microscópica – a microbiologia – até às células mais pequenas das mais antigas formas de vida, até que se revelam esses parasitas não inteiramente vivos, os vírus. Mas a esse nível, à escala de mais ou menos mil angstroms, encontramos os mecanismos da biologia molecular (e da sua mais recente emulação nos artefactos texturados da microelectrónica). Estes cenários relacionam a forma com a função: a forma é molecular; as funções fazem parte das propriedades mais profundas de vida, partilhadas por toda a teia de vida durante todo o período da evolução da Terra que hoje conhecemos. Estamos aqui a falar de genética e da bioquímica de grandes moléculas e dos seus ciclos de interacção. Logo em seguida atravessamos a ténue fronteira que separa a própria vida (o processo químico mais subtil) do mundo dos químicos dos movimentos aleatórios e das ligações atómicas.

Observemos de novo a escala celeste. Também aí atravessamos uma fronteira real da natureza logo que deixamos o espaço próximo da Via Láctea para vermos galáxias, grupos de estrelas que rodam em conjunto, ligadas entre si, ao longo do tempo. A astronomia das estrelas estendeu-se inicialmente ao diluído meio interestelar, a matéria de que nascem as novas estrelas, prosseguindo depois até à astronomia galáctica e extragaláctica. Fascinantes formas e variedades de grupos de estrelas juncam todo o espaço que a vista pode alcançar nesse mundo distante.

Viajando de novo pelo mundo interior das grandes moléculas, alcançamos finalmente o átomo individual, a uma escala de cerca de um angstrom. Abaixo dessa escala, toda a ciência é física e química; a

partir do momento que damos início à exploração dos espaços mais recônditos do átomo, entramos num domínio estranho que fica para além de quaisquer imagens directas. Podemos apenas representá-lo da forma como tem sido apreendido com a ajuda das ferramentas e conceitos poderosos da física moderna. O nosso estudo chegou muito longe, a novas leis fundamentais, a princípio paradoxais mas, neste momento, pródigas na exploração do mundo padronizado e estável que conhecemos no interior da matéria. O mundo modular da centena de elementos químicos e da sua cada vez maior, mas ainda limitada, variedade de espécies nucleares é um mundo regido por uma interligação subtil entre ordem e acaso.

Os dois extremos da nossa sequência de imagens, as escalas terminais de grande e de pequena dimensão, marcam apenas os limites do conhecimento contemporâneo. Num dos extremos, lá longe onde as galáxias surgem como uma espuma brilhante na escuridão, todas as nossas ciências se tornam numa única: a cosmologia. Não sabemos se há algo de novo no espaço para além dos mil milhões de anos-luz. Todas as estruturas distintas que conhecemos são seguramente mais pequenas que isso. Existem de facto novidades maravilhosas, que não se exprimem no espaço mas sim no tempo. O Universo encheu-se de todo um conjunto de galáxias formadas a partir do que, outrora, foi uma massa suave e uniforme. No outro extremo, para as dimensões muito pequenas, voltamos a ter uma única ciência: a física das partículas elementares. Há mesmo indicações de que os dois extremos se informam um ao outro: o Universo extremamente quente pode ter tido, antigamente, apenas o tipo de matéria que hoje vemos transitoriamente nos laboratórios de partículas. O nosso mundo é um mundo modular, construído a partir de uma miríade de réplicas das estruturas mais simples, estruturas que só agora começamos a compreender. Dentro do núcleo encontra-se o protão; dentro do protão os quarks em interacção. E dentro dos quarks? Os anéis e tubos magnetizados que constituem os nossos grandes aceleradores, as

sondas ultramicroscópicas do nosso tempo, não deram a resposta final.

Quarenta e duas potências de dez abarcam o nosso firme conhecimento; para além disto, apenas há lugar a impressões e conjecturas ousadas. Ainda não sabemos, embora possamos discutir sobre isso, se o infinito existe no mundo real da mesma forma que existe no alcance da mente. Até onde podemos prosseguir a digressão em ambos os sentidos, para o exterior até ao macrocosmos, ou para o interior até ao microcosmos? Esperamos sabê-lo um dia.

## VER O INVISÍVEL



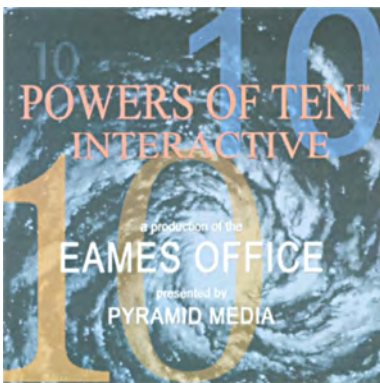
"Le Relief de l'Invisible",  
Série realizada por Gabriel Turkieh,  
Pierre-Oscar Levy e Jean-Michel Sanchez,  
co-produção ALTOMEDIA, cité des Sciences  
et de l'Industrie, Ex Nihilo,  
Aune productions, 1998 (vídeo 1)  
e 2000 (vídeo 2).

Esta série de 22 pequenos filmes científicos, reunidos em dois vídeos, leva-nos

num mergulho vertiginoso ao coração da matéria, até aos segredos microscópicos do mundo vivo, animal, vegetal ou humano, e dos materiais que nos são familiares. Num movimento contínuo, este périplo científico do mundo interior mais secreto faz-nos sobrevoar espaços maravilhosos que nos transportam até à estrutura atómica da matéria. Entre compreensão e fascínio, descobrimos um mundo tão próximo e ao mesmo tempo tão distante da nossa experiência. São imagens com um imenso poder hipnótico.

Alguns destes filmes são exibidos na exposição "Potências de Dez – O mundo às várias escalas".

## CD-ROM DAS POTÊNCIAS DE DEZ



O CD-ROM "Powers of Ten Interactive" produzido pelo Eames Office (<http://www.eamesoffice.com>) permite uma verdadeira viagem, ao "gosto do fre-guês", pelas potências de dez. Trata-se de uma expansão dos filmes clássicos de Charles e Ray Eames, sobre viagens ao longo das escalas do espaço e viagens ao longo das escalas do tempo, que permite ao utente "apar-se em qualquer estação" e conhecer mais sobre ela e as suas vizinhanças (os dois filmes estão, de resto, contidos, no CD-ROM). O Eames Office tem à venda, além do CD-ROM, outros materiais sobre as "Potências de Dez": desde logo o vídeo, que é um recurso pedagógico de primeiro plano para usar nas aulas de Física, mas também um "flip-book", que permite quase ver o filme esfolheando rapidamente o livrinho.

O CD-ROM, em língua inglesa, possui seis zonas principais: Espaço, Tempo, Ferramentas, Pessoas, os Eames e Padrões. Havendo 44 potências, fica um total de 264 possibilidades para serem exploradas. A extraordinária riqueza do ponto de vista tanto de texto como de imagens (em especial, estas últimas) transforma este disco numa verdadeira enciclopédia sobre o nosso universo. Mas é também um documento sobre a aventura humana para conhecer melhor o mundo e a maneira como a visão do mundo penetra na cultura humana, ou melhor, nas várias culturas humanas.

Muito interessante!

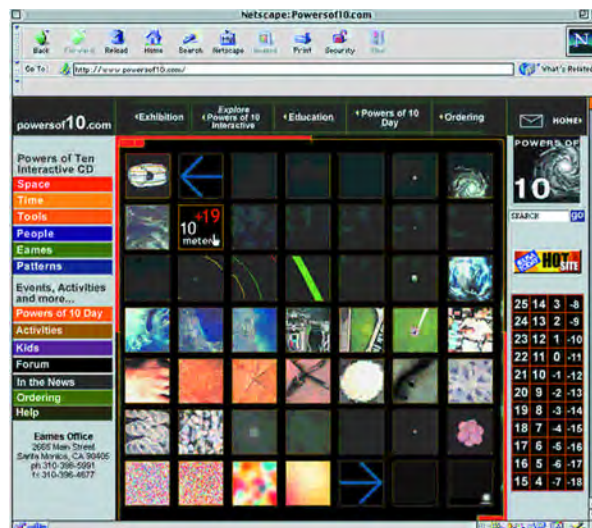
C.F.

## O "SITE" DAS POTÊNCIAS DE DEZ

<http://www.powersof10.com>

Este "site" oficial das "Potências de Dez" fornece uma versão "em escala reduzida" do CD-ROM anterior. A interactividade está bem conseguida embora não haja a mesma riqueza de imagens. Em relação ao CD-ROM tem a grande vantagem de estar permanentemente disponível a título gratuito na Internet.

O leitor faça o favor de clicar...



## HISTÓRIA DO SISTEMA MÉTRICO EM PORTUGAL



Agenda dos Correios 2002, Correios de Portugal, 2001.

O Comandante Estácio dos Reis, um dos nossos mais notáveis historiadores de ciência, propôs aos Correios de Portugal um livro que comemorasse os 150 anos da introdução em Portugal do sistema métrico decimal, o sistema que nos permite falar de potências de dez para o espaço. A ideia era excelente, pois a data merecia ser assinalada e os Correios têm publicado alguns excelentes livros ligados à história da ciência e da técnica (um deles do próprio Estácio dos Reis: "Medir as Estrelas").

No entanto, o plano das edições dos Correios já estava preenchido para 2002 (não sabemos se Pedro Nunes e Garcia da Orta, que comemoram em 2002 os 500 anos do nascimento, terão sido lembrados). Assim, só restou a possibilidade de fazer uma agenda, que contém tanto um texto sobre a história do sistema métrico em Portugal como um rico conjunto de ilustrações de antigas medidas portuguesas. O resultado é magnífico do ponto de vista gráfico. Uma agenda é um volume pessoal e efêmero, mas tenho a certeza que esta agenda vai ser preciosamente guardada por todos aqueles que a possuírem...

C. F.

## LANHAS, UM ARTISTA FASCINADO PELA CIÊNCIA



"Fernando Lanhas",  
Lugar do Desenho e Museu de Serralves,  
Edições Asa, 2001

Fernando Lanhas é decerto um dos artistas portugueses mais originais do século XX. Foi ele talvez quem introduziu a arte

abstracta em Portugal. Foi ele talvez quem mais suportes artísticos usou, desde a arquitectura de uma casa aos seixos de uma praia. E foi ele decerto quem conseguiu, em muitas peças, sínteses excepcionais entre arte e ciência.

A exposição retrospectiva que teve lugar de Abril a Junho de 2001 no Museu de Serralves, no Porto, permitiu divulgar melhor a obra do artista (a obra em epígrafe é o catálogo dessa exposição). Um dos objectivos centrais dessa exposição foi precisamente o "Quadro das grandezas físicas" (realizado de 1971 a 1986) que se baseia na ideia das potências de dez. Não é por isso de admirar que a exposição "Potências de Dez" na Gulbenkian tenha procurado incluir esse "Quadro", o que foi possível com a amável colaboração do artista e do Museu de Serralves.

Que essa peça sirva para que os visitantes se interessem pela obra singular de Fernando Lanhas, em particular pela união fecunda que tem procurado entre ciência e arte.

C.F.

## Prefixos SI

Os nomes e os símbolos dos múltiplos e submúltiplos decimais das unidades SI obtêm-se por meio dos prefixos seguintes:

MÚLTIPLOS		
nome do prefixo	símbolo do prefixo	factor multiplicador
yotta	Y	$10^{24} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
zetta	Z	$10^{21} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
exa	E	$10^{18} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
peta	P	$10^{15} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
tera	T	$10^{12} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000$
giga	G	$10^9 = 1\ 000\ 000\ 000$
mega	M	$10^6 = 1\ 000\ 000$
quilo	k	$10^3 = 1000$
hecto	h	$10^2 = 100$
deca	da	$10^1 = 10$

SUBMÚLTIPLOS		
nome do prefixo	símbolo do prefixo	factor multiplicador
deci	d	$10^{-1} = 0,1$
centi	c	$10^{-2} = 0,01$
mili	m	$10^{-3} = 0,001$
micro	$\mu$	$10^{-6} = 0,000\ 0001$
nano	n	$10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$
pico	p	$10^{-12} = 0,000\ 000\ 000\ 001$
fento	f	$10^{-15} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 001$
ato	a	$10^{-18} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$
zepto	z	$10^{-21} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$
yocto	y	$10^{-24} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$

"Sistema internacional de unidades (SI)", Guilherme de Almeida, 2ª edição, Plátano, 1997



# PROCURA-SE OUTRO GÊNIO

www.publico.pt

PUBLICIS



René Descartes

## Prémios PÚBLICO/GRADIVA para ideias geniais dos melhores alunos do 12º ano de Matemática e Física.

Edição 2001/2002

Para conhecer o Regulamento, contacta os professores da tua escola secundária ou:

[www.publico.pt](http://www.publico.pt)

S.P.M. - Tel.: 21 793 97 85 - E-mail: [spm@spm.pt](mailto:spm@spm.pt) - Internet: [www.spm.pt](http://www.spm.pt)

S.P.F. - Tel.: 21 799 36 65 - E-mail: [secretariado@spf.pt](mailto:secretariado@spf.pt) - Internet: [www.spf.pt](http://www.spf.pt)

Prémio "Bento de Jesus Caraça"

atribuído pela Sociedade Portuguesa de Matemática,  
no valor de 3.000 euros/ 601.446\$00 para o melhor trabalho  
individual sobre Matemática elaborado por alunos que,  
na prova nacional de Matemática do 12º ano (2000/ 2001),  
tenham obtido pelo menos 18 valores.

Prémio "Mário Silva"

atribuído pela Sociedade Portuguesa de Física,  
no valor de 3.000 euros/ 601.446\$00 para o melhor trabalho  
individual sobre Física elaborado por alunos que,  
na prova nacional de Física do 12º ano (2000/ 2001),  
tenham obtido pelo menos 18 valores.

A BP oferecerá um prémio no valor de 2.500 Euros (501.205\$00) à Escola Secundária dos alunos premiados.

Organização:

PÚBLICO



Patrocínio:



Visite o nosso “site”

<http://spf.pt>

e faça-se sócio da Sociedade Portuguesa de Física



# Colóquios

Integrados na exposição.

## POTÊNCIAS de DEZ o mundo às várias escalas

Às terças-feiras, às 18h00, no Auditório 2 da Fundação Calouste Gulbenkian

**26 de Fevereiro**

AMPLIAÇÕES: AS ESCALAS DA FOTOGRAFIA  
**Jorge Calado**

**5 de Março**

AS ESCALAS DA VIDA  
**Alexandre Quintanilha**

**12 de Março**

A EVOLUÇÃO DO UNIVERSO  
**Jorge Dias de Deus**

**19 de Março**

DO ÁTOMO ÀS PARTÍCULAS ELEMENTARES  
**Augusto Barroso**

**26 de Março**

O MUNDO DAS NANO ESTRUTURAS  
**Carlos Fiolhais**

**3 de Abril\***

À PROCURA DA ESCALA CERTA  
**Dinis Pestana**

\*quarta-feira

**9 de Abril**

O GENOMA HUMANO: COMO SE LÊ O LIVRO DA VIDA  
**Carmo Fonseca**

**16 de Abril**

O QUE MUDA NO MUNDO QUANDO VARIA A TEMPERATURA  
**João Lopes dos Santos**

**23 de Abril**

DO SISTEMA SOLAR AO UNIVERSO  
**Rui Agostinho**

**30 de Abril**

AS ESCALAS DA TERRA: LATITUDE, LONGITUDE E NAVEGAÇÃO  
**A. Estácio dos Reis**

**7 de Maio**

AS ESCALAS DA EVOLUÇÃO DO PLANETA E A TERRA PRIMITIVA  
**Fernando Barriga**

**21 de Maio**

MATEMÁTICA PARA LÁ DE TODAS AS ESCALAS  
**Jorge Buescu**



FUNDAÇÃO CALOUSTE GULBENKIAN  
Serviço de Ciência



NOS PRÓXIMOS NÚMEROS



O ENCONTRO DO MILÉNIO

Nuno Peres

UNIVERSIDADES PORTUGUESAS:  
POR QUE NÃO AS MELHORES?

Michael Athans

25 SÉCULOS DE FÍSICA QUÂNTICA

Mario Bunge

A FÍSICA NO FINAL DO SÉCULO XIX

Manuel Fernandes Thomaz