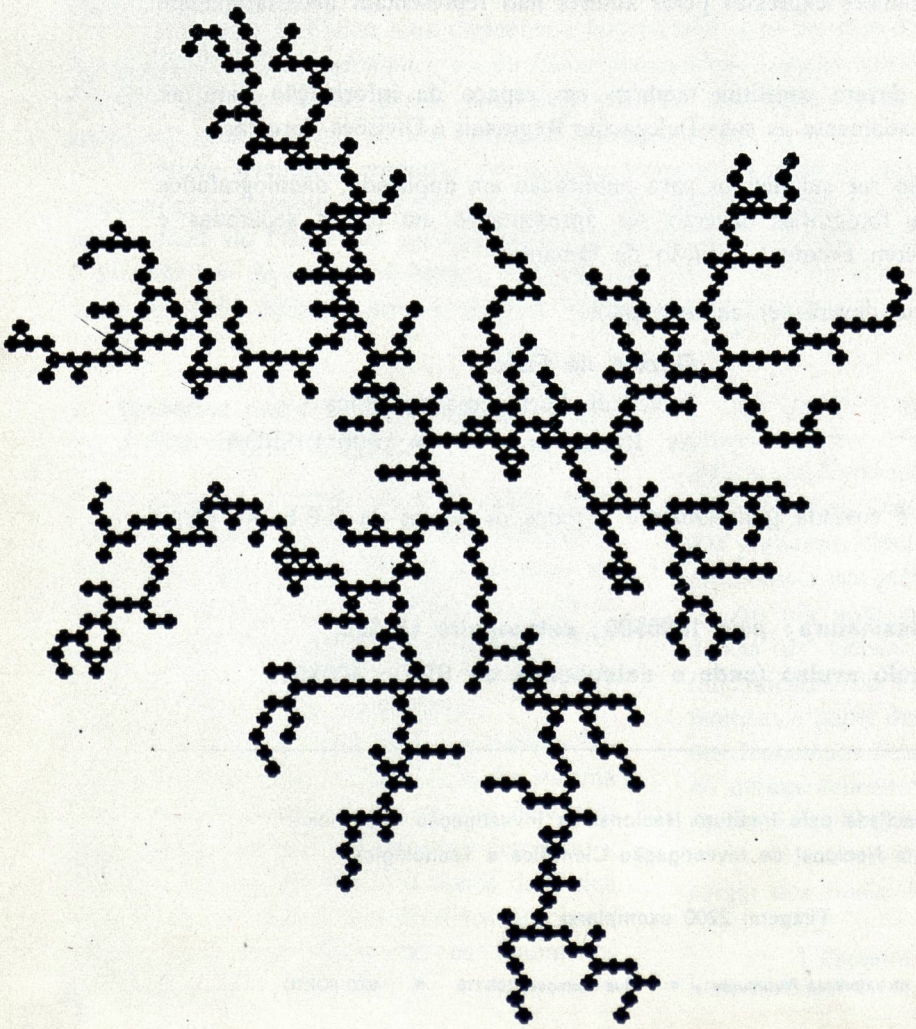
GAZETA DE FISICA

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA



VOL. 11, FASC. 4

Publicação Trimestral

Outubro a Dezembro 1988

• Simulação Computacional •

Simulação de estrutura fractal de partículas limitada pela sua difusão (total de 525 capturas)

GAZETA DE FISICA

Fundada em 1946 por A. Gibert
Propriedade e Edição: Sociedade Portuguesa de Física
Director: Filipe Duarte Santos (Secretário-Geral da S.P.F.)

Comissão de Redacção e Administração

Conselho Directivo da S.P.F.: H. Machado Jorge, F. Duarte Santos, J. Bessa Sousa, Ana M. Eiró, Carlos Matos Ferreira, F. Costa Parente, M. Fernanda Silva, J. Brochado Oliveira, J. Monteiro Moreira, N. Ayres Campos, C. Lopes Gil.

Endereço: Sociedade Portuguesa de Física, Av. da República, 37-4.° — 1000 Lisboa

---

A **Gazeta de Física** publica artigos, com índole de divulgação, considerados de interesse para estudantes, professores e investigadores em Física. Os artigos podem ter índole teórica, experimental ou aplicada, visando promover o interesse dos jovens pelo estudo da Física, o intercâmbio de ideias e experiências profissionais entre os que ensinam, investigam ou aplicam a Física. As opiniões expressas pelos autores não representam necessariamente posições da S.P.F.

A **Gazeta de Física** deverá constituir também um espaço de informação para as actividades da S.P.F., nomeadamente as suas Delegações Regionais e Divisões Técnicas.

Os manuscritos deverão ser submetidos para publicação em duplicado, dactilografados a dois espaços. Figuras ou fotografias deverão ser apresentadas em folhas separadas e prontas para reprodução, com eventual redução de tamanho.

Toda a correspondência deverá ser enviada para

Gazeta de Física
Sociedade Portuguesa de Física
Av. República, 37-4.° — 1000 LISBOA

A **Gazeta de Física** é enviada gratuitamente a todos os Sócios da S.P.F. no pleno uso dos seus direitos.

Preço de assinatura: país 1500$00; estrangeiro US$25.
Preço do fascículo avulso (sede e delegações da SPF): 400$00.

Publicação subsidiada pelo Instituto Nacional de Investigação Científica
e pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica

Tiragem: 2200 exemplares

Composto e Impresso na *Imprensa Portuguesa* • Rua Formosa, 108-116 • 4000 PORTO

GAZETA DE FISICA Vol. 11, Fasc. 4, Outubro 1988

A Oceanografia e o Ensino da Física (*)

ISABEL AMBAR
Departamento de Física / Centro de Física
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Quem nunca se interrogou por que razão o mar é azulado, ou por que é que há correntes no oceano, ou por que é que as regiões do litoral têm menores amplitudes térmicas que as regiões do interior, ou, ainda, por que é que no Verão as praias da costa ocidental portuguesa têm águas tão frias e as do Algarve são relativamente quentes? Todavia, estas observações tão simples de fenómenos oceanográficos e que resultam de um contacto que temos com um meio natural pelo qual sempre sentimos uma certa atracção, não são na sua maioria explicadas, nem a nível do ensino secundário nem a nível do ensino superior...

O ensino da Física seria certamente beneficiado se os princípios fundamentais do Mecânica, da Acústica, da Termodinâmica ou do Electromagnetismo fossem também ilustrados com exemplos colhidos das observações desses fenómenos naturais que fazem parte da nossa vivência e que, como tal, serão objecto de um potencial interesse nosso.

Neste seminário procurou dar-se uma panorâmica geral do que é a Oceanografia e quais as questões fundamentais que esta procura resolver. Simultaneamente, pretendeu-se chamar a atenção para o facto da Física dos oceanos poder ser apresentada, no seu essencial, de um modo simples e fazendo uso de conceitos básicos e, como tal, poder vir a ser explorada no ensino secundário como um forte estímulo para o interesse dos alunos de Física.

1. Relações entre a Oceanografia, a Física e a Tecnologia

Se pensarmos no oceano do ponto de vista de um sistema físico, o seu comportamento deverá ser regido pelas leis fundamentais da Física e condicionado pelo facto de se tratar de um fluido sobre um globo em rotação, trocando energia, massa e momento linear através da sua fronteira com a atmosfera.

A Oceanografia, cujo objectivo é essencialmente o estudo das características do sistema físico oceano e dos processos que nele têm lugar, tendo em vista a respectiva descrição e previsão, recorre aos diversos ramos da Física não só para basear os seus métodos de observação como para interpretar os fenómenos observados.

No quadro 1 apresenta-se uma síntese das relações entre quatro domínios da Física (Mecânica, Termodinâmica, Electromagnetismo e Acústica) e a Oceanografia, do ponto de vista das grandezas fundamentais, dos fenómenos e processos e dos métodos de observação.

Ao pôr aqui em relevo a estreita dependência da Oceanografia em relação às leis fundamentais da Física, convém não esquecer também o papel dinamizar que a interpretação dos fenómenos oceânicos observados tem tido no desenvolvimento da Física, nomeadamente no domínio da Dinâmica dos Geofluidos.

A Oceanografia como ciência organizada surgiu nos finais do século passado, tendo-se

(*) I Encontro Regional do Ensino da Física, SPF, Fevereiro 1988, Lisboa.

Quadro 1 — Relações Física / Oceanografia

OCEANOGRAFIA	FÍSICA			
	Mecânica	Termodinâmica	Electromagnetismo	Acústica
Grandezas Relevantes	Velocidade e direcção da corrente e do vento; oscilações da superfície livre e das superfícies de densidade constante	Temperatura, salinidade, densidade, calor específico, etc.	Radiação solar, radiação terrestre	Velocidade do som do mar
Fenómenos/Processos	Circulação induzida pelo vento; circulação termohalina; correntes de maré; agitação marítima; ondas internas; difusão molecular e turbulenta; mistura de massas de água	Circulação termohalina; difusão molecular; condução térmica; evaporação/ /precipitação; congelação/fusão	Cor do mar, turbidez/ /transparência	Canal do som
Métodos Observacionais	Bóia derivante; Correntómetro; Ondógrafo; Marégrafo; Anemógrafo	Termómetro; Termístor; Condutivímetro; Salinómetro	Tele-detecção (no domínio do visível, e das microondas; do infravermelho Transmissão de dados (por satélite)	Correntómetro e perfilador acústico; Sonar; ecosonda

devotado essencialmente à descrição dos aspectos de grande escala do oceano, tais como a distribuição e circulação geral das massas de água. Com o avanço da electrónica moderna, nomeadamente nos últimos 20 ou 30 anos, foram surgindo e sendo aperfeiçoados novos métodos de observação que permitiram obter uma melhor resolução no espaço e no tempo e pôr a descoberto fenómenos oceânicos que haviam passado despercebidos até então. São exemplos deste caso, as sondas CTD, que fornecem perfis verticais contínuos de temperatura e de salinidade, permitindo resolver as estruturas termohalinas de microescala, e os correntómetros automáticos ancorados, que registam séries temporais das correntes, da temperatura e da salinidade nos locais e às profundidades que se pretendam e durante longos períodos de tempo, possibilitando a avaliação das escalas de variabilidade dos campos dessas grandezas oceanográficas. O avanço tecnológico no domínio da detecção remota utilizando satélites, veio tornar possível uma amostragem global de parâmetros tais como a temperatura ou a topografia da superfície do mar, o que levou a uma melhor compreensão da variabilidade espacial e das relações entre fenómenos de diferentes escalas ou ocorrendo em regiões do Globo afastados entre si.

Para além da forte contribuição do desenvolvimento tecnológico para os métodos de observação oceanográfica, há ainda a considerar a importância do advento das tecnologias da computação na formação e no processamento (em tempo real ou diferido) das extensas bases de dados obtidas com os novos instrumentos e no desenvolvimento das técnicas de modelação numérica de processos oceânicos.

2. Alguns aspectos essenciais no estudo dos oceanos

Como não está na natureza deste Seminário um relato exaustivo dos tópicos de maior inte-

resse na Oceanografia dos dias de hoje, vamo-nos apenas referir aos processos oceanográficos mais importantes, para a compreensão dos quais são apenas necessários conceitos básicos da Física.

2.1. Balanço energético do oceano

A energia solar é a principal origem das forças motrizes do oceano e da atmosfera. Em cada minuto, o Sol fornece cerca de 2 calorias a cada cm^2 da superfície da Terra (Globo + + atmosfera) perpendicular aos seus raios, o que, em 10 dias, é equivalente à energia que seria libertada pela combustão de todas as reservas de combustível fóssil conhecidas na Terra! Mas esta energia não é distribuída uniformemente com a latitude e é essa a causa fundamental, directa ou indirectamente, da circulação tanto na atmosfera como no oceano. Estes dois sistemas funcionam como máquinas térmicas postas em marcha por esse gradiente latitudinal, existindo uma forte interacção entre eles.

A radiação solar que atinge o oceano é constituída essencialmente por radiação no domínio do visível (0.35-0.7 μm), tendo a maior parte dos ultravioletas e dos infravermelhos sido absorvida durante a travessia da atmosfera, respectivamente pelo ozono e pelo vapor de água. Ao incidir na superfície do mar, a radiação solar directa e a que provém da difusão pela atmosfera vão ser parcialmente reflectidas, mas há uma parte que penetra na água sem, no entanto, ultrapassar profundidades da ordem dos 100 metros, devido à absorção e à difusão pelas moléculas da água e pelas substâncias dissolvidas e em suspensão.

A difusão da luz solar causada pelas moléculas, sejam de água ou de gases, é uma difusão de Rayleigh, isto é, proporcional ao inverso da 4.ª potência do comprimento de onda da radiação incidente e portanto é muito selectiva, sendo a cor azul (comprimento de onda ~ 0.46 μm) muito mais difundida que a cor vermelha (c.d.o. ~ 0.70 μm). Isto explica por que razão a cor do mar, que resulta essencialmente da radiação solar retrondifundida pela água e da luz solar difusa que é reflectida na superfície do mar, é azulada.

Parte da radiação solar que é absorvida pelo oceano vai contribuir para o aumento da sua energia interna e, consequentemente, para o aumento da sua temperatura. Mas ao considerarmos um balanço de energia térmica para o oceano global e para um período longo (mais de 1 ano), não será de esperar uma variação de temperatura resultante, e portanto isso significa que aquele ganho de energia por absorção terá de ser compensado por uma perda de uma quantidade de energia equivalente, sob a forma de radiação electromagnética ou outras formas de energia. Vamos então ver quais são os outros termos importantes desse balanço.

É evidente que o oceano ou a atmosfera, tal como qualquer corpo com temperatura diferente do zero absoluto, emitem radiação electromagnética, cuja «qualidade», expressa em termo de c.d.o., depende dessa temperatura (quanto menor a temperatura mais longos os c.d.o. da radiação emitida). Para a gama de temperaturas do Globo, essa emissão faz-se no domínio dos infravermelhos (portanto, radiação não visível), com um máximo próximo dos 10 μm. Então, no balanço energético para o oceano, temos de considerar uma perda de energia sob a forma de radiação infravermelha e que, em parte, é compensada pela que é enviada pela atmosfera, na mesma gama de c.d.o., para a superfície do mar.

Há ainda outros dois mecanismos que contam para o balanço de energia térmica do oceano global: o calor latente perdido por evaporação da água à superfície e as transferências de calor entre o oceano e a atmosfera por condução, estas existindo sempre que há um gradiente de temperatura entre os dois sistemas e originando instabilidades e consequente convecção turbulenta.

A Fig. 1 esquematiza o balanço de energia térmica do oceano, indicando (em unidades percentuais) as contribuições dos mecanismos principais nele envolvidos.

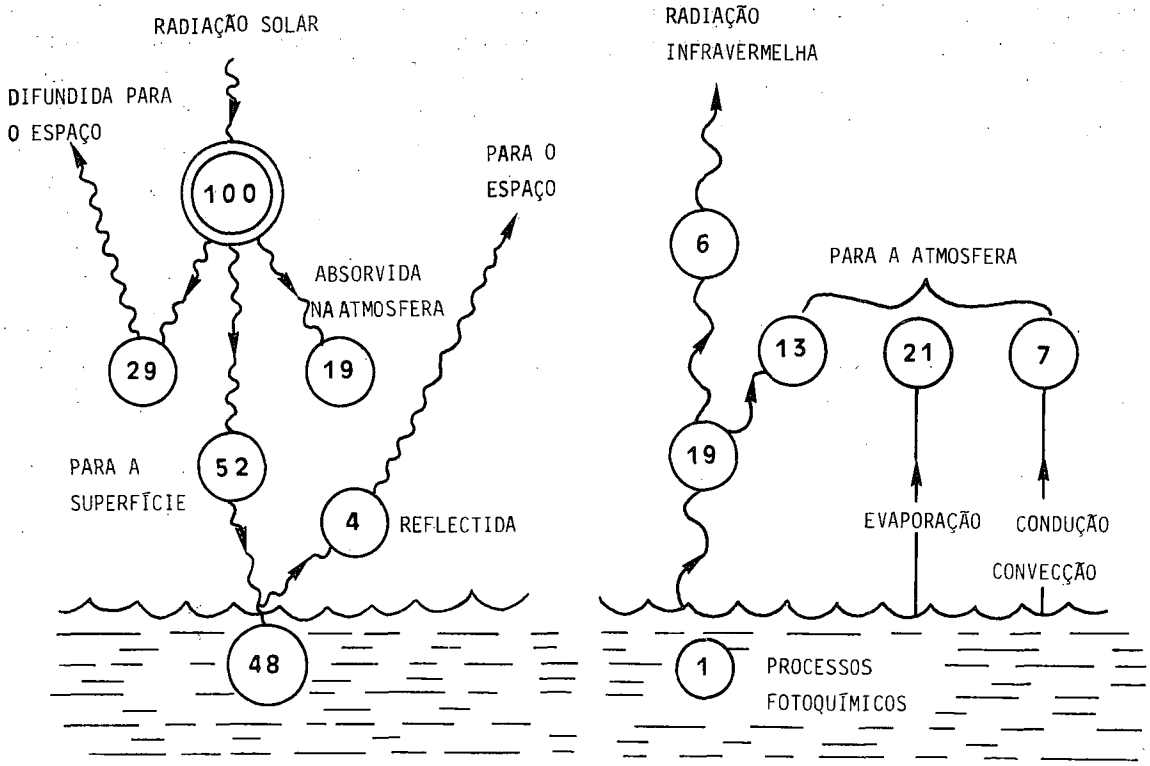


Fig. 1 — Balanço de energia térmica para o oceano global.

A Fig. 2 amostra a variação com a latitude dos vários termos do fluxo de calor (médias anuais) através da superfície do oceano e da sua resultante, indicando um ganho entre o Equador e os 30° de latitude, e uma perda nas latitudes superiores. Uma vez que as temperaturas médias na Terra se mantêm essencialmente constantes, temos de concluir que deve haver um transporte de calor das baixas para as altas latitudes, e esse transporte é assegurado tanto pelo oceano como pela atmosfera.

2.2. A circulação oceânica

Até agora só nos referimos aos termos de energia cuja acção se reflecte directamente na temperatura do oceano. Mas há outras formas de energia, nomeadamente, a energia que está associada ao fluxo de matéria e a energia mecânica, que teremos de considerar num balanço energético completo.

A energia mecânica, sob as formas potencial e cinética, provém, na sua quase totalidade, da transformação de parte da energia solar absorvida pelo sistema oceano-atmosfera. Uma vez que a radiação solar não é homogeneamente recebida por este sistema, vai haver um aquecimento diferencial entre o Equador e os Polos, o que vai gerar heterogeneidades no campo da densidade, induzindo uma circulação tanto no oceano como na atmosfera. Esta circulação geral de grande escala, é afectada pela rotação

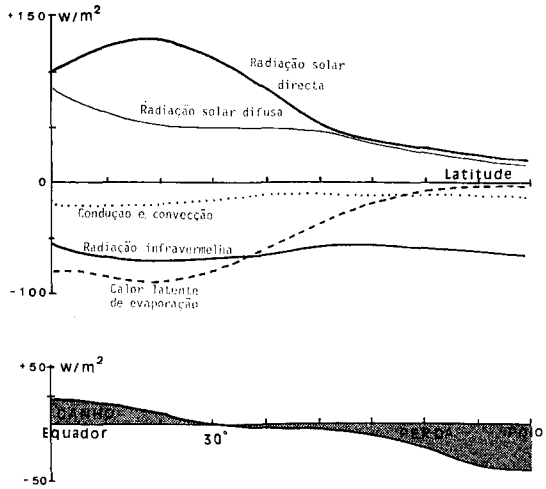


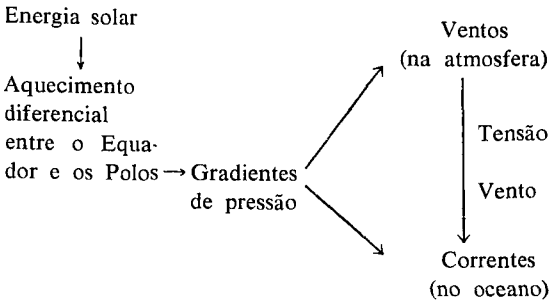
Fig. 2 — Variação latitudinal dos vários termos do balanço térmico.

da Terra, ou seja, o movimento é deflectido, por acção da força de Coriolis, para a direita no Hemisférico Norte e para o esquema no Hemisfério Sul.

A energia cinética que resulta da conversão da energia potencial disponível é cerca de duas ordens de grandeza maior para a atmosfera do que para o oceano. Deste modo, há uma parte que é transferida para o oceano através da tensão exercida pelos ventos na superfície do mar, induzindo uma circulação na camada superior deste.

Essencialmente, podemos dizer que a circulação geral oceânica tem duas origens: (i) a tensão do vento, cujo efeito directo afecta os primeiros 100 metros do oceano; (ii) os gradientes de pressão devido às heterogeneidades do campo da densidade que, por sua vez, dependem da não uniformidade nas distribuições da temperatura e da salinidade do oceano.

Podemos resumir esta cadeia de mecanismos que relacionam a energia solar com a circulação no sistema oceano-atmosfera do seguinte modo:



3. A Oceanografia e o Ensino da Física

É bastante evidente que se poderia despertar ou intensificar o interesse dos alunos pela Física, a nível do ensino secundário, se se introduzissem exemplos baseados em alguns fenómenos oceanográficos de que todos nos apercebemos e cuja explicação se poderá fazer em termos simples e com base nos conceitos e leis fundamentais da Física.

A título de exemplo, poderemos aqui referir o fenómeno do «upwelling» (afloramento) que tem lugar em várias zonas costeiras do oceano mundial, incluindo a costa ocidental portuguesa, e que tem repercussões não só na temperatura superficial da água como também na sua produtividade, constituindo esta um factor primordial para a riqueza pesqueira da região.

Este fenómeno resulta, essencialmente, da acção do vento sobre a água, conjugada com o efeito da rotação da Terra. A tensão do vento na superfície do mar provoca um arrastamento, por atrito, da camada superficial, sendo o movimento desta desviada para a direita (no caso do Hemisfério Norte) pela força de Coriolis. Por sua vez, esta camada vai exercer uma força de atrito na camada subjacente, sendo o movimento resultante nesta menos intenso e mais desviado para a direita do que na camada superior, e assim sucessivamente até profundidades de cerca de 50-100 m. O resultado desta corrente de «deriva», integrado para toda essa camada superficial, é um transporte de massa perpendicular à direcção do vento e para a direita (no Hemisfério Norte).

Se agora considerarmos este efeito de deriva na proximidade de uma costa, e se a direcção do vento for tal que «empurra» a água da camada superficial para o largo, então, por continuidade, terá de se dar uma subida da água sub-superficial (como se ilustra na Fig. 3).

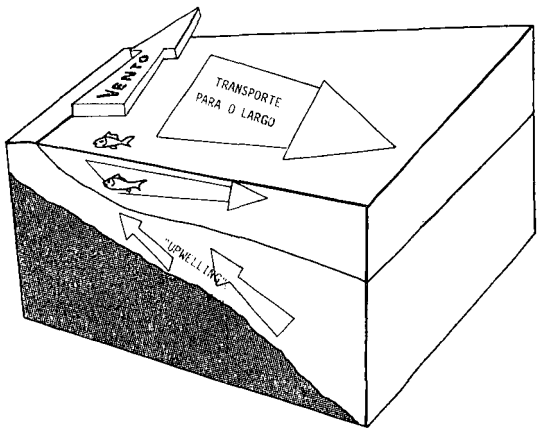


Fig. 3 — O fenómeno do «upwelling».

Esta, em geral, é mais fria e mais rica em nutrientes, o que se vai repercutir numa descida da temperatura de superfície na região costeira e um aumento da produtividade das águas.

Este fenómeno, que na costa ocidental portuguesa se faz sentir durante os meses de Verão, quando sopra a «nortada», ou na costa algarvia, quando sopra vento de Oeste, pode ser expli-

cado com base apenas nos conceitos de força de atrito e de força de Coriolis. Esta, por outro lado, pode ser ilustrada numa sala utilizando um disco a rodar com uma folha de papel colada, traçando-se neste uma «recta» (que, evidentemente, ficará curva se for desenhada com o papel a rodar) com a ajuda de uma régua fixa, como está esquematizado na Fig. 4.

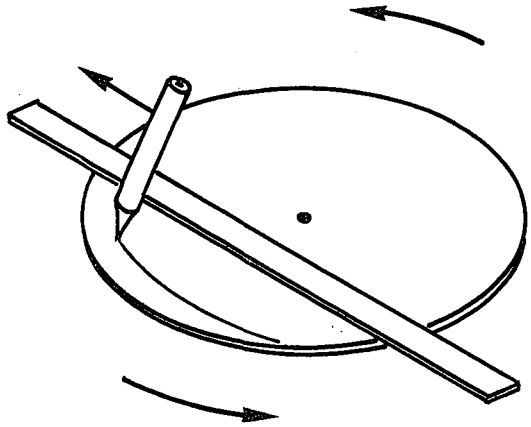


Fig. 4 — Ilustração da força de Coriolis.

4. Conclusões

Espera-se que esta panorâmica, se bem que muito superficial, do que é a Oceanografia e da sua ligação muito forte à Física, venha a encorajar alguns professores do ensino secundário a introduzirem um pouco da realidade do ambiente que nos cerca, e que faz parte da nossa vivência desde crianças, para demonstrar como a Física a pode explicar facilmente.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

— «Descriptive Physical Oceanography» (4.ª edição), 1982 — G. L. Pickard & W. J. Emery (Pergamon Press).

— «Introductory Dynamical Oceanography» (2.ª edição), 1983 — S. Pond & G. L. Pickard (Pergamon Press).

— «The Atmosphere and Ocean», 1986 — N. Wells (Taylor & Francis).

NATO advanced Study Institute on

APPLICATIONS OF STATISTICAL AND FIELD THEORY METHODS TO CONDENSED MATTER

22 MAY — 2 JUNE 1989, UNIVERSITY OF EVORA

THE MAIN INSTITUTE TOPICS WILL BE

- Classical and Quantum Phase Transitions and Tunneling
- Dynamical System and Pattern Formation
- Electrons in Disordered and Interacting Systems

Deadline for Application: 31th March 1989
Information: J. Carmelo
Departamento de Física
Universidade de Évora
Ap. 94
P-7001 ÉVORA CODEX (Portugal)
Tel: (66) 25572 / 3 / 4
Telefax: (66) 20775

Gaz. Fís., Vol. 11, Fasc. 4, 1988

Caos em Física (*)

J. SOUSA RAMOS
Laboratório de Matemática Experimental — DMFCUL
e CFMC - INIC

1. Introdução

Durante o tempo em que decorrem as nossas vidas, neste final do século, a ciência está transpondo um dos seus principais paradigmas, que consiste em buscar o regular, o simples, o periódico, ... Hoje procura-se o irregular, o complexo, o aperiódico, ... Os sistemas e as suas dinâmicas apresentam comportamentos que na maioria das situações reais, são bastante complicadas, caóticas, estranhas, fractais. Daí o objectivo da nossa oficina-laboratório ser o estudo dos sistemas dinâmicos caóticos com as suas soluções tipo atractores estranhos, caracterizados por apresentarem uma geometria fractal. Oficina-laboratório porque estas dinâmicas foram descobertas e são investigadas no computador, laboratório por excelência, simbiose da natureza com a experimentação humana. Aqui é necessário uma referência didáctica. É urgente o uso corrente dos computadores nas escolas, não como previlégio deste ou daquele projecto, mas como um material banal, normal, ao qual professores e alunos têm acesso de um modo natural sem mistificações nem paternalismos. Um conceito de caos (caos molecular) entrou em Física por Boltzmann quando procurava fundar a termodinâmica recorrendo a um tratamento estatístico da mecância de muitas partículas. Hoje a palavra caos está vulgarizada, e adjectiva um grande conjunto de situações. Na teoria moderna dos sistemas dinâmicos, o caos (caos determinístico) é um comportamento preciso e embora complexo pode-se encontrar ordem (ordem das árvores do caos, ver adiante). A medida da complexidade do caos é obtida por uma grandeza bem definida chamada entropia. O sistema dinâmico é dito caótico se a entropia é positiva, o que implica que o sistema tenha um número infinito de órbitas repulsivas, com pelo menos uma das órbitas de período diferente de uma potência de 2. O conceito de entropia foi introduzido em termodinâmica no século passado por Clausius, e em mecânica estatística por Boltzmann. Tomou novas formas na teoria da informação com Shanonn (1948) e em teoria ergódica com Kolmogorow (1954). Em 1967, Adler, Konheim e McAndrew estenderam esse conceito à dinâmica topológica chamando-lhe entropia topológica.

Por outro lado, Lorenz em 1963 [1], estudando aproximações às equações de Navier-Stokes que descrevem os fluidos, e Ruelle-Takens (1971) [2] numa tentativa de descrever a turbulência, chamam a atenção para as soluções de equações diferenciais ordinárias ditas de atractores estranhos, onde o comportamento assimptótico é bastante complexo. Conjuntos limite estranhos haviam sido estudados no final do século passado por Cantor, von Koch, Hilbert, Klein, Poincaré, ..., em diversos contextos da matemática. Mandelbrot [3] a partir de 1975 enumera sistematicamente as situações físicas onde estes conjuntos surgem na natureza. Chama-lhes objectos e fenómenos fractais e hoje são vistos e estudados por toda parte. Uma outra pista para novos objectos e fenómenos para investigar, ver e ensinar, surgiram por volta de 1960 com von Neumann e Ulam — os autómatos celulares, procurando modelos matemáticos simples com capacidade de auto-organização. Recentemente o seu estudo tem sido sistematizado e divulgarizado por Wolfram [4].

Aqui, a nossa preocupação é dar sugestões e algoritmos para a introdução de uma prática

---

(*) I Encontro Regional do Ensino da Física, SPF — Fev./88, Lisboa.

experimental destas novas fenomenologias no ensino secundário.

2. Linear — Não-linear

A maioria dos fenómenos naturais são não-lineares. Matematicamente a diferença essencial entre linear e não-linear é que para uma equação linear, quaisquer duas soluções podem ser adicionadas para formar uma nova solução — *princípio de sobreposição*. A maior parte da matemática conhecida pelos físicos é linear, como a álgebra linear, a análise funcional, a análise de Fourier e de Laplace. Só em condições muito particulares os fenómenos são lineares, isto é, caracterizados por um comportamento regular, predizível e descritível por funções analíticas simples. Em geral, os fenómenos são não-lineares, complexos, turbulentos, irregulares ou caóticos. No entanto, é preciso não confundir uma condição necessária, a não linearidade, com condições suficientes para um sistema revelar comportamento turbulento ou caótico. Assim, temos muitos sistemas que, embora não-lineares, apresentam comportamentos com descrições analíticas simples. Por exemplo, o movimento planar do pêndulo, que é descrito pela seguinte equação diferencial ordinária de 2.ª ordem deduzida das leis de Newton:

$$d^2\theta(t)/dt^2 + (g/l)\sin\theta(t) = 0,$$

com as variáveis com o significado habitual, é uma equação não linear. Vulgarmente, considera-se a aproximação linear, regime de pequenas oscilações, caso em que a solução geral é descritível em termos de funções circulares, $\theta(t) = \phi_0 w^{-1}\sin(wt) + \theta_0\cos(wt)$, onde θ_0 e ϕ_0 são a posição e a velocidade angular inicial, e $w = \sqrt{g/l}$ a pulsação. No entanto, o caso não linear também pode ser tratado analiticamente dando soluções explícitas em termos de funções elípticas. Qualquer equação diferencial ordinária de ordem k, pode ser transformada num sistema de equações diferenciais de 1.ª ordem autónomas (isto é, independentes da variável «temporal» que parametriza as órbitas). Assim obtém-se no exemplo considerado, o sistema dinâmico:

$$\begin{cases} d\theta/dt = \phi \\ d\phi/dt = -(g/l)\sin\theta \end{cases}$$

ou, o que é o mesmo, o campo de vectores de componentes $(\phi, -g/l\sin\theta)$ no espaço de fase (θ, ϕ).

Em dimensão 2, facilmente se prova não existirem órbitas com um comportamento complexo. No plano, ou temos pontos singulares, (zeros de campos de vectores, $d\theta/dt = d\phi/dt = 0$), órbitas fechadas (ciclos limite), ou órbitas que convergem ou divergem a partir destas. Se para obter complexidade não basta a não linearidade, que é preciso mais? Continuando com o sistema dinâmico anterior, vamos juntar um termo de força de fricção $a\,d\theta/dt$, dando

$$\begin{cases} d\theta/dt = \phi \\ d\phi/dt = -a\phi - (g/l)\sin\theta \end{cases}$$

o qual é ainda insuficiente para provocar a desejada complexidade.

3. Atractores estranhos

Que sucederá às órbitas se forçarmos o sistema por uma força externa periódica, $b\cos(vt)$, resultando o sistema dinâmico:

$$\begin{cases} d\theta/dt = \phi \\ d\phi/dt = -a\phi - (g/l)\sin\theta + b\cos\tau \\ d\tau/dt = v \end{cases}$$

onde $\tau = vt$? Aqui, os métodos analíticos são incapazes de qualquer descrição. Recorre-se então a novos métodos que tem surgido ultimamente, e podem ser rotulados de matemática experimental. Associando a teoria qualitativa dos sistemas dinâmicos, dinâmica simbólica e dinâmica topológica, à análise numérica, à teoria ergódica, à álgebra computacional e à computação gráfica, a matemática experimental desenvolve métodos próprios, descobrindo, experimentando e desenvolvendo a fenomenologia dos sistemas complexos (turbulentos, caóticos, estranhos, fractais, ...). Assim discre-

tizando o sistema dinâmico anterior, considerando o método de Euler (substituição das derivadas por razões incrementais e transformação em um processo interativo) vem:

$$\begin{cases} \theta_{k+1}=\theta_k+h\phi_k \\ \phi_{k+1}=\phi_k+h(-a\phi_k-c\sin\theta_k+b\cos\tau_k) \\ \tau_{k+1}=\tau_k+vh \end{cases}$$

com $c=g/l$. Um programa iterativo simples, permite estudar experimentalmente a complexidade e diversidade das dinâmicas que o sistema apresenta quando se variam a, b, c e v, (por exemplo, $a=0.3$, $b=4.5$, $v=0.6$ e $c=4$), Fig. 1. O comportamento apresentado pelo sistema é o de um *atractor estranho*, quaisquer que sejam as condições iniciais. O sistema assimptoticamente apresenta ou cai sempre no mesmo tipo de figura limite, a qual é estranha. A estranheza é resultante das irregularidades, fraccionamento (fractal) da forma geométrica da figura. São estes objectos estranhos, fractais que são as soluções típicas da natureza e da matemática dos sistemas dinâmicos. A sua geometria, topologia, propriedades ergódicas e dinâmicas, começam a ser estudadas sistematicamente. A sua experimentação em física, química, biologia, engenharias, vai ocupar os laboratórios dos centros de investigação e produção dos próximos anos.

```
program pendulo; uses graph; const h:real=0.01;
var gd,gm, u,v:integer; x,y,x1,a,b,c,e,z:real;
procedure fase; var i:integer;
 begin x:=0.5; y:=0.3; z:=0;
    for i:=1 to 20000 do begin
    x1:=x+h*y; y:=y+h*(-a*y-c*sin (x)+b*cos (z));
    z:=z+h*e; x:=x1; u:=trunc(x*3+200); v:=trunc(y*10+100);
    putpixel(u,v,1); end; end;
begin gd:=detect; gm:=1; initgraph(gd,gm,''),
 a:=0.3; b:=4.5; e:=0.6; c:=4; fase; readln; closegraph; end.
```

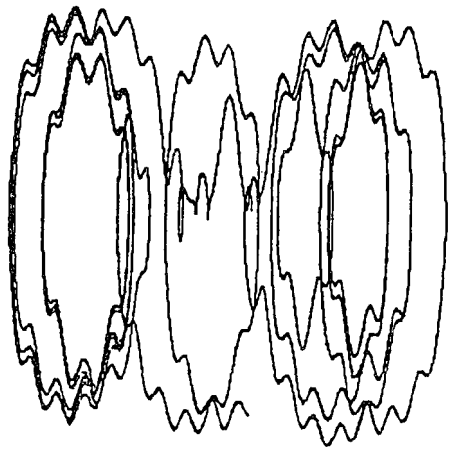


Fig. 1 — Atractor estranho do pêndulo.

Resumindo, o que introduziu a complexidade além da terceira dimensão, foi o duplo aspecto de contracção e expansão (hiperbolicidade), introduzida pela existência de termos positivos e negativos (onde pelo menos um é não linear), no campo de vectores.

4. Aplicações do plano

Embora nos sistemas dinâmicos contínuos exista a necessidade da terceira dimensão (além da não-linearidade), para se obter as soluções complexas, podemos seccionar o espaço tridimensional por um plano e estudar a aplicação induzida nesse plano pelos pontos de intersecção das órbitas contínuas com ele. Assim, partindo de um ponto P_0 do plano e comum a uma órbita, a aplicação anterior, dita de Poincaré, aplica o ponto P_0 num outro P_1, obtido com o 1.º retorno da órbita ao plano. Note-se que, se a dinâmica tem uma órbita fechada, a aplicação de Poincaré terá um ponto periódico de período 2, os pontos P_1 e P_2 de intersecção da órbita fechada com o plano. Assim propriedades topológicas sobre o tipo de órbitas do campo de vectores tridimensional, como órbitas fechadas e atractores estranhos, transferem-se em propriedades topológicas sobre o tipo de pontos periódicos e aperiódicos

de aplicações do plano R^2 em R^2. Consideremos o seguinte exemplo (Fig. 2):

$$\begin{cases} x_{k+1}=1-ax_k^2+y_k \\ y_{k+1}=bx_k \end{cases}$$

com $a=1.2$, e $b=0.3$.

5. Aplicações do Intervalo

Um estudo exaustivo de todos os tipos de órbitas do tipo de atractores estranhos, no caso dos campos de vectores, ou de pontos aperiódicos no caso das aplicações do plano, ainda não é possível. No entanto, quando uma das dimensões é atractiva, e na descrição por uma aplicação de $R^2 \to R^2$, o sistema comporta-se assimptoticamente como se fosse de $R \to R$. Torna-se então possível uma redução da descrição a aplicações do intervalo $I=[0, 1]$ sobre ele próprio. Deste modo se vê como em sistemas unidimensionais, com a dinâmica descrita por uma aplicação não-linear, também possui a complexidade das soluções tipo atractor estranho. O modelo mais simples, mas só por si, capaz de encerrar toda uma família infinita de dinâmicas complexas é dado pela aplicação $f_b(x)=4bx(1-x)$ com $x \in I=[0, 1]$. No caso unidimensional os resultados são completos se recorrermos à dinâmica simbólica. Fixemos um valor de b, altura da parábola. Para cada valor inicial x_0 obtém-se por iteração a órbita numérica $x_0, x_1, \ldots, x_i, \ldots$ com $x_i=f_b^i(x_0)=f_b(x_{i-1})$, Fig. 3.

```
program henon;          uses   graph;
 const  A:real=1.2;  B:real=0.3;  N:integer=1000;
 var  gd,gm,i,u,v:integer;     X,Y,X1:real;
begin          gd:=detect;  initgraph(gd,gm,'');  line(0,0,600,0);
   line(600,0,600,200);  line(600,200,0,200);  line(0,200,0,0);
  x:=0.2;     y:=0.1;            for i:=1 to N do   begin
    X1:=1-A*X*X+Y;          Y:=B*X;     X:=X1;
    u:=trunc(200*x+320);  v:=trunc(150*y+100);
 putpixel(u,v,1);  end;   readln;   closegraph;          end.
```

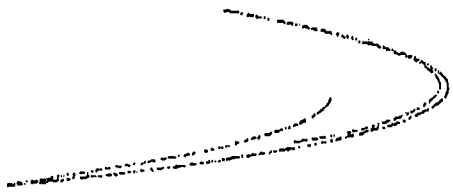


Fig. 2 — Aplicações do plano.

```
program parab;  uses  graph;  var   gd,gm,k,i:integer;  b,x,x1:real;
 procedure itera3;    begin
   for k:=1 to 8 do     begin   b:=0.8+k/40;
     for i:=1 to 400  do   begin   x:=i/400;     x1:=4*b*x*(1-x);
       putpixel(i div 2,round(200-200*x1),1);
       end;     line(0,200,200,0);     x:=0.5;
  for i:=1 to 75 do     begin     x1:=4*b*x*(1-x);
  line(round(200*x),200-round(200*x),round(200*x),200-round(200*x1));
  line(round(200*x),200-round(200*x1),round(200*x1),200-round(200*x1));
  x := x1;     end;   end;    end;
 begin  gd:=detect;  gm:=1; initgraph(gd,gm,'');  itera3; readln; closegraph; end.
```

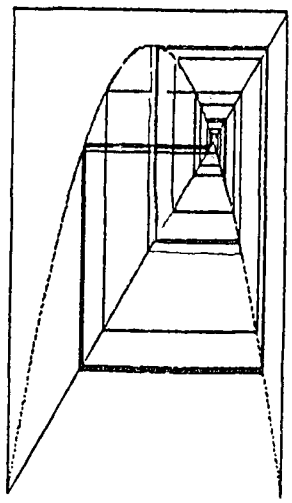


Fig. 3 — Iteradas da parábola.

Obtém-se uma codificação simbólica da órbita associando a cada ponto x_i um símbolo S_i; com $S_i=L$ se $f_b^i(x_0)<0{,}5$; $S_i=R$ se $f_b^i(x_0)>0.5$ e $S_i=C$ se $f_b^i(x_0)=0.5$. Deste modo podemos associar a cada valor de b, o conjunto das órbitas simbólicas possíveis — *árvore das condições iniciais* A_{ci} (Fig. 4).

Fig. 4 — Árvore das condições iniciais.

Como caracterizar simbolicamente os valores de b? Considera-se para cada b a órbita simbólica do ponto máximo $b=f_b(0.5)$. A sequência obtida RL ... caracteriza o valor do parâmetro b. Assim a árvore correspondente às órbitas dos possíveis b designa-se por *árvore do caos* ou das *sequências máximais* A_{SM} [5] (Fig. 5). Nem todos os vértices

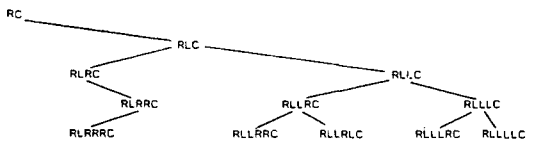


Fig. 5 — Árvore do caos.

nesta árvore são admissíveis. Dada uma sequência $S_1 S_2 \ldots S_k$ ela é admissível ou realizável como sequência correspondente a um valor de $b=f_b(0.5)$ se e só se for a *maior* de entre as suas *rodadas*: $S_2 S_2 \ldots S_k S_1$; $S_3 S_4 \ldots S_k S_1 S_2$; ...; (maior na ordem indicada pela árvore).

Um programa simples, que gera o diagrama dito de bifurcações (Fig. 6) permite ver experimentamente todo o jogo da criação de pontos periódicos atractivos e a sua destruição por conversão em repulsivos.

6. Autómatos celulares

As dinâmicas que temos vindo a considerar são descritas no espaço de fase contínuo e tempo discreto, e por dinâmica tem-se entendido a variação das variáveis espaciais (posições) em função do tempo. Para a maioria dos fenómenos naturais não é cómodo reduzir a dinâmica a mudanças de posição. Em geral temos variáveis tipo campo ϕ que são funções do espaço x e do tempo t. Sob o ponto de vista experimental o que é mais conveniente é partir de conjuntos discretos de valores para o espaço x, tempo t e para o campo ϕ. Assim a dinâmica passa a ser descrita por uma regra local f, que dá o valor:

$$\phi(x,t)=f[\phi(x-m,t-1),\ldots,\phi(x-1,t-1),\phi(x,t-1),\phi(x+1,t-1),\ldots,\phi(x+m,t-1)]$$

dados

$$\phi(x-m,t-1),\ldots,\phi(x-1,t-1),\phi(x,t-1),\phi(x+1,t-1),\ldots,\phi(x+m,t-1)$$

e com m = inteiro pequeno (Fig. 7).

```
program bifurcacao;        uses graph;
var   gd,gm,k,i:integer;  b,x:real;
begin  gd:=detect; gm:=1; initgraph(gd,gm,''); line(0,0,600,0);
   line(600,0,600,200); line(600,200,0,200);   line(0,200,0,0);
  for k:=1 to 600 do    begin   b:=0.7+k/2000;  x:=0.5;
  for i:=1 to 75 do    begin        x := 4*b*x*(1-x);
   if i> 25 then putpixel(k,round(200-200*x),1);
 end;   end; readln;  closegraph;        end.
```

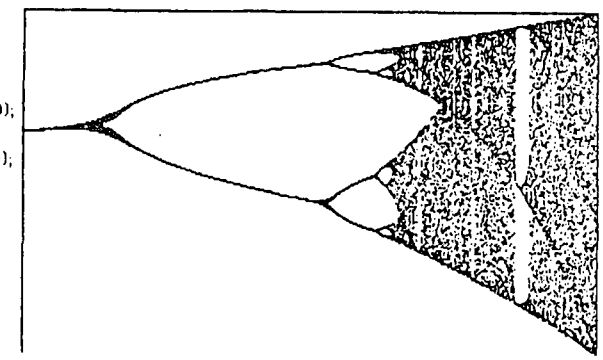


Fig. 6 — Diagrama de bifurcação.

```
program autcelulares;  uses  graph;
type  configuracoes = array[1..160] of integer;
      regra = array[1..8] of integer;
var  a,b:configuracoes; f:regra; gd,gm,c,co,s,r,k:integer;
procedure aut;  var  n,i,j:integer;
begin  for n:=1 to 8 do  begin  r:=trunc(c/2);
   if odd(c) then f[n]:=1 else f[n]:=0; c:=r  end;
  for i:=1 to 160 do  begin  r:=random(2);
   a[i]:=r;   putpixel(i+s,1,r+co); end;
 for j:=2 to 120 do  begin  for i:=3 to 158 do  begin
    k:=a[i-2]+a[i-1]+a[i]+a[i+1]+a[i+2]+1;  b[i]:=f[k];
    putpixel(i+s,j,b[i]+co);  end;  b[1]:=0;  b[159]:=0;
     b[2]:=0; b[160]:=0;  a:=b;  end;   end;
begin  gd:=detect;  gm:=1; initgraph(gd,gm,''); line(0,0,600,0);
line(600,0,600,200); line(600,200,0,200); line(0,200,0,0);  co:=8;
c:=20; s:=0; aut; co:=9; c:=50; s:=160; aut; readln; closegraph; end.
```

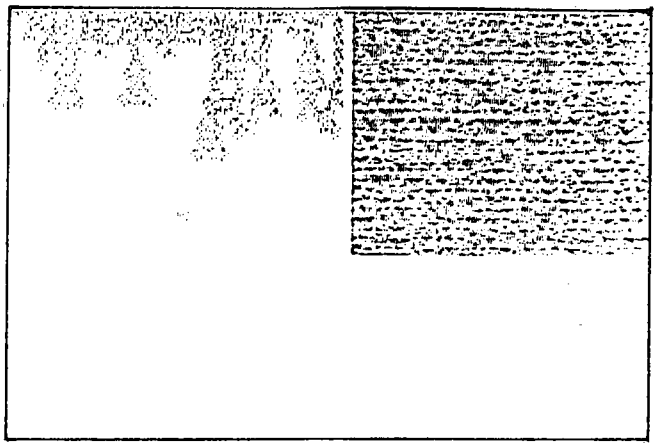
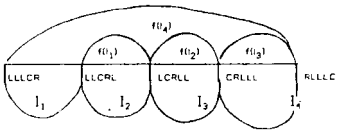


Fig. 7 — Autómatos celulares.

7. Entropia topológica

Como podemos então medir a complexidade topológica de uma dinâmica? Para cada período k existirão N_k pontos periódicos. Chama-se entropia topológica à grandeza $h_t = \lim_{k \to \infty} \log N_k^{1/k}$. Um modo possível de a calcular é através do maior valor próprio S_{max}, da matriz de Markov A associada, $h_t = \log S_{max}$. Esta é obtida como a matriz de adjacência do grafo associado à órbita no intervalo (Fig. 8):



$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. 8 — Grafo e matriz de Markov.

```
program liapunov;  uses  graph;
var  gd,gm,k,l:integer;  b,x,y,z:real;
procedure liap;  begin   for k:=1 to 600 do
  begin  b:=0.8+k/3000;  x:=0.9;  z:=0;
   for l:=1 to 50 do  begin  x:=4*b*x*(1-x);
   y:=4*b-8*b*x;  z:=z+ln(abs(y)); end; z:=z/75;
   putpixel(k,round(100-100*z),1);  end;  end;
begin  gd:=detect;  gm:=1;  initgraph(gd,gm,'');
line(0,0,600,0); line(600,0,600,200); line(600,200,0,200);
line(0,200,0,0);  liap;  readln;  closegraph;      end.
```

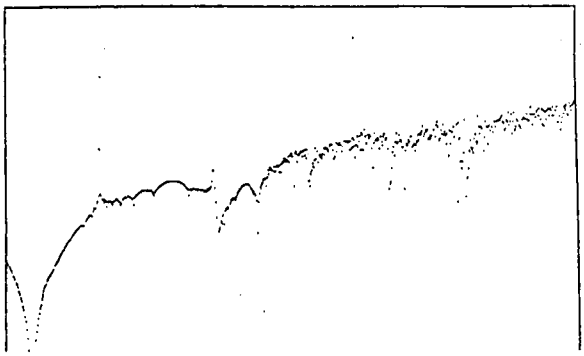


Fig. 9 — Expoente de Liapunov.

8. Expoentes de Liapunov

O expoente de Liapunov mede a taxa de divergência de trajectórias que partem vizinhas. Podemos no caso unidimensional defini-lo como (Fig. 9):

$$\lambda = \lim_{k \to \infty} (1/k) \sum_{i=0}^{k} \log Df_b(x_i),$$

9. Dimensão de Hausdorff

Os conjuntos limite não têm dimensão inteira. Ou têm comprimento nulo, embora não numeráveis (conjunto de Cantor) ou são bordos de áreas finitas, com comprimento infinito, curvas contínuas mas sem derivada em nenhum ponto (curvas de Koch, Fig. 10). São

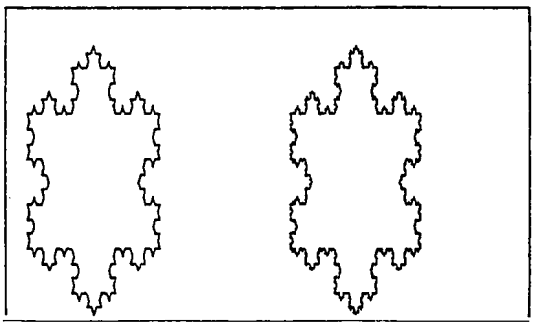


Fig. 10 — Curva de von Koch.

conjuntos ditos fractais [6], por serem fragmentados em todas as escalas em que são observados e por possuírem dimensão de Hausdorff não inteira. Esta foi definida em 1919, e podemos calculá-la do seguinte modo:

$$d_H = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log N\varepsilon}{\log 1/\varepsilon},$$

onde $N\varepsilon$ é o número mínimo de subintervalos necessários para cobrir o conjunto e ε é a unidade de escala considerada. Assim, o conjunto de Cantor tem $d_H(C) = \frac{\log 2}{\log 3}$ e a curva de von Koch tem $d_H(K) = \frac{\log 4}{\log 3}$.

10. Ensino do Caos, Atractores estranhos, Fractais e Autómatos celulares

Estes temas podem e devem ser introduzidos no ensino secundário. Qualquer deles pode ser encarado como um laboratório de experiências onde se pode aprender a descobrir «coisas» e a simular todo o tipo de fenómenos. Os alunos não precisam de conhecer mais do que o modelo que lhes é apresentado; os programas para o computador podem ser pedidos ao autor, os quais são simples e podem ser programados pelos próprios alunos. A experimentação, a procura de compreensão, a descoberta de regularidades dentro da complexidade, deve ser encarada como um jogo do qual se tira prazer e inteligibilidade.

REFERÊNCIAS

[1] E. N. Lorenz — *Deterministic nonperiodic flow.* Jour. of Atmosf. Sc., **20**, 130-141 (1963).

[2] D. Ruelle e F. Takens — *On the Nature of Turbulence.* Comm. Math. Physics, **20**, 167-192 (1971).

[3] B. M. Mandelbrot — *The Fractal Geometry of Nature.* W. H. Freeman and Company (1982).

[4] S. Wolfram — *Twenty Problems in the Theory of Cellular Automata.* Physica Scripta T.°, 170--183 (1985).

[5] J. Sousa Ramos — *Dynamics Tree and the Chaos Order* CFMC-E8/82 (1982).

[6] H.-O. Peitgen e P. H. Richter — *The Beauty of Fractale* Springer-Verlag (1986).

Quotas da SPF

Prezado sócio: se ainda não pagou as suas quotas para o ano de 1989, agradecemos que o faça o mais rapidamente possível junto da respectiva Delegação.

Assegurará desta forma melhores condições para o planeamento e expansão das actividades da Sociedade, bem como a recepção regular da Gazeta de Física.

Quotas: não estudantes ... 2000 Escudos
estudantes ..... 750 Escudos

Comentário sobre a mesa-redonda subordinada ao tema «A Reforma do Ensino da Física» (*)

VINCENT N. LUNETTA
College of Education, The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802, USA

O Encontro Regional de Lisboa sobre o Ensino da Física revelou um número de pessoas dedicadas que estão activamente empenhadas numa actividade profissional. Este profissionalismo e energia são razões para esperar que a proposta reorganização do ensino secundário conduza a uma melhoria importante da educação em Portugal. É muito importante discutir assuntos profissionais fundamentais neste tipo de forum aberto, e o diálogo na «Mesa Redonda» da última sessão voltou a revelar um alto nível de preocupação e empenhamento por parte dos participantes.

É normal que a proposta reorganização do ensino cause alguma preocupação. As mudanças que ocorrerão deverão ser importantes e baseadas em necessidades justificadas. Certamente que não serão impostas modificações em campos complexos como a educação, apenas pelo prazer de mudar. A preocupação com a mudança é natural e é importante os profissionais exprimirem as suas posições reflectidas sobre quais as modificações mais importantes e como é que elas deverão ser implementadas e mantidas. Até este momento, parece haver relativamente pouco empenhamento extensivo das comunidades das ciências de educação no desenvolvimento de elementos das mudanças propostas, mas devemos ter presente que a primeira versão do documento foi publicada há muito pouco tempo. Devemos olhar para as mudanças propostas não só como um importante desafio mas como uma oportunidade para influenciar o desenvolvimento de uma importante instituição em Portugal que marcará o ensino e os estudantes durante muitos anos. A reorganização proporciona algumas excelentes oportunidades em que os professores de ciências podem desempenhar um papel condutor especialmente importante. Eles podem fazer notar a quem toma decisões a importância da obtenção de dados e de serem tomadas decisões informadas e baseadas no que melhor sabemos sobre a aprendizagem, sobre os objectivos que temos para o ensino e sobre a sociedade portuguesa de que as escolas fazem parte.

Existem muitos tópicos profissionais que podem ser identificados como especialmente críticos na educação no secundário em Portugal neste momento. Grupos profissionais responsáveis deverão identificar e clarificar esses tópicos e, subsequentemente, tomar posição sobre eles e dar recomendações específicas. (Numa sociedade pluralista e democrática, se os grupos profissionais não clarificam os tópicos complexos e não assumem posições responsáveis em relação a eles, não é razoável esperar que a sociedade ou um governo *descobrirão* as soluções óptimas).

Algumas sessões do Encontro e o questionário distribuído pelos organizadores do mesmo referiam-se a questões importantes da sequência e integração do curriculum. Para quebrar as barreiras humanas que separam as disciplinas científicas, alguns propuseram vários tipos de ciência unificada. Assim, era natural e importante discutir a ciência interdisciplinar. Contudo, no contexto de todas as questões impor-

(*) Comunicação ao I Encontro Regional de Lisboa sobre o Ensino da Física, Vide Gaz. Física, **11**, 41-55 (1988).

tantes da educação no secundário, não seria apropriado dispender demasiada energia na forma que a integração deverá assumir. (Com formação apropriada dos docentes, recursos curriculares e apoio, é possível pôr a funcionar vários modelos de integração. Também temos boas razões para acreditar que as mudanças que vão ser implementadas *não* terão a apoiá-las os recursos óptimos e o apoio na preparação dos docentes, mesmo no melhor dos casos. Esta realidade não deve inibir as mudanças apropriadas, mas exige cautela e cuidado. Em algumas sessões deste Encontro foram comentados os prós e contras da ciência integrada e por isso não me referirei mais a esse assunto aqui, excepto afirmar que seja qual for a forma que a actividade interdisciplinar assuma, é uma preocupação importante na introdução à ciência e deveremos continuamente procurar os métodos apropriados de encarar este tópico.

Os «leaders» da comunidade das ciências da educação, muitos dos quais eram visíveis no Encontro de Lisboa, demonstraram já evidência de muita energia e visão colectiva. Deverão encontrar meios de levar os seus grupos profissionais a identificar e desenvolver apoio colectivo a recomendações sobre a reforma da educação no ensino secundário. Este é um desafio e uma oportunidade extremamente importantes. É muito importante identificar e assumir posições sobre tópicos reformulados. Quais são os assuntos mais importantes a encarar? Aqui estão algumas possibilidades:

1. Como poderão ser identificados os docentes que proporcionam um ensino *de melhor qualidade* e promovidos pelo seu serviço profissional?

2. Como poderemos envolver os professores de melhor qualidade de uma forma mais directa na gestão profissional e administrativa das escolas?

3. Como poderemos caminhar para a realidade de uma educação profissional contínua e prolongada que saliente e desenvolva conceitos, pedagogia e qualidades de chefia?

4. Como poderemos caminhar para a realidade de condições de trabalho mais interessantes nas escolas, de modo que pais, professores e estudantes possam passar mais tempo na escola e tenham orgulho dela e das aulas?

5. O que poderemos fazer para inculcar nos professores, pais e alunos um maior sentido de «propriedade» da sua escola e do curriculum?

6. O que poderemos fazer para obter melhores meios nas escolas para apoiar actividades de laboratório e experiências com melhores e mais apropriadas tecnologias?

7. O que poderemos fazer para efectuar melhores experiências no curriculum que leve os estudantes e as suas comunidades a considerá-lo «relevante»? Isto deve ser feito em adição aos esforços contínuos para desenvolver conceitos mais apropriados e qualidades de resolução de problemas. Incluirá uma mais efectiva integração de aplicações de ciência, alternativas de carreira e tópicos em Ciência, Tecnologia e Sociedade.

8. O que poderemos fazer para encontrar melhores oportunidades e visibilidade para o envolvimento dos estudantes em ciência e em actividades escolares com significado? Por exemplo, as Olimpíadas da Física que foram salientadas na sessão final do Encontro, são extremamente importantes para os estudantes e comunidades envolvidas. Serão provavelmente um «ponto alto» nas suas carreiras escolares no ensino secundário, e actividades deste tipo deveriam tornar-se uma parte mais regular e central do curriculum. Como poderemos promover mais actividades apropriadas deste tipo?

Texto traduzido do inglês por F. PARENTE

Gaz. Fís., Vol. 11, Fasc. 4, 1988

O Universo da Física Subnuclear

JOÃO PULIDO
Centro de Física da Matéria Condensada
Av. Prof. Gama Pinto, 2, 1699 Lisboa, Codex, Portugal

1. Das moléculas às partículas elementares

Se considerarmos a evolução da Física no nosso século poderemos talvez, como faz H. Pagels, identificar cinco níveis evolutivos distintos do conhecimento: moléculas, átomos, núcleos, nucleões e «quarks». Muitas moléculas (a porção mais pequena destacável de uma substância) podem ser observadas ao microscópio óptico. Mas ao passar ao nível seguinte — o átomo — tal possibilidade desaparece por mais poderoso que seja o microscópio, porque só podemos «ver» um objecto se as suas dimensões forem maiores que um comprimento de onda da radiação usada. Ora o microscópio óptico usa luz visível: daí a sua limitação. Para prosseguir para além do nível molecular precisamos de diminuir os comprimentos de onda da radiação incidente. A maneira de o conseguir é usar feixes de partículas, como é o caso do microscópio electrónico, pois que a radiação associada aos electrões tem um comprimento de onda, mesmo para velocidade baixas, inferior ao da luz visível. Portanto, para observarmos a matéria a dimensões menores, precisamos de comprimentos de onda mais curtos, os quais se obtêm por aceleração de partículas até velocidades próximas das da luz. Assim, vai a matéria revelando a sua estrutura interna — primeiro o átomo com Ernest Rutherford em 1911, depois o núcleo e os seus constituintes, os nucleões (protões e neutrões) — graças à construção dos primeiros aceleradores de partículas em 1932 com Sir John Cockroft e E. S. Walton. O aperfeiçoamento e a progressiva sofisticação dos aceleradores de partículas permite nos anos 60 atingir o nível seguinte de estrutura — o dos constituintes dos nucleões que são os «quarks». Repare-se na longa marcha percorrida na compreensão da estrutura da matéria: a imensa diversidade de milhões de moléculas reduzida a cerca de uma centena de elementos atómicos e, num passo seguinte, a redução destes a três partículas (protões e neutrões no núcleo e electrões à volta). Nesta fase, em fins da década de 30, parecia restar apenas explicar a força nuclear que tão fortemente ligava protões e neutrões no núcleo. O caminho para o conhecimento da matéria parecia para alguns ter atingido o seu nível último de perfeição, por ter alcançado a característica mais desejada: a simplicidade. Mas eis que com o desenvolvimento tecnológico do pós-guerra este quadro simples e belo é destruído: novas partículas são descobertas e a sua proliferação parece não parar mais. É o começo da Física das Partículas.

Com a hipótese dos quarks e a sua confirmação experimental nos anos 60 atingiu-se um novo nível fundamental, a partir do qual toda a evolução é por agora apenas conjectural. Os quarks, que parece não existirem como partículas livres, são os constituintes dos chamados hadrões, de que o protão e neutrão eram os únicos exemplos conhecidos até 1947. Para além dos hadrões (partículas com estrutura interna), outra classe de partículas constituintes existe no estado livre e que não revelou até agora componentes internas — são os leptões, mais leves em geral, não afectados pelas interacções nucleares e de que o electrão é um exemplo. O nível fundamental até hoje atingido subdivide-se em dois grupos: os quartks e os leptões.

A interacção que liga os quarks para formar os nucleões e hadrões em geral é a mesma que liga os nucleões no núcleo. A única diferença está, como vimos atrás, na escala a que ela é observada: para certas gamas de comprimentos de onda vemos no núcleo protões e neutrões, para gamas mais baixas vemos distâncias mais pequenas, ou seja, só vemos quarks. Tal como

as forças eléctricas e magnéticas se podem considerar associadas a uma partícula — o fotão (partícula de luz que se move à velocidade de 3×10^5 km s^{-1}), também a força nuclear está associada a uma outra partícula: o gluão. Fotões e gluões, mediadores de interacções (electromagnética e forte), são partículas muito especiais: têm massa nula e só podem portanto existir movendo-se à velocidade da luz, de acordo com a Relatividade Restrita de Einstein. Não são constituintes da matéria: são os bosões, por oposição aos fermiões atrás mencionados. Bosões e fermiões são distinguíveis uns dos outros pelas suas propriedades quânticas. Os bosões sem massa, dos quais se conhecem até agora apenas o fotão e o gluão, foram associados a um conceito muito importante da Física Moderna: o conceito de simetria que vamos seguidamente examinar.

2. Simetrias, complementaridade, simetrias de «gauge»

O conceito de simetria pode ser tornado claro através de um exemplo: a experiência da difracção de electrões através de duas fendas, que é também a melhor demonstração da natureza ondulatória da matéria. Nesta experiência um feixe de electrões proveniente, por exemplo, de um filamento de tungsténio aquecido passa através de duas fendas num alvo, contando-se depois o número de electrões que atingem um segundo alvo (Fig. 1). Se mantivermos apenas um dos orifícios aberto, a distribuição de electrões obtida no segundo alvo é E_1 ou E_2 consoante o orifício. Se no entanto abrirmos simultaneamente os dois orifícios, a distribuição de electrões forma um padrão de difracção (curva E) com picos e vales alternados, ou seja uma interferência, característica exclusiva dos fenómenos ondulatórios. Note-se que se os electrões se comportassem como projécteis macroscópicos, a sua distribuição no alvo seria $E_1 + E_2$. Eles são de facto detectados como partículas reais e após muitas detecções individuais, verifica-se que a distribuição é E, evidenciado o comportamento dos electrões como ondas. É fácil reconhecer que as curvas E_1, E_2 e E, obtidas à custa da detecção de muitos electrões, representam em cada caso a probabilidade (ou mais exactamente a densidade de probabilidade) de se encontrar um electrão num dado ponto do alvo. Se no entanto quiséssemos testar o carácter corpuscular do electrão para saber se de facto o que passou nos orifícios foi uma partícula ou uma onda, em qualquer momento poderíamos fazê-lo: bastaria colocar um detector junto de qualquer um dos orifícios para «ver» os electrões. Mas assim destruiríamos o padrão de interferência E e obteríamos $E_1 + E_2$; o electrão é agora uma partícula! É este o dualismo onda-corpúsculo: há uma complementaridade, não podemos ter uma partícula e uma onda simultaneamente. O princípio em que se baseiam os aceleradores de partículas que brevemente referimos atrás é precisamente este: ao se acelerarem partículas a energia cada vez mais altas, a onda associada adquire comprimentos de onda cada vez menores permitindo ver distâncias cada vez mais curtas.

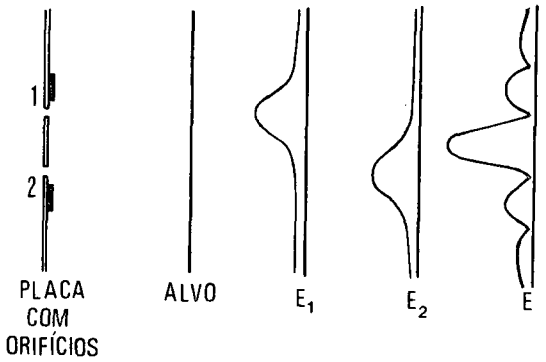


Fig. 1 — A experiência dos dois orifícios evidenciando o carácter ondulatório do electrão.

Mas voltemos à experiência dos orifícios e ao conceito de simetria: vimos que a interpretação desta experiência é a de que a onda electrónica se separa em duas ao passar pelo primeiro alvo e estas duas interferem entre si da mesma maneira que as ondas provocadas pela queda de duas pedras nas águas calmas de um lago. Onde as ondas estão em fase, a interferência é construtiva e muitos electrões são

contados no segundo alvo; onde as ondas estão em oposição de fase, a interferência é destrutiva e menos electrões são contados. Se as fases de ambas as ondas fossem adicionadas da mesma quantidade igualmente em todo o espaço, a diferença de fase em cada ponto não seria afectada e o mesmo padrão de interferência seria observado. Há portanto uma permanência do padrão, desde que a transformação das fases seja a mesma em todo o espaço da experiência. A invariância de uma propriedade perante uma transformação chama-se uma simetria. Note-se que se mudarmos a fase de uma das ondas apenas, já a figura de interferência vem alterada. A simetria deste sistema, que só se manifesta se a mesma transformação for aplicada nas fases em todo o espaço, é uma simetria global. Se pelo contrário a mudança de fase puder ser feita de modo arbitrário no espaço e no tempo, e verifica-se ainda a invariância do sistema, estaremos em presença de uma simetria local.

Suponhamos agora que queremos ir mais longe e pretendemos uma teoria que contenha uma simetria local: propriedades invariantes para transformações arbitrárias da fase das ondas electrónicas. É possível contruir uma tal teoria, mas ao fazê-lo introduz-se necessariamente um novo campo, ou seja uma nova partícula na teoria. Este campo, interactuante com o electrão, compensará as variações na diferença de fase, como que «absorvendo-as», de forma que o todo é localmente simétrico. Além disso o novo campo terá de ter alcance infinito, uma vez que não há limite para a distância a que as alterações de fase podem ser reconciliadas. Tal novo campo é precisamente o fotão. Esta simetria local, associada a uma partícula sem massa, chama-se uma simetria de «gauge» sendo o fotão o seu bosão de «gauge». É o mediador da interacção. A teoria de «gauge» do fotão em ligação com o electrão é a Electrodinâmica Quântica que descreve a interacção electromagnética.

A electrodinâmica quântica, estabelecida desde a década de 50, está pois associada a uma simetria local e exacta que traduz a invariância dos sistemas físicos envolvendo fotões e electrões, perante transformações locais feitas na fase do campo associado ao electrão — as transformações de «gauge». A electrodinâmica quântica foi testada com imensa precisão, o que constituiu um encorajamento para o desenvolvimento e aplicação das teorias de «gauge». O princípio das teorias de «gauge» foi então aplicado às interacções nucleares ou fortes (assim chamadas visto o acoplamento ou «força» da interacção ser muito superior ao da electromagnética). Surgiu assim a cromodinâmica quântica, teoria baseada numa simetria de «gauge» exacta, cujo bosão de «gauge», sem massa, é o gluão. A cromodinâmica quântica trata das interacções entre quarks e gluões, desempenhando os primeiros o papel homólogo aos electrões na electrodinâmica quântica. A nova teoria, criada nos anos 70, é bem mais complexa e não está tão bem compreendida como a anterior, sobretudo nos regimes de distâncias grandes, comparadas com as dimensões dos quarks: é o fenómeno atrás referido de os quarks não poderem aparentemente existir no estado livre — problema do confinamento. Os quarks são assim as únicas partículas capazes de sentir a interacção forte. Eles são os constituintes, como vimos anteriormente, dos chamados hadrões, partículas consideradas fundamentais até à década de 50 mas que mais tarde perderam o seu carácter privilegiado. A hipótese dos gluões, mais recente, data como vimos dos anos 70, tendo sido finalmente confirmada a sua existência em 1977. Embora a interacção forte fosse conhecida dos físicos desde muito antes, ela não era descrita em termos duma teoria de «gauge» com invariância local. Tudo se passava ao nível dos hadrões e o mediador da interacção era um deles — o *pião* ou *mesão* π, descoberto em 1947.

As peças fundamentais constituintes da matéria são pois, para os físicos deste final da década de 80, os quarks e os leptões, estes últimos, como o electrão, «insensíveis» às interacções fortes. Mas enquanto que o electrão é uma partícula electricamente carregada, por-

tanto com interacções electromagnéticas, há leptões que por serem electricamente neutros nem esta interacção sentem: são os enigmáticos neutrinos, já conhecidos desde os anos 30. Não está ainda estabelecido, meio século depois, se os neutrinos têm massa. Se a têm é extremamente reduzida — provavelmente são no máximo 20000 vezes mais leves do que o electrão, a partícula de menor massa conhecida. Não foi portanto devido à sua massa que o neutrino foi descoberto, nem à sua carga, pois não a tem. Mas que interacção é sentida por esta partícula, condição essencial para poder ser detectada? É a interacção fraca.

A hipótese do neutrino foi proposta em 1931 pelo físico Wolfgang Pauli para explicar a diferença de energia medida entre o neutrão e os produtos do seu decaimento quando no estado livre. Era então sabido que os neutrões livres não são estáveis «preferindo» desintegrar-se num protão e num electrão (declínio β, responsável pelo fenómeno da radioactividade):

$$n \rightarrow p + e^- + ?$$

A energia total do protão e electrão não era exactamente igual à energia (massa) contida no neutrão em repouso, mas sim ligeiramente inferior. O neutrino compensaria essa diferença reabilitando assim o princípio de conservação da massa-energia. A interacção em jogo é chamada interacção fraca.

A fim de entendermos um pouco o funcionamento desta interacção ao nível dos quarks, notemos em primeiro lugar que os protões e neutrões, os primeiros hadrões a serem descobertos, são compostos de três quarks, dois de tipo u e um de tipo d (no protão) e dois de tipo d e um de tipo u (no neutrão; Tabela I, pág. 144).

protão ~ u u d
neutrão ~ u d d

A carga eléctrica de u é $+2/3$ da carga do protão e a carga de d é $-1/3$ da carga do protão. Assim, o que se passa nesta interacção é antes de mais a passagem de um quark d a um quark u, o que traduz um aumento da carga de uma unidade. Mas a carga não pode ser gerada espontaneamente: a carga eléctrica total nos dois lados da reacção tem de ser a mesma. Ao criar-se uma carga positiva (correspondente à passagem de um quark u a um quark d) terá de criar-se simultaneamente uma negativa: é o electrão. A interacção em jogo terá de ser portanto mediada por uma partícula carregada e o facto de envolver o electrão como peça essencial permite-nos concluir não se tratar de interacção forte. Desde cedo se admitiu que o bosão mediador desta interacção (bosão W) teria de ter massa, na realidade uma massa bem mais elevada que a das partículas intervenientes. No entanto o facto de haver uma partícula de interacção com massa (ao contrário dos fotões e gluões) trazia problemas graves relacionados com a calculabilidade da teoria, uma vez que os acoplamentos das partículas entre si dependiam de uma massa. O ideal seria um bosão sem massa ligado a uma simetria exacta, de que a electrodinâmica quântica era o paradigma, mas tal possibilidade estava excluída. O modelo da electrodinâmica quântica levou mais uma vez a admitir que esta misteriosa interacção estaria também relacionada com uma simetria de «gauge», mas forçosamente não exacta, visto que o bosão W e o Z, seu correspondente neutro, têm massa. Tal facto tem a ver com o alcance extremamente curto da interacção fraca. Simetrias aproximadas são lugar comum na natureza (a simetria bilateral do corpo humano é apenas aproximada). Estas simetrias de «gauge» não exactas ou «quebradas» não têm alcance infinito, mas pelo contrário, numa situação limite de distâncias muito pequenas, tornam-se cada vez melhores, isto é, descrevem com maior precisão a realidade. Para essas distâncias muito pequenas (à escala das dimensões do protão e do neutrão), correspondendo a energias muito elevadas e comprimentos de onda muito baixos, o bosão W deverá parecer sem massa e ser pois tratado em pé de igualdade com o fotão. Ao fim de uma epopeia que durou quase três décadas, W e Z foram finalmente observados

em 1983 no CERN (Laboratório Europeu de Investigação Nuclear) em Genebra, Suíça.

Um novo conceito foi assim introduzido na formulação das teorias de «gauge»: a quebra espontânea da simetria, que partindo do pressuposto de uma simetria de «gauge» exacta para energias muito elevadas é alterada quando reduzimos a energia. Para altas energias, fotões (mediadores da interacção electromagnética) e W's e Z's (mediadores da interacção fraca) devem ser os bosões intermédios de uma única interacção unificada e diferirem apenas na carga. Porém, para energias mais baixas, uma componente desta interacção liga-se a uma simetria que se perde e o seu bosão intermédio deixa de ter massa, enquanto a outra componente se mantém ligada a uma simetria exacta e portanto a um bosão sem massa — o fotão. Na realidade a simetria não é destruída, mas apenas «escondida»: a teoria retém a sua simetria, mas os objectos por ela descritos não. A técnica segundo a qual é possível atribuir massa a alguns campos de «gauge», retendo embora uma simetria de «gauge» exacta ao nível da teoria, é o mecanismo de Higgs. Desta técnica resulta a introdução de uma nova partícula na teoria: o bosão de Higgs, electricamente neutro e que apenas sente a interacção fraca. O campo associado ao bosão de Higgs é um campo especial que tem a propriedade específica de não ser nulo no vácuo. Normalmente pensa-se ser o vácuo um espaço inteiramente vazio, mas na Física o vácuo é definido mais precisamente como um estado em que todos os campos têm a sua energia mais baixa possível. Para a maioria dos campos a energia é minimizada quando o valor do campo é zero em todos os pontos, por outras palavras, quando o campo é «desligado». Um campo de electrões, por exemplo, tem a sua energia mínima quando não há electrões. O campo de Higgs é invulgar a este respeito. Reduzi-lo a zero custa energia: a sua energia é a mais baixa possível quando o campo tem um valor uniforme em todos os pontos do espaço.

O modelo da realidade física prevalecente neste final dos anos 80, que acabámos de descrever sumariamente, é o chamado modelo «standard» (Tabelas I e II). A confirmação completa da teoria do modelo «standard» requer a observação experimental do bosão de Higgs.

TABELA I—*Os fermiões do modelo «standard». Os neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ), os mais enigmáticos, são neutros e podem não ter massa ou ser extremamente leves. As suas propriedades devem ter profundas consequências para a física das altas energias e para a Astrofisica/ /Cosmologia. Dos quarks, (u=up, d=down, c=charm, s=strange, t=top, b=bottom), o «top» não foi ainda observado experimentalmente, o mesmo acontecendo com o neutrino do τ. A unidade de carga eléctrica é a carga do protão.*

	1.ª geração	2.ª geração	3.ª geração	Carga eléctrica
Quarks	u	c	t(?)	+2/3
	d	s	b	−1/3
Lepitões	ν_e	ν_μ	ν_τ (?)	0
	e	μ	τ	−1

TABELA II—*Os bosões do modelo «standard». Os bosões fracos ($W^\pm$, Z^o) são respectivamente 87 e 99 vezes mais pesados que o protão e estão associados a uma simetria quebrada através do fenómeno de quebra espontânea ao qual se liga o Higgs, a grande incógnita do sistema. Gluões e fotões estão associados a uma simetria exacta.*

Bosão	Carga eléctrica	Interacção de que é mediador	Massa
Gluão	0	Forte	0
W+, W−, Z°	+1, −1, 0	Fraca	90 a 100 vezes a massa do protão
Fotão	0	Electro-magnética	0
Higgs	0	—	?

3. O Modelo «Standard»

O que se designa correntemente por modelo «standard» é, no sentido restrito, uma teoria consistente das interacções electromagnéticas e fracas e sua unificação a energias elevadas. É vulgar incluirem-se também as interacções fortes que representam no entanto um sector distinto da teoria e que, sobretudo no regime de grandes distâncias à escala dos quarks, carece ainda de compreensão — o problema do confinamento, como vimos. O mecanismo da quebra espontânea de simetria, solução engenhosa para o problema da massa dos bosões das interacções fracas (W e Z), não se encontra ainda experimentalmente testado, pois falta encontrar a sua peça essencial, o bosão Higgs. Existem alternativas para o caso de esta partícula não existir, sem comprometer o essencial do modelo «standard» restrito. Recorrem no entanto a estruturas teóricas bem mais elaboradas e acabam por prever a existência de estados físicos mais complexos.

Os bosões (W, Z, fotões, gluões e Higgs) representados na Tabela II são pois, no modelo «standard», os mediadores de interacção (caso dos quatro primeiros) ou ligam-se à geração de massa (Higgs). As «peças estruturais» do modelo «standard» são os fermiões (Tabela I) subdivididos em quarks e leptões, de que falámos atrás. Os primeiros são sensíveis a todas as interacções, os segundos apenas às fracas e electromagnéticas, excepto o caso dos neutrinos que, sendo leptões neutros, apenas são sensíveis às interacções fracas.

Resta referir um aspecto essencial no modelo «standard»: a enigmática repetição das gerações fermiónicas. Vimos que os quarks de tipo u e d são os constituintes dos protões e neutrões. No declínio β intervinham além disso os neutrinos e os electrões. Este conjunto de quatro fermiões (quarks u, d, neutrino e electrão) constitui a primeira geração completa de fermiões. Ainda nos anos 60, ao tempo da hipótese dos quarks e dos seus primeiros testes, foi em simultâneo apresentada a hipótese de um terceiro quark, o quark s ou estranho, constituinte fundamental dos hadrões estranhos. O modelo de quarks contava assim desde a sua origem com três quarks, u,d,s. Só bem mais tarde (1970) foi apresentada a hipótese dum quarto quark, o quark c ou «charm», para explicar a supressão relativa, ou seja a raridade, de certos processos físicos. Com o «charm», descoberto em 1974, o electrão pesado ou muão (partícula instável descoberta nos anos 40 nos raios cósmicos), um novo neutrino a ele associado (distinto do neutrino do declínio β) e o próprio quark s, forma-se uma segunda geração de fermiões que comporta apenas partículas instáveis. Possível excepção à instabilidade é o sempre enigmático neutrino — neste caso o neutrino do muão descoberto em 1962. O quark s, que a princípio parecia juntar-se a u e d no primeiro modelo de quarks, era assim visualizado diferentemente. Mas não era o fim da caminhada: a necessidade de uma nova geração não se fez tardar e em 1977 o quinto quark, o quark b ou «bottom», foi experimentalmente confirmado. Entretanto, pela mesma época um novo leptão carregado, mais pesado que o electrão e o muão tinha sido descoberto: o τ. Por consistência da teoria e para que a terceira geração seja homóloga da primeira e segunda, aguarda-se hoje com alguma expectativa a confirmação do quark «top» e do neutrino do τ. Tudo converge para que se observem. Poderão assim ficar completas três famílias homólogas de fermiões, das quais apenas a primeira é constituída pelas partículas estáveis que são também as mais leves.

Mas porquê esta repetição de famílias homólogas? Não ficaria o Universo completo com apenas uma família, tanto mais que as outras são instáveis? E haverá uma quarta família ou mais, eventualmente? Enquanto no passado dispunhamos de modelos que explicavam as massas dos hadrões, não dispomos hoje de nenhuma indicação para entender o espectro de massa dos quarks e leptões. O modelo «standard» não dá qualquer resposta para estas interrogações e chegamos assim ao seu limite: ele não pode ser a teoria última do Universo.

4. Para além do Modelo «Standard»

Os sucessos verificados com a unificação das interacções electromagnéticas e fracas, o comportamento dos acoplamentos forte e electro-fraco que para muito altas energias parecem aproximar-se e, dever-se-á dizê-lo, a paixão da mente humana pelas unificações, levaram ao aparecimento em 1973 do primeiro modelo para unificação das três interacções: fortes, fracas e electromagnéticas. Este modelo para a chamada grande unificação, devido a Sheldon Glashow, que muito contribuira para o modelo «standard», e ao seu discípulo Howard Georgi, tinha o mérito de apresentar uma previsão revolucionária e susceptível de verificação experimental: o decaímento do protão.

É fácil entender a ideia mestra da grande unificação: sendo a interacção forte e a electro-fraca descritas, como vimos, por teorias de «gauge» e aproximando-se os valores das respectivas constantes de acoplamento à medida que a energia aumenta (Fig. 2) é de esperar

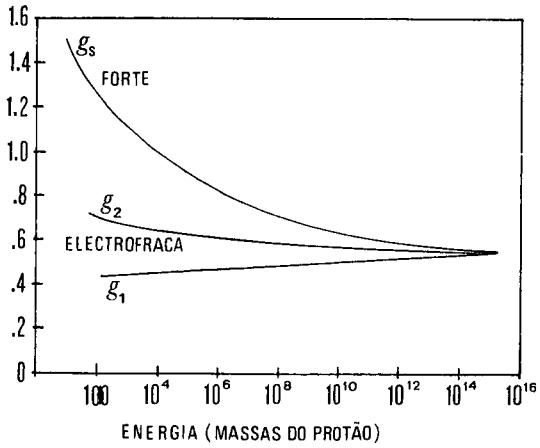


Fig. 2 — A grande unificação das interacções forte, electromagnética e fraca aqui representada na convergência das três constantes de acoplamento.

que os dois acoplamentos se possam unir. Para isso terá de haver algures. no sector de energias muito altas, uma nova teoria de «gauge» com bosões de «gauge». Essa teoria sofrerá uma quebra espontânea à escala da grande unificação e, tal como no modelo «standard», alguns dos seus bosões adquirirão massa enquanto que outros, entre os quais os gluões, fotão, W e Z permanecem sem massa. Esses bosões, de massa extremamente elevada, deverão assim ser os mediadores de uma interacção entre quarks e leptões que tem lugar a distâncias extremamente curtas. Por terem massas muito altas, a simetria associada a estes bosões de «gauge» é extremamente remota às distâncias a que conseguimos ver com os aceleradores do presente, tão remota que não é observável. Por via dos aceleradores é provável que jamais se consiga atingir tais distâncias. Estamos pois a descrever uma física possível a uma escala à qual interacções fortes, electromagnéticas e fracas perderam a sua individualdade, restando apenas uma interacção única, perante a qual quarks e leptões são necessariamente indistinguíveis. A escala a que tal ocorre era no modelo de Georgi-Glashow 5×10^{14} GeV (*) (1 GeV $\Leftrightarrow$ 1.782×10^{-24} g), equivalente a uma distância de 10^{-29} cm. Um tal fenómeno tem como consequência o possível desaparecimento dos quarks e a sua transformação em leptões, resultando assim no decaimento do protão. Toda a matéria, tal como a conhecemos, pode pois não ser estável. O tempo de vida médio de um protão, calculado no modelo de Georgi-Glashow, era de 10^{29} anos, muito maior portanto que a idade do Universo que é cerca de 10^{10} anos. Em princípio o decaimento do protão será pois observável: bastará para isso dispor de uma grande quantidade de determinada substância cujo número de protões se poderá calcular, colocar um detector em volta e aguardar a «assinatura» do acontecimento, isto é, a detecção do decaimento. Os resultados de mais de uma dezena de experiências realizadas ao longo da última década são inconclusivos e apenas permitem estabelecer que o tempo de vida do protão é superior a 6×10^{31} anos, excluindo assim o modelo de Georgi-

(*) A massa do protão corresponde aproximadamente a 1 GeV.

Glashow. A hipótese da grande unificação prevalece no entanto e será difícil alguma vez excluí-la.

Com o abandono do modelo mínimo para a grande unificação, muitos outros modelos têm proliferado, os quais evitam a perspectiva assaz desagradável para os físicos de não existir nenhum fenómeno, nenhuma física observável entre a escala de unificação electro-fraca e a de grande unificação. No entanto todos aqueles modelos são igualmente «bons» na medida em que estão de acordo com a fenomenologia observada e preservam aspectos essenciais da teoria, mas nenhum prevalece sobre qualquer outro.

As teorias de grande unificação sofriam de um problema essencial derivado da coexistência de escalas de energia completamente díspares: da escala do W e Z à escala da grande unificação existe um fosso correspondente a um factor 10^{13} no mínimo. Havia problemas de calculabilidade insolúveis, do tipo de a escala mais baixa sofrer correcções da ordem da escala mais alta, a menos que se fizessem ajustamentos nos parâmetros da teoria, afectando muitas casas decimais. Uma tal situação é verdadeiramente «flagelante» pois põe em causa a própria validade da teoria. A dificuldade foi resolvida pela introdução em 1981 de mais uma simetria matemática: a super-simetria que liga por uma correspondência biunívoca bosões e fermiões. Assim, se o mundo for supersimétrico, cada partícula conhecida terá de ter o seu parceiro supersimétrico: a cada bosão conhecido corresponderá um fermião e a cada fermião um bosão. Infelizmente não foi possível até agora fazer previsões únicas e consistentes sobre a massa dos parceiros supersimétricos e não há nenhumas indicações experimentais no sentido da sua existência. Todos os resultados obtidos pela experiência são compatíveis com o modelo «standard» aqui descrito.

Não fizemos até agora referência à quarta interacção conhecida no mundo físico, pois que não desempenhou papel relevante no desenvolvimento da física das altas energias, mas que foi de longe a primeira a ser conhecida: a interacção gravitacional. O velho sonho da unificação, aliado a progressos recentes (1984) na teoria de campo das «superstrings» (supercordas — entidades matemáticas unidimensionais) levou ao projecto extremamente ambicioso de estabelecer um esquema único, unificando as quatro interacções: gravitacional, fraca, electromagnética e forte. Embora tal realização parecesse inicialmente ao alcance quase imediato dos físicos, o caminho apresenta-se hoje bem mais espinhoso e tortuoso, caso ele seja possível. O problema reside fundamentalmente na multiplicidade quase ilimitada de modelos possíveis e sua arbitrariedade, todos eles compatíveis com a Física observada e incapazes, ao contrário do modelo «standard», de produzirem previsões específicas e testáveis pela experiência. As «superstrings» poderão descrever o mundo à escala da unificação das quatro interacções (escala de Planck de 10^{19} GeV) que é possivelmente superior à escala da grande unificação simples, mas a sua ligação com a física fenomenológica, ao contrário do que acontecia com a grande unificação, permanece ainda obscura.

5. Conclusão

Dispomos hoje de um edifício interpretativo das partículas elementares e suas interacções — o modelo «standard» — que funciona, na opinião de muitos, surpreendentemente bem. Falta, relembremos, testar uma peça essencial: o bosão de Higgs ou uma sua alternativa. Mas o modelo «standard» não prevê, como vimos, o número de gerações fermiónicas, não explica a sua repetição nem a sua massa, nem tão pouco nos revela porque funciona tão bem.

A descoberta do bosão Z°, partícula instável, foi para a primeira destas questões particularmente importante. Sendo electricamente neutro, pode decair em pares de neutrinos e anti-neutrinos de todas as gerações. O seu tempo de vida é uma medida do número de famílias, porque quanto mais gerações houver,

mais opções existem para o seu decaimento. Um grande número de gerações significará um tempo de vida mais curto. Uma medida muito cuidadosa do tempo de vida do Z° poderá ser feita no acelerador LEP (Large Electron-Positron Collider) em construção no CERN. Entretanto há resultados cosmológicos que sugerem ser o número de gerações quando muito de quatro.

Os novos aceleradores que, esperamos, hão-de ter os seus dias gloriosos na década de 90, vão explorar a Física desconhecida em duas frentes: a da precisão e a da energia. A medida rigorosa do tempo de vida do Z° é um exemplo do possível alargamento da fronteira da precisão. O trabalho de pesquisa do Higgs é outro. O LEP e o SLC (Stanford Linear Collider em Stanford, Califórnia que utiliza uma máquina preexistente, o SLAC) são aceleradores que vão explorar a fronteira de precisão. A fronteira da energia será explorada pelo LHC (Large Hadron Collider) que possivelmente utilizará as instalações do LEP e pelo SSC (Superconducting Super Collider) nos Estados Unidos, o maior a ser provavelmente alguma vez construído, ambos ainda em fase de estudo. Estes aceleradores deverão atingir uma escala de energia de 10 000 a 40 000 vezes a energia correspondente à massa do protão (Tabela III).

São estas as fronteiras da Física das Altas Energias. Uma discussão detalhada da Física a energias muito mais elevadas, como a da grande unificação ou a da escala de Planck, leva-nos necessariamente muito longe e é de utilidade prática questionável. Lembremo-nos que o desenvolvimento do conhecimento do universo físico mostra-nos que houve introdução de ideias novas, sempre que as anteriormente estabelecidas se revelavam incapazes de explicar fenómenos observados. Essas ideias novas produziam previsões testáveis pela experiência para além desses fenómenos observados. O caso do modelo «standard» é exemplar mas restam, como vimos, lacunas. Muitas teorias recentes constituem pelo contrário verdadeiros «saltos para a frente» pois que, sendo embora exercícios brilhantes, não explicam as lacunas

TABELA III—*Os principais aceleradores em construção e em projecto. São anéis de colisão de partícula-antipartícula com excepção do SLC que é um acelerador linear. Note-se que a energia máxima atingida é, no caso dos aceleradores electrão-positrão, muito mais baixa, permitindo no entanto estes um varrimento muito mais preciso do espectro da energia, dada a simplicidade estrutural do electrão relativamente ao protão.*

Acelerador	Laboratório	Partículas Aceleradas	Comprimento	Energia Máxima (1)	Data de Início
Tevatron	Fermilab, Batavia, Illinois, USA	Protões-antiprotões	7 Km	2 000	1987
SLC	SLAC, Stanford, Califórnia, USA	Electrões-positrões	3 Km	50	1988
UNK	Serpukhov, URSS	Protões-antiprotões	21 Km	6 000	⩾ 1994
LEP	CERN, Genebra, Suíça	Electrão-positrão	27 Km	200	1990
LHC (2)	CERN, Genebra, Suíça	Protão-antiprotão	27 Km	17 000	⩾ 1995
SSC (2)	USA, Dallas, Texas	Protão-antiprotão	85 Km	40 000	⩾ 1997

(1) Em unidades de massa do protão.

(2) Em projecto.

observadas e introduzem conceitos cuja ligação à realidade física não pode sequer ser testada. Julgamos que, mais do que nunca, a física teórica sofre hoje, no final dos anos 80, deste mal. Vale a pena, para terminar, citar Werner Heisenberg: «A teoria moderna (*) não se desenvolveu a partir de ideias revolucionárias que tivessem sido, por assim dizer, introduzidas nas ciências exactas a partir do exterior. Pelo contrário, as ideias novas surgiram a partir da investigação que tentava cumprir de uma forma consistente o programa da física clássica — elas são uma consequência da própria natureza desta».

BIBLIOGRAFIA

A seguinte lista de obras de divulgação científica não é de algum modo completa mas cobre totalmente os assuntos tratados neste artigo.

H. GEORGI — «A Unified Theory of the Elementary Particles and Forces», *Scientific American*, Abril (1981).

S. WEINBERG — «The Decay of the Proton», *Scientific American*, Junho (1981).

C. RUBBIA e S. VAN DER MEER — «The Search for Intermediate Vector Bosons», *Scientific American*, Março (1982).

E. BLOOM e G. FELDMAN — «Quarkonium», *Scientific American*, Maio (1982).

K. ISHIKAWA — «Glueballs», *Scientific American*, Novembro (1982).

C. REBBI — «The Lattice Theory of Quark Confinement», *Scientific American*, Fevereiro (1983).

H. HARARI — «The Structure of Quarks and Leptons», *Scientific American*, Abril (1983).

A. VILENKIN — «Cosmic Strings», *Scientific American*, Dezembro (1987).

D. SCHRAMM e G. STEIGMAN — «Particle Accelerators Test Cosmological Theory», *Nature*, **314**, 4 Abril (1985).

D. PERKINS — «Introduction to High Energy Physics», segunda edição, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1982).

H. PAGELS — «O Código Cósmico», Gradiva, Lisboa (1986); versão original: «The Cosmic Code», Pelican Books (1984).

(*) Referia-se à teoria quântica dos anos 20.

APEF — Associação Portuguesa dos Engenheiros Físicos

Mais uma sigla a fixar: Associação Portuguesa dos Engenheiros Físicos. Teve lugar no 23.º Cartório Notarial de Lisboa, a sua escritura pública no passado dia 30 de Setembro. Composta de entidades privadas (licenciados em Engenharia Física e alunos dos Cursos de Engenharia Física), a nível nacional, propõem-se ao desenvolvimento, cooperação e solidariedade inter-membros e inter-associações já existentes; ao fomento e defesa de interesses dos Engenheiros Físicos nos campos profissional, social e cultural; à promoção, reconhecimento e divulgação do ramo Engenharia Física como impulsionador de actividades técnico-científicas específicas, à luz dos países industrializados onde esta profissão aparece como dinamizadora das novas tecnologias; desenvolver relações com associações congéneres nacionais e estrangeiras, podendo para o efeito aderir a Uniões e Federações internacionais.

É portanto uma associação com vista ao progresso da Engenharia Física, estimulando os esforços dos seus associados em todos os domínios de actividade. Compõe-se de órgãos sociais (núcleos regionais e comissões especializadas) e tem a sua sede no concelho de Almada, instalada no «*campus*» da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Se do seu interesse contacte-nos:

Associação Portug. dos Engenheiros Físicos
Campus da FCT — Univ. Nova de Lisboa
Quinta da Torre, 2825 Monte da Caparica
Tel. 01-2954464 (ext. 0105), Telex 14542,
Fax 01-2955561

Gaz. Fís., Vol. 11, Fasc. 4, 1988

DLA – Um exemplo simples de simulação computacional em física

JORGE CARVALHO SILVA e CARLOS FIOLHAIS
Departamento de Física da Universidade de Coimbra

1. Introdução

O avanço da tecnologia dos computadores, nomeadamente a introdução no início da década de 80 dos chamados computadores pessoais, permitiu generalizar em física (por assim dizer, democratizar) a prática de simulações computacionais. Hoje é possível, tanto a físicos profissionais como a estudantes, programar um algoritmo de interesse físico num computador pessoal e extrair dos resultados conclusões sobre o comportamento do sistema natural que foi modelado.

A agregação limitada por difusão (conhecida pela abreviatura DLA, do inglês «Diffusion Limited Aggregation») constitui um exemplo simples de uma simulação computacional de um fenómeno físico, a qual não obstante a sua simplicidade, só foi introduzida em 1981 por Witten e Sander. A motivação destes autores foi a evidência experimental obtida em 1979 por Forrest e Witten que os agregados de aerosóis eram fractais. Nem sempre porém teoria e experiência concordam e nem sempre esse desacordo representa algo de trágico. Assim, embora a dimensão fractal característica do modelo de DLA para uma geometria tridimensional fosse muito diferente do caso estudado por Forrest e Witten, a DLA veio a revelar-se não só um modelo qualitativamente novo e portanto com interesse teórico, mas também aplicável, com uma ou outra modificação, a toda uma variedade de situações de interesse físico.

Vamos neste artigo descrever a técnica computacional utilizada para obter figuras de DLA, discutir os resultados da sua realização usando a linguagem Turbo Pascal num computador pessoal Mackintosh Plus e, finalmente, discutir os principais problemas em aberto assim como as possibilidades de comparação deste tipo de simulações com a experiência.

O trabalho foi realizado no âmbito da cadeira de Física Computacional do quarto ano do curso de Física da Universidade de Coimbra (ramo científico). Esta cadeira foi introduzida no ano lectivo de 1987-1988 com o intuito de familiarizar os alunos com a simulação computacional de leis físicas. Embora não se reclame nenhuma originalidade para este «trabalho prático», queremos realçar não só o facto de se basear em literatura relativamente recente mas também a perspectiva que abre para uma investigação mais aprofundada dos fractais. Um estudante pode por este meio familiarizar-se com hábitos e técnicas de investigação e percorrer todo o ciclo que vai da formulação de questões interessantes à comparação das respostas obtidas com os resultados publicados na literatura científica, passando pela aplicação das metodologias adequadas.

2. Técnica computacional

Considera-se uma rede num espaço a 2 dimensões (o número de dimensões é uma questão de conveniência de visualização e de rapidez computacional, sendo em princípio igualmente fácil considerar redes a 3 dimensões, mais realistas, ou até redes em hiper-espaços com $d > 3$). Coloca-se uma «semente» num ponto dessa rede. A semente é uma partícula inicial, a partir da qual se vai construir o agregado. Toma-se uma circunferência centrada na semente e cujo raio é grande comparado com a constante da rede. A constante da rede foi considerada igual à separação entre «pixels» no écran (que tem 322×512 pontos), e utilizou-se o valor inicial $r = 20$. É escolhido aleatoriamente um ponto dessa circunferência e larga-se daí uma partícula que se difunde pela rede (o caminho livre médio do passeio

aleatório é igual à constante da rede, embora se possam considerar caminhos livres médios maiores se se pretende acelerar o processo). Então uma de duas coisas pode acontecer: ou a partícula toca na semente, considerando-se a partir daí agregada, i.e. imóvel na posição de colisão, ou a partícula se afasta demasiado da semente, i.e. sai para fora de um círculo com um raio que é maior que o raio do círculo

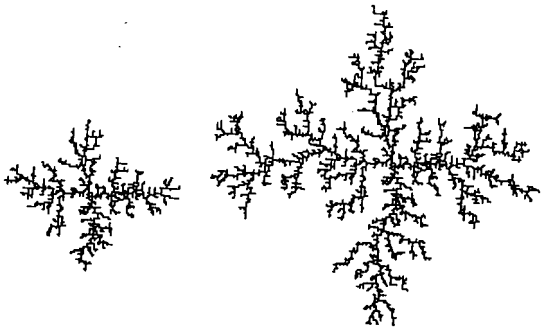


Fig. 1a—Número de capturas = 1139

Fig. 1b—Número de capturas = 3486

de partida. Neste último caso, a partícula é abandonada, lançando-se uma outra de uma posição aleatória da mesma circunferência de onde a partícula «perdida» tinha partido. Existe a possibilidade (muito pequena) de o processo de difusão continuar sem que a partícula toque na semente ou se afaste para muito longe. Um contador de iterações e uma condição de limite máximo para o número de iterações pode ajudar a acelerar o cálculo. O processo repete-se em seguida. O raio do círculo é aumentado à medida que o raio do agregado cresce. Os agregados obtidos por este algoritmo encontram-se representadas nas Figs. 1a), 1b) e 2a), correspondendo a uma rede quadrangular (Fig. 1) e a uma rede triangular (Fig. 2; pág. 153).

Atendendo ao grande tempo de cálculo necessário, foi-se guardando a informação obtida sobre o agregado numa ficha de dados de modo a que cada vez que se chamava o programa o processo de agregação recomeça no sítio onde tinha ficado, em vez de tudo voltar ao início.

As figuras obtidas por DLA são exemplos típicos de fractais aleatórios ou estatísticos. A dimensão fractal pode ser calculada por vários processos, obtendo-se aproximadamente o mesmo número (cada processo tem um certo erro associado). Utilizámos dois métodos diferentes:

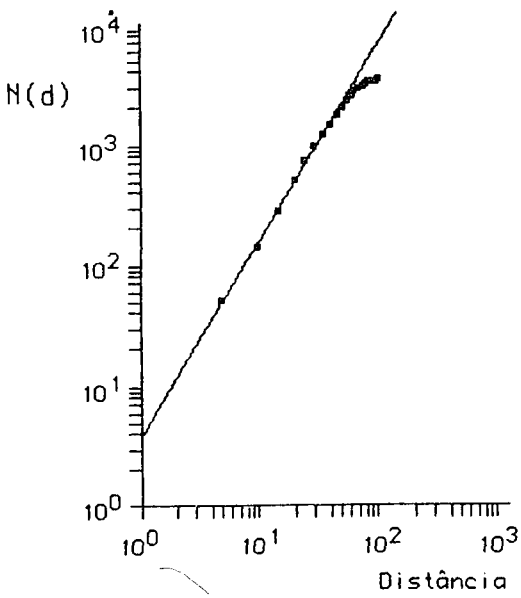


Fig. 1c—Dimensão fraccionária = 1,665 ± 0,104

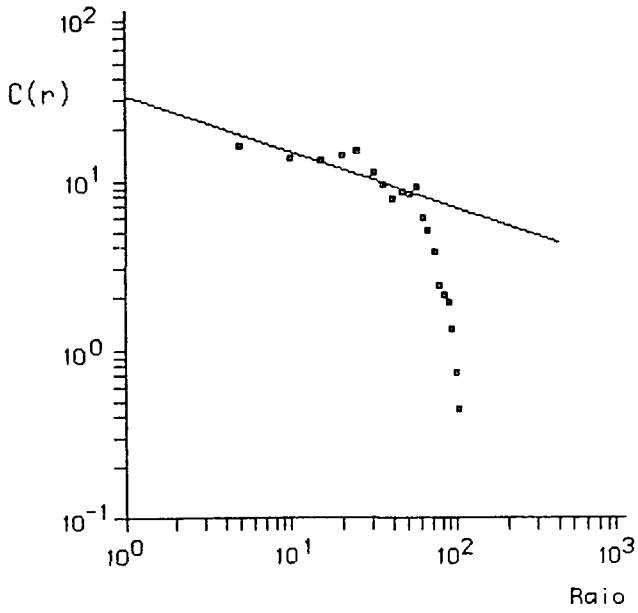


Fig. 1d—Dimensão fraccionária = 1,620 ± 0,001

i) No primeiro, calcula-se a função de correlação densidade-densidade (que indica a relação entre densidades em dois pontos diferentes), dada pela fórmula

$$C(r) = (2\pi\ r N)^{-1} \sum_i n_i(r)$$

em que N é o número de partículas do agregado, r é o raio interior de uma coroa circular em torno da semente e $n_i(r)$ (consideram-se 20 dessas coroas) é o número de partículas num pequeno círculo em torno de cada partícula i dentro da coroa. Representou-se graficamente (Figs. 1c e 2b) o logaritmo de C(r) contra o logaritmo de r, sendo o declive da recta obtida dado por D−d, i.e. a dimensão fractal procurada menos a dimensão geométrica do espaço subjacente (2 no caso presente). Verifica-se das Figs. 1c) e 2b) que os efeitos de bordo do agregado são relevantes, conforme era de esperar, pois interrompeu-se arbitrariamente o crescimento do fractal. O erro obtido pelo método dos mínimos quadrados é relativamente pequeno, uma vez que os pontos da extremidade não são levados em consideração. A Tab. 1 contém os valores obtidos para a dimensão fractal, para os dois tipos de rede:

TABELA 1 — *Tabela de dimensões fractais (d=2)*

	Este trabalho (método i)	Outras simulações	Valores teóricos
Rede quadrangular	1,67±0,10	1,68±0,05	5/3
Rede triangular	1,77±0,10	1,71±0,05	7/4

ii) No outro processo, de compreensão mais intuitiva, contam-se simplesmente o número de partículas contidas num certo número de quadrados (20, no caso presente), com tamanhos diferentes, mas todos centrados na semente, e representa-se o logaritmo desse número versus o logaritmo do lado do quadrado. Mais uma vez se aplicou o método dos mínimos quadrados para calcular a dimensão fractal, que é o declive da recta que melhor descreve os dados. Os erros obtidos são muito menores do que no caso anterior. Uma maneira de melhorar o resultado consistiria em considerar, por exemplo, quadrados com centros diferentes, mas encaixados uns nos outros, de tal forma que o centro de cada um deles fosse o centro de gravidade dos pontos no respectivo interior.

Da comparação das dimensões fractais obtidas com os valores existentes na literatura conclui-se que o método i) é superior ao ii) quanto ao valor absoluto, embora o erro que lhe está associado seja maior.

Note-se que uma vez que se trata de um fractal estatístico, uma avaliação mais exacta da dimensão fractal exige a simulação de todo um conjunto de agregados e a construção de uma média sobre o «ensemble» obtido. Levar-se-iam assim em conta as flutuações associadas a fractais particulares. Podia, por exemplo, construir-se um certo número de fractais com vários tamanhos e representar o logaritmo do raio de giração do fractal contra o logaritmo do número de partículas nele contidas.

Deve realçar-se que os valores obtidos para a dimensão fractal estão em bom acordo com os cálculos realizados em computadores mais poderosos (em alguns deles com milhões de partículas nos agregados), e com estimativas teóricas conforme se pode ver na Tab. 1.

A dimensão fractal, ao contrário do que seria de supor em face do conceito de universalidade da teoria dos fenómenos críticos (insensibilidade dos expoentes críticos a pormenores, como o tipo de rede e tipo de interacção) depende da rede subjacente. Para a rede triangular tem-se um valor diferente, embora próximo, do da rede quadrangular, se se usar o método i), que é o de maior confiança para a determinação da dimensão fractal. Pode-se constatar porém uma insensibilidade relativamente a algumas modificações de pormenor do algoritmo. A «classe de universalidade» da DLA é portanto mais restrita do que em mecânica estatística, tendo sido

este facto descoberto por via de simulação computacional.

Outra diferença importante em relação à universalidade, é que a dimensão fractal cresce com a dimensão normal (pelo menos isso verifica-se para $d < 6$), ao contrário dos expoentes críticos das transições de fase que estabilizam nos valores do campo médio para redes com $d > 4$.

Parece que essas diferenças relativamente à mecânica estatística têm a ver com o facto de na DLA se ter um processo cinético irreversível e não uma mudança de fase reversível.

3. Discussão

O matemático francês Mandelbrot definiu fractal como um objecto cuja dimensão fractal ou dimensão de Hausdorff é menor que a dimensão espacial. Significa isto que à medida que o processo de agregação se desenvolve existem cada vez mais e maiores espaços vazios entre os ramos do agregado, i.e. que o objecto não é compacto mas antes extremamente fragmentado. Um fractal matemático é, de facto, um objecto infinitamente fragmentado. A densidade de um fractal diminui à medida que se aumenta a escala de observação, sendo a diminuição descrita por uma potência em cujo expoente entre a dimensão fraccionária. Os espaços vazios (não se trata de «buracos» pois é praticamente impossível formarem-se arcos que delimitem espaços fechados) têm todas as ordens de grandeza.

Pode-se falar de um efeito de blindagem pois as partículas, embora teoricamente possam, normalmente não entram nos numerosos «fiordes», quer grandes quer pequenos, que são típicos do agregado, pois é grande a probabilidade de encontrarem alguma «rocha» pelo caminho. A Fig. 2a) representa o fractal num estádio inicial do seu desenvolvimento. Como essa figura é bastante parecida com o interior do fractal maior, torna-se nítido o papel de protecção que os pontos exteriores desempenham relativamente aos interiores. Tudo se passa como se um barco navegasse ao acaso (por causa do mar alterado), ao largo da costa norueguesa. A probabilidade de entrar num fiorde seria pequena, sendo mais provável

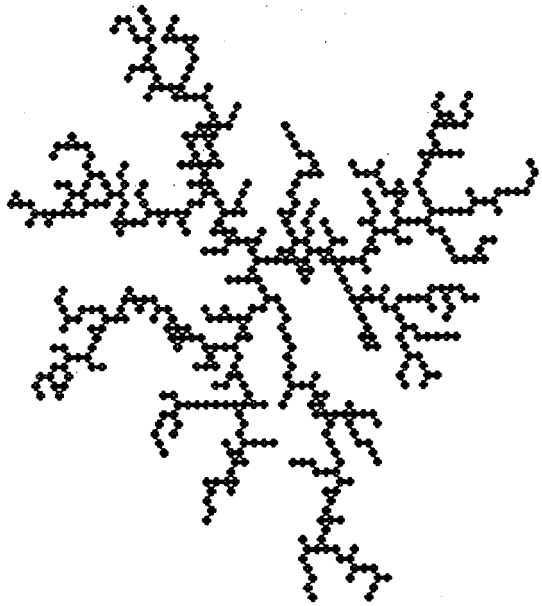


Fig. 2a—Número de capturas = 525

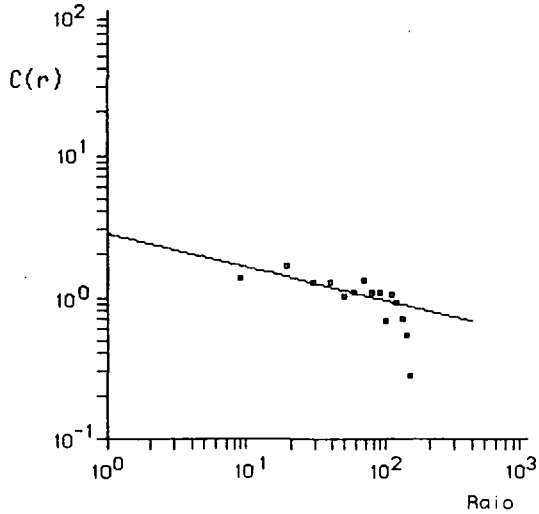


Fig. 2b—Dimensão fraccionária = 1,765 ± 0,100

que o barco se despedaçasse num dos rochedos mais avançados da costa. É este efeito de blindagem que no fundo impede o agregado de ser compacto e lhe confere a sua característica

de fractal, i.e. de um objecto com «buracos» de todos os tamanhos. A palavra «todos» não é a mais adequada para um fractal físico pois só num objecto matemático ideal há lugar para todas as ordens de grandeza. Num fractal físico como o da DLA o tamanho da partícula estabelece a ordem de grandeza inferior, existindo obviamente uma ordem de grandeza superior, relacionada com o tamanho máximo admitido ou conseguido para o sistema total.

O facto de a DLA conduzir a um fractal não é de forma alguma trivial. Existem modelos de crescimento aos quais não correspondem fractais, apesar de existir um elemento de aleatoriedade no respectivo algoritmo. Nos assim chamados modelos balísticos (sem ou com parâmetro de impacto) a trajectória das partículas é uma linha recta (que se dirige ou não para a semente inicial), embora o ponto de partida dessas partículas continue a ser aleatório sobre uma circunferência. Os objectos assim obtidos não são fractais. Por outro lado, o chamado modelo de Eden, baseado no crescimento aleatório de uma figura compacta já existente, por adição de uma nova partícula num sítio qualquer do contorno, também não é um fractal.

Pode-se, no entanto, mudar o mecanismo da DLA sem que ocorram grandes diferenças nos resultados, por exemplo:

— a «colagem» ao agregado pode dar-se só com uma certa probabilidade,

— pode considerar-se um certo «tempo de reacção» suficientemente longo, i.e. uma partícula do agregado só «aceita» uma partícula nova desde que não tenha decorrido mais do que um certo tempo sobre a sua própria deposição (se esse tempo for curto a dimensão fractal diminui).

— podem considerar-se passos maiores no início do processo,

— a figura de partida pode ser um quadrado em vez de um círculo.

As figuras resultantes têm em geral o mesmo aspecto, sendo a dimensão fractal a mesma. Experimentámos em particular a última das modificações indicadas, tendo obtido dimensões fractais aproximadamente iguais às indicadas na Tab. 1.

O estudo da DLA sugere um certo número de questões teóricas interessantes.

— Existe alguma relação simples entre a dimensão fractal e a dimensão da rede? Em particular, qual é o comportamento assimptótico para redes num hiper-espaço de grande dimensão?

— É suficiente uma dimensão fractal única para caracterizar o objecto?

Apesar de se terem alguns resultados preliminares (por exemplo, $D = d^2 + 1/d + 1$ para uma rede quadrangular), não se tem ainda uma resposta definitiva à primeira pergunta, sendo necessárias mais simulações e algum novo conceito para a avaliação teórica da dimensão fractal. A resposta à segunda questão parece ser negativa. Com efeito, simulações muito grandes começaram por revelar que é necessário, pelo menos, definir uma dimensão fractal radial e uma dimensão fractal tangencial para definir com exactidão uma figura de DLA. Hoje em dia a conclusão parece ser que se está perante um multifractal, i.e. um objecto com uma infinidade de dimensões fractais.

Uma limitação básica do modelo de DLA é o facto de existir apenas uma semente e de esta se conservar imóvel no decorrer do tempo. Em situações reais de agregação de fumos, aerosóis, colóides, etc. ocorrem vários agregados que se deslocam erraticamente até finalmente se reunirem. Experiências de simulação que levam em conta essa possibilidade forneceram dimensões fractais no espaço tridimensional que são muito parecidas com a dimensão fractal descoberta por Forrest e Witten ($D = 1.78$). Note-se que a DLA fornece o valor $D = 2.5$ para $d = 3$.

No entanto, e como foi dito no início, a DLA, na sua versão mais simples ou em generalizações adequadas (por exemplo, nos chamados fractais laplacianos, onde o cresci-

mento do fractal se faz de dentro para fora sendo a probabilidade de crescimento num certo ponto dada por um número aleatório e pela solução da equação de Laplace para a geometria em causa) é útil para descrever fenómenos tão diferentes mas tão vulgares como a electrodeposição de um material, o contacto entre dois líquidos de densidades diferentes e o fenómeno de uma descarga num dieléctrico (o exemplo mais conhecido é o relâmpago numa trovoada).

A física, com o uso generalizado dos computadores, permite estudar os complicados problemas de morfogénese no mundo macroscópico. O modelo que discutimos tem um inegável interesse didáctico: da sua análise conclui-se como pode ser simples uma descrição, tanto qualitativa como quantitativa, de alguns fenómenos não triviais que surgem na natureza, à nossa volta.

BIBLIOGRAFIA

S. FORREST e T. WITTEN — *J. Phys.*, **A12**, L-109 (1979).

H. J. HERRMANN — *Phys. Rep.*, **136**, 154 (1986).

P. JULIEN — *Comm. Cond. Matter Phys.*, **13**, 177 (1987).

P. MEAKIN — *Phys. Rev.*, **A27**, 604 e 1495 (1983).

L. PIETRONERO e E. TOSATTI (eds.) — «Fractals in Physics», North-Holland (1986).

L. SANDER — *Scient. American*, **256**, 94 (1987).

T. WITTEN e L. SANDER — *Phys. Rev. Lett.*, **47**, 1400 (1981).

NOVAS DIVISÕES TÉCNICAS DA SPF

Na Assembleia Geral da Sociedade que se realizou em Aveiro no dia 26 de Setembro p.p. foi decidido dissolver a Divisão Técnica de Cristalografia e criaram-se duas novas Divisões Técnicas:

— Física Atómica e Molecular;
— Meteorologia, Geofísica e Astrofísica.

Está pois aberto o caminho para que estas divisões iniciem a sua actividade, contribuindo para o desenvolvimento das respectivas áreas e para a defesa dos seus interesses. De acordo com os estatutos da SPF e Regulamento das Divisões Técnicas (publicado na Gazeta de Física, vol. 8, Fasc. 1 (1985) pág. 39) é essencial a designação de um Coordenador, coadjuvado por dois vogais, para cada uma das novas Divisões. Conforme se lê no ponto 4 do Regulamento o coordenador é escolhido de entre os 3 mais votados pelos sócios inscritos nessa Divisão. É pois necessário que os sócios interessados se inscrevam nas novas Divisões constituindo assim o corpo eleitoral. Com o objectivo de iniciar e promover a inscrição de sócios nas novas Divisões e ainda de actualizar a inscrição nas Divisões Técnicas, se for caso disso, solicita-se que preencha a ficha de inscrição e a devolva para a sede da SPF (Av. da República, 37-4.° 1000 Lisboa).

No passado a eleição dos coordenadores das Divisões Técnicas tem sido feita sem a prévia apresentação de candidatos. Contudo a apresentação de candidatos à eleição constitui prática corrente em outras Sociedades científicas europeias. Será proventura tempo de iniciar o novo processo de eleição. O seu sucesso depende naturalmente da apresentação de candidaturas sobre as quais os sócios inscritos na respectiva Divisão se possam pronunciar. Não havendo candidatos, eventualmente propostos por outros sócios, cairemos inevitavelmente no anterior processo de eleição em que qualquer eleitor é susceptível de receber votos e ser eleito. É extremamente útil receber as opiniões dos sócios sobre este assunto de modo a que o método a adoptar venha a reflectir o mais largo consenso possível.

Assim e em conclusão solicita-se que:

1 — Preencha a ficha em anexo e a devolva à sede da SPF no caso de querer inscrever-se nas novas Divisões Técnicas ou de querer actualizar a sua inscrição nas já existentes.
2 — Envie por escrito para a Sede sugestões sobre a metodologia da eleição dos coordenadores das Divisões Técnicas.

Participe na sua Sociedade. A actividade da SPF depende da participação activa de cada sócio.

O Secretariado da SPF

A reestruturação do Ensino da Física e da Química e a opinião dos professores

JORGE ANTÓNIO VALADARES
Divisão Técnica de Educação da SPF

VÍTOR DUARTE TEODORO
Faculdade de Ciências e Tecnologia (UNL)

Como é do conhecimento geral, o Grupo de Trabalho, coordenado pelo Prof. Fraústo da Silva, a quem a Comissão de Reforma do Sistema Educativo (CRSE) incumbiu a realização de um estudo sobre os planos curriculares dos Ensinos Básico e Secundário, apresentou em finais do ano de 1987 uma proposta preliminar de Reorganização dos Planos Curriculares dos Ensinos Básico e Secundário que foi objecto de discussão em toda a comunidade educativa. Já no final do ano lectivo de 1987/88, o mesmo grupo apresentou a sua proposta final à CRSE, que apenas foi tida parcialmente em conta na Proposta Global de Reforma apresentada pela CRSE ao ministro da Educação e editada pelo GEP em Julho de 1988.

É comum a todas estas propostas a introdução de profundas alterações nos planos curriculares, em particular no que se refere ao 3.° ciclo do Ensino Básico — 7.° ao 9.° anos. Argumentando com o facto de ser prejudicial um número reduzido de horas para cada disciplina, por conduzir a um maior de número de turmas por professor, o Grupo de Trabalho propôs a criação de uma única disciplina de Ciências, englobando a Física, a Química, as Ciências da Vida e as Ciências da Terra.

Durante a realização do 1.° Encontro Regional sobre o Ensino da Física, que decorreu em Lisboa em Fevereiro de 1988, decidiu a Divisão de Educação inquirir os professores presentes através de um pequeno questionário. Foram obtidas 191 respostas assim distribuídas (ver Quadros 1 e 2):

Em termos percentuais, estes dados correspondem *grosso modo* à formação e à situação profissional dos professores que leccionam Física e Química no Ensino Secundário.

QUADRO 1 — *Habilitações académicas dos professores que responderam ao questionário*

Habitação académica	N	%
Lic. ou Bac. em C.F.Q.	55	28,8 %
Lic. em Fís. (R. Ed. ou Cient.)	17	8,9 %
Lic. em Quím. (R. Ed. ou Cient.)	37	19,4 %
Lic. em Eng. Quim.	34	17,8 %
Bac. em Eng. Quím.	25	13,1 %
Outra	23	12,0 %
	191	100,0 %

QUADRO 2 — *Situação profissional dos professores que responderam ao questionário*

Habitação académica	N	%
Efectivo	143	74,9 %
Não efectivo c/ habilitação	40	20,9 %
Outra situação	8	4,2 %
	191	100,0 %

Ensino Básico (3.° ciclo)

A questão proposta referente à estrutura do 3.° ciclo do ensino Básico (7.° ao 9.° ano) foi a seguinte:

1. Qual das seguintes opções considera preferível para o Ensino Básico (7.° ao 9.° ano de escolaridade — actual ensino secundário unificado)? (*)

(*) Pressupõe-se que em qualquer das opções existe coordenação horizontal e vertical dos programas de todas as disciplinas.

a) Ensino pluridisciplinar por semestres: dos 6 semestres disponíveis, um seria destinado a Química, outro a Física, outro a Ciências da Vida, outro a Ciências da Terra e os dois últimos a uma perspectiva global da Ciência e da Técnica e dos problemas que levantam na sociedade do nosso tempo. Os semestres seriam leccionados por professores das respectivas especialidades, com excepção dos dois últimos que seriam leccionados por qualquer professor dessas disciplinas.

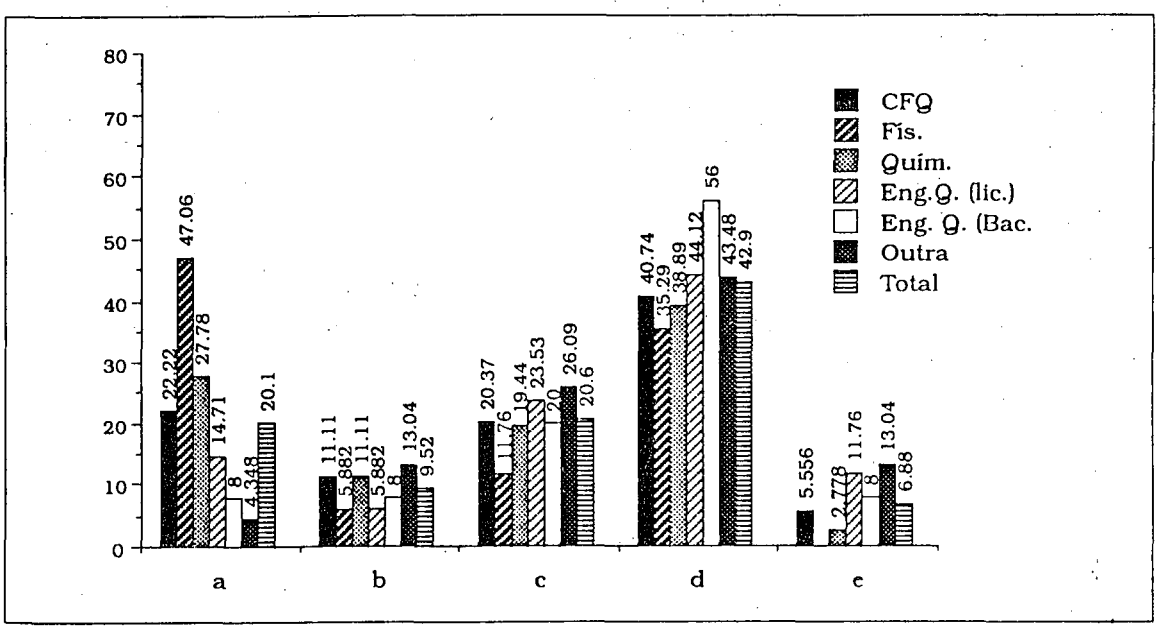


Fig. 1 — Habilitação académica *versus* opções propostas para o 3.º ciclo do Ensino Básico (7.º ao 9.º ano). Valores em percentagem.

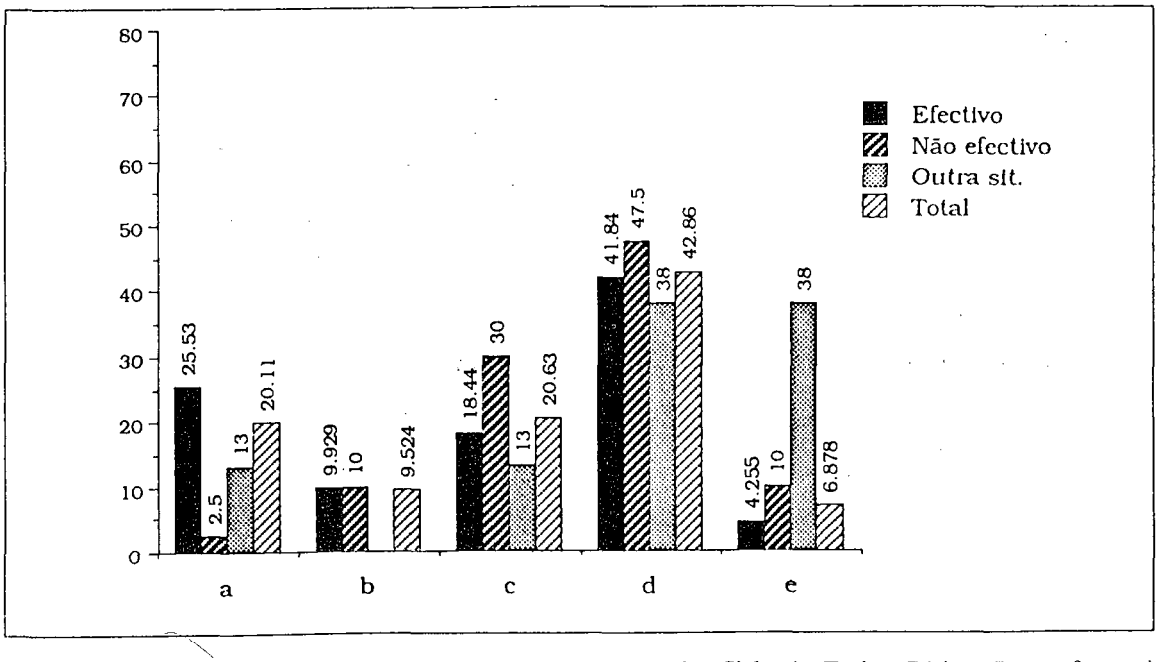


Fig. 2 — Situação profissional *versus* opções propostas para o 3.º Ciclo do Ensino Básico (7.º ao 9.º ano). Valores em percentagem.

b) Ensino integrado da Física, da Química, das Ciências da Vida e das Ciências da Terra nos 3 anos. A disciplina seria leccionada por um mesmo professor, de qualquer destas Ciências.

c) Ensino da Física num dos anos, da Química noutro e das Ciências da Vida e da Terra noutro, leccionadas por professores das respectivas especialidades.

d) Ensino da Física e da Química numa disciplina autónoma e das Ciências da Vida e da Terra noutra, ambas com menor número de horas lectivas.

e) Outra hipótese.

As Figs. 1 e 2 mostram os resultados obtidos em função da habilitação académica e da situação profissional, respectivamente.

Como se pode observar nestes gráficos, a maioria dos inquiridos prefere a opção *d*), ou seja, a situação actual. A opção indicada em menor percentagem é a opção correspondente ao Ensino Integrado das Ciências Físicas e Naturais.

Ensino Secundário

A questão proposta referente à estrutura do Ensino Secundário (10.° ao 12.° ano) foi a seguinte:

2. Qual das seguintes opções considera preferível para o Ensino Secundário (do 10.° ao 12.° ano de escolaridade — actual ensino secundário complementar)? (*)

a) Ensino da Física e da Química numa única disciplina no 10.° e 11.° ano e em disciplinas separadas no 12.° ano.

b) Ensino da Física apenas no 10.° ano, da Química apenas no 11.° ano e da Física e da Química separadas no 12.° ano.

c) Ensino da Química apenas no 10.° ano, da Física apenas no 11.° ano e da Física e da Química separadas no 12.° ano.

d) Ensino da Física e da Química em disciplinas separadas nos três anos com menor número de horas.

(*) Pressupõe-se que em qualquer das opções existe coordenação horizontal e vertical dos programas de todas as disciplinas.

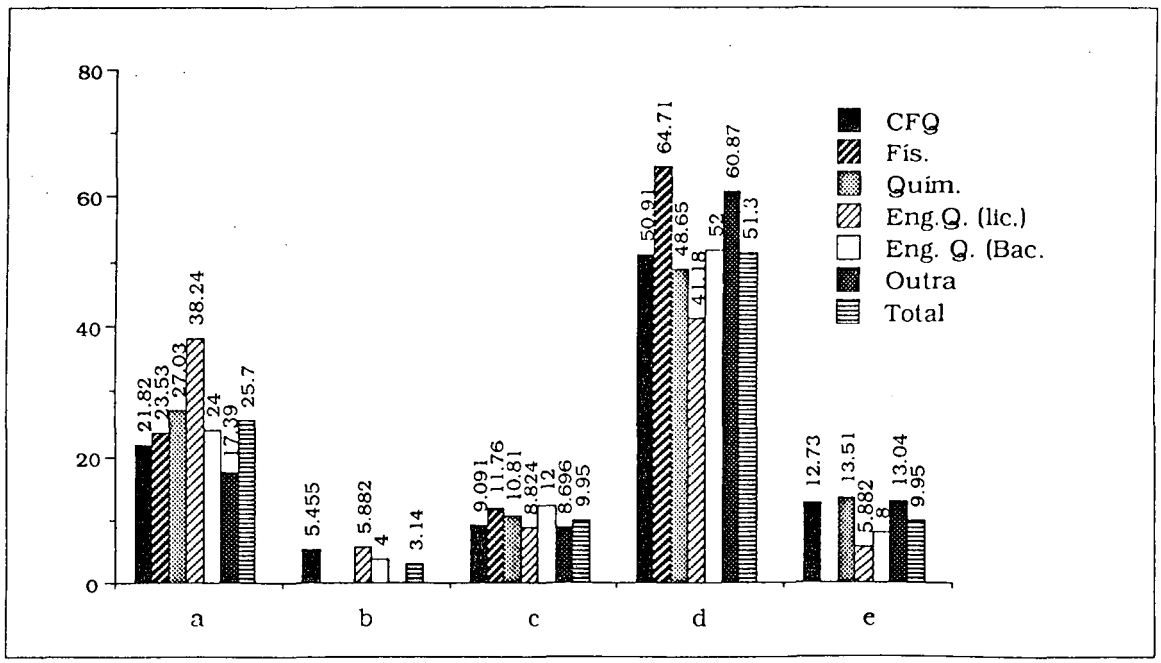


Fig. 3 — Habilitação académica *versus* opções propostas para o Ensino Secundário (10.° ao 12.° ano). Valores em percentagem.

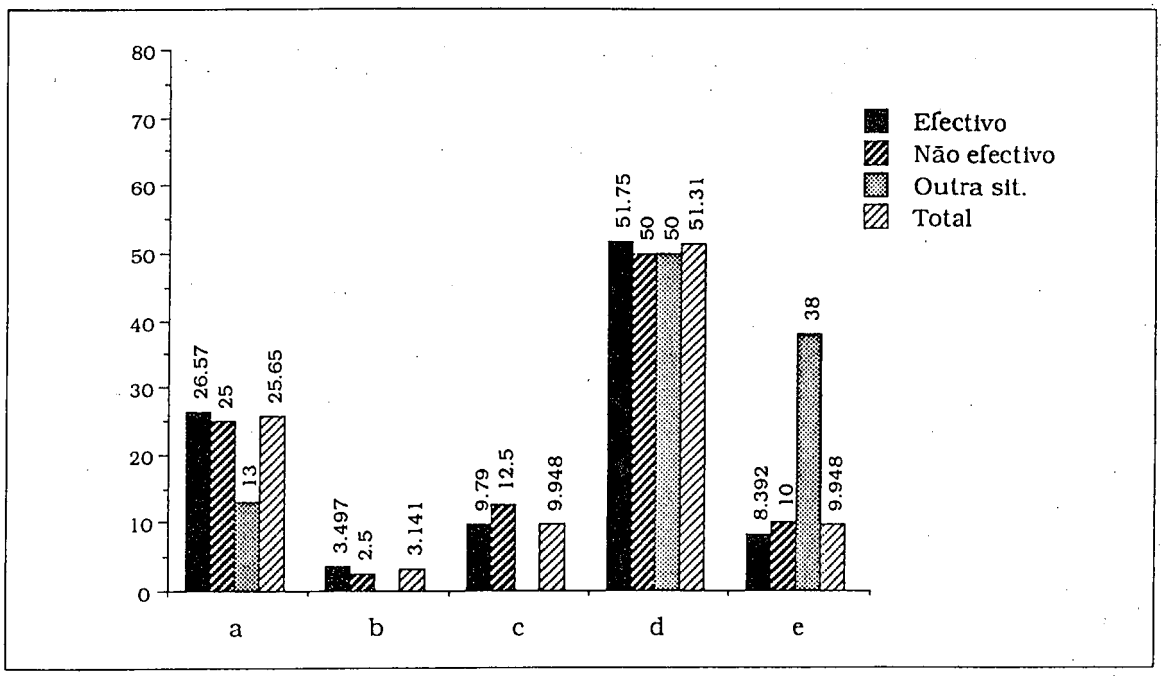


Fig. 4 — Situação profissional *versus* opções propostas para o Ensino Secundário (10.º ao 12.º ano). Valores em percentagem.

e) Outra hipótese.

As Figs. 3 e 4 mostram os resultados obtidos em função da habilitação académica e da situação profissional, respectivamente.

Como se pode observar nestes gráficos, a generalidade dos inquiridos prefere a opção *d*), ou seja, a opção de individualização das disciplinas nos 3 anos do curso secundário. Apenas cerca de 20 % dos inquiridos se manifestaram pela manutenção da situação actual — opção *a*).

Conclusões

Estes resultados mostram que a generalidade dos inquiridos se manifestou por um ensino especializado das Ciências Físicas. Esta é, precisamente, a orientação oposta das propostas pelo Grupo de Trabalho e pela CRSE.

GAZETA DE FÍSICA

Publicidade

Tiragem actual — 2200

Periocidade — trimestral

Leitores: professores e estudantes de Física (ensinos secundário e superior), investigadores, técnicos industriais

Preços por fascículo *:

Fracção de página	1/4	1/2	1/1
Preto e branco	6	10	20
Com cor adicional	7	12	24

* em contos; these costs also apply to foreign advertisers (1 conto = 1000 Esc.)

Assinatura anual: 20 % de desconto

Contactos telefónicos: SPF, Lisboa 773251 (Maria José Couceiro)
Porto 310290-21653 (Prof. J. M. Moreira)

Gaz. Fís., Vol. 11, Fasc. 4, 1988

A relatividade ao alcance de todas as bolsas

CARLOS FIOLHAIS
Departamento de Física da Universidade de Coimbra

Na Conferência Nacional de Física, realizada em Setembro último em Aveiro, o Prof. Andrade e Silva na sua lição sobre «A ciência como cultura» propôs a criação, no ensino secundário, de uma disciplina obrigatória sobre cultura científica. Acrescentou que alguns domínios da física moderna (teoria da relatividade e mecânica quântica) podiam ser tratados a nível elementar. Deu e muito justamente o exemplo da relatividade restrita, cujas ideias básicas podem ser apresentadas a toda a gente (gente nova, entenda-se), podendo até ser concretizadas com um pouco de álgebra da mais simples. Seria esta uma das maneiras de remediar o divórcio entre ciência e cultura que se manifesta a vários níveis e cuja origem está certamente na escola.

O divórcio entre ciência e cultura, que de algum modo caracteriza a sociedade moderna, é particularmente gritante em países como o nosso, cuja ciência e cuja cultura são em larga medida importadas. Os importadores são diferentes, as alfândegas são diferentes e os consumidores são também diferentes. A recente publicação de um livrinho (o «inho» aqui não é depreciativo e refere-se apenas ao tamanho) sobre Teoria da Relatividade na colecção «O essencial sobre...» da Imprensa Nacional vem uma vez mais trazer à luz esse problema. Com efeito, se é com agrado que vejo surgir uma introdução à relatividade a um preço definitivamente acessível, tenho de dizer que, sendo o número 37 da respectiva série, é o primeiro que aborda questões das ciências exactas e naturais (não se inclui aqui alguma divulgação avulsa sobre temas médicos). Isso dá uma medida do peso relativo da cultura científica e da cultura literária para a editora estatal, que reflecte afinal uma certa relação de forças na sociedade portuguesa. É manifestamente pouco! E a coisa agrava-se pelo facto de, entre as muitas colecções da Imprensa Nacional, todas elas com o seu mérito, não se encontrar nenhuma que aborde ciência de uma ou de outra maneira (a excepção que confirma a regra é a bastante útil Enciclopédia Einaudi). Encontra-se arte, literatura, filosofia, etc.. O número 1/37 (ou, se se preferir, 2,7 %) é desesperadamente pouco para uma editora que deva tratar das «duas culturas». Mas, lá diz o velho ditado, é melhor pouco que nada!

Há por aí, se se procurar bem nos alfarrabistas, livrinhos baratos sobre a teoria da relatividade. Pode-se encontrar o Coleman «Relatividade para todos», Ed. Ulisseia, s.d. (com um prefácio maior que o livro, do inimitável Prof. Gustavo de Castro). Pode-se encontrar o Cuny, «Albert Einstein e a relatividade», Ed. Ulisseia, 1965, ou, com um pouco de sorte, pode-se até encontrar o bem interessante «A relatividade e o homem», Ed. Presença, 1966, do soviético V. Smilga. Mas dificilmente se encontra algo claro, actualizado, de autor português e, pasme-se, a custar cento e vinte escudos. Como diz a publicidade, é mais barato do que um maço de cigarros.

É possível encontrar no estrangeiro nalguns quiosques de rua pequenos livros de divulgação científica. Vi outro dia em Espanha, no meio de um estendal de literatura duvidosa, um livro de Paul Davies intiulado «O universo acidental». Tratava-se de uma discussão das admiráveis coincidências cósmicas, cuja história remonta à hipótese de Dirac e que nos nossos dias se exprimem no princípio antrópico. O curioso é que o Davies estava no meio de revistas baratas de astrologia, que tratam, como

todos sabem, das coincidências do quotidiano. Pensei que coisas como essa, de a astrofísica ser tão popular como o zodíaco, só aconteciam lá fora. Mas se calhar estou enganado. Entre nós, já vi num quiosque o livrinho da relatividade ao lado de fotonovelas e do «Jornal do Crime». Os físicos estão definitivamente a perder a vergonha e os seus escritos já aparecem pendurados por onde quer que as pessoas passem. Acho muito bem! Assim, já se pode ler a teoria da relatividade (cabe no bolso da gabardina ou do calção) enquanto se espera o autocarro na baixa ou a namorada na esplanada. Trata-se não só da relatividade para todas as bolsas mas também para todos os bolsos.

O Prof. António Brotas concentrou o essencial no espaço apertado que dispunha (é como aqueles tempos de antena muito curtos da televisão). Fez as suas opções, que são respeitáveis. Uma delas, por exemplo, consiste em escrever equações, o que lhe limita desde logo a inteligibilidade por parte de algum público que foge da matemática como o diabo da cruz. Há um livrinho sobre relatividade («O que é a relatividade», Landau e Rumer, Edições Mir), tão pequeno como o que está em discussão, que por causa disso renuncia a apresentar equações, substituindo-as até por bonecos. Mas o Landau dos bonecos é o mesmo do famoso curso de física teórica, cheio de equações nem sempre fáceis de deduzir. Brotas põe equações em vez de bonecos e está no seu direito, já que a matemática é a linguagem da física.

Brotas começou e muito bem com os gregos, pois foi com os gregos que começou a observação científica. Continuou com Galileu, Newton, Maxwell e finalmente Einstein. Einstein só aparece na p. 37 (num total de 58), apesar de ter sido ele o autor quase solitário da teoria da relatividade. Mas está certo: tal como Newton, Einstein só chegou onde chegou porque estava aos ombros de gigantes. O autor organizou equilibradamente o livrinho, com mais da relatividade restrita e menos da relatividade geral (está também certo, a geral é mais complicada e a matemática dela tão difícil que até Einstein a teve de aprender). Brotas fala com indisfarçável entusiasmo da teoria da relatividade, com o entusiasmo de quem é neto de um professor que ensinou relatividade nos anos vinte. Convém lembrar, a propósito, que a relatividade entrou em Portugal ajudada por filósofos; era menor nesse tempo a distância entre as «duas culturas». O autor não teve pois de importar a relatividade, já existia lá em casa e isso tem obviamente algum significado. Sente-se que tem algo para comunicar e verifica-se que o consegue, por vezes até com algum humor (como aquela dos físicos tricotearem tensores ou a outra da cabeça viver mais tempo do que os pés).

Não é aqui o sítio adequado para escalpelizar uma ou outra falha. Se o fosse, podia falar da conveniência em usar o sistema internacional de unidades (o país aderiu à convenção do SI e os revisores das editoras deviam atender a isso), podia falar da gralha da p. 32 que caiu na velocidade da luz (aumentada de um factor 100), podia protestar por o Morley não vir a acompanhar o Michelson, podia até barafustar contra algumas frases, por exemplo a da p. 50 que diz que «a massa dos núcleos mais pesados é maior do que a das suas componentes» (se por componentes se entender, como é normal, neutrões e protões, então a massa de qualquer núcleo é menor, pois senão o núcleo não existiria ligado). Mas este não é o sítio adequado para pruridos mais ou menos técnicos. Não se trata do essencial.

O essencial é recomendar ao leitor que invista os cento e vinte escudos (qualquer semanário é mais caro do que isso) no livrinho. Peça-o na primeira livraria, papelaria ou quiosque, e guarde-o no bolso. Devo, para ser honesto, prevenir que pode acontecer que o leitor, ainda que cheio de boa-vontade, interrompa a leitura, por ter tropeçado ou na aceleração de Coriolis (primeira equação na p. 18) ou na equação de Schwarzschild (a

penúltima na p. 56). Os que tropeçarem ficam a saber como eu e outros às vezes tropeçamos nos «indicadores sintagmáticos» ou na «fenomenologia de Husserl» das edições da Imprensa Nacional (suspeito que sejam coisa simples, tão simples como a aceleração de Coriolis e a equação de Schwarzschild). Não será uma queda grande. Quero dizer com isto que as equações são mais inofensivas do que certa linguagem arrevesada, dessa que enche alguma literatura de divulgação cultural.

Vou parar aqui, porque julgo ter dito o essencial sobre *«O essencial sobre a teoria da relatividade»*. A crítica, a continuar, corria o risco de ficar maior que o livro e a extensão desnecessária é um dos vícios da má cultura científica. Os livros da colecção «O essencial...» têm a grande vantagem de serem curtos.

BIBLIOGRAFIA

ANTÓNIO BROTAS — «O essencial sobre a teoria da relatividade», Imprensa Nacional/Casa da Moeda, 1988.

Noticiário SPF

1. Delegação Regional de Lisboa

Foi convocada para o dia 27 de Janeiro, às 21 horas, na sede da Sociedade, a reunião ordinária da Assembleia Geral Regional de Lisboa, para apreciação do Relatório anual da Direcção da Delegação relativo a 1988 e do Plano de Actividades para 1989.

Do Relatório de 1988, salienta-se a organização do 1.º Encontro Regional de Lisboa sobre o Ensino da Física, as Olimpíadas Nacionais (relativas a 1987) e Regionais da Física, e o Ciclo de Colóquios de Outono.

Do mapa de receitas e despesas salienta-se uma receita de cerca de 4.350 contos, tendo o saldo que transita para 1989 sido de cerca de 330 contos.

Do Plano de Actividades para 1989 constam os seguintes pontos:

1. Organização de dois ciclos de colóquios — Colóquios de Primavera e Colóquios de Outono.
2. Organização, em Abril, do Dia da Física, com o objectivo de proporcionar, sobretudo aos estudantes dos 10.º, 11.º e 12.º anos, um contacto directo com as instituições em que se trabalha em Física, na região da Grande Lisboa.
3. Organização da prova regional de 1989 das Olimpíadas da Física.
4. Planificação das Olimpíadas da Física para os Países de expressão oficial portuguesa.
5. Início da preparação da Física 90.
6. Reorganização dos ficheiros de sócios e da contabilidade.

2. Delegação Regional de Coimbra

Olimpíadas Regionais de Física

As provas regionais das Olimpíadas de Física de 1989 realizar-se-ão no Departamento de Física da Universidade de Coimbra no dia 14 de Abril.

As Escolas da Região Centro interessadas em participar nesta iniciativa deverão comunicar à Delegação, até 28 de Fevereiro, os nomes dos alunos que constituem as equipas participantes bem como a natureza dos trabalhos originais que tencionam apresentar.

Acções

Com o patrocínio da Delegação, a Prof.ª Doutora Maria Helena Caldeira Martins realizou na Escola Secundária Infanta D. Maria de Coimbra, no dia 6 de Janeiro, a acção «Introdução à Mecânica Quântica» destinada aos alunos do 12.º ano.

3. Delegação Regional do Porto

Olimpíadas Nacionais

Nos dias 24 e 25 de Novembro, realizaram-se as Olimpíadas de Física — etapa nacional de 1988, no Laboratório de Física da Universidade do Porto.

O primeiro dia foi escolhido para confraternização entre os participantes oriundos das 3 regiões do país. Nesse dia de convívio, destacamos a excursão e visita ao Castelo de Guimarães.

Registamos com apreço, o interesse e entusiasmo dos participantes, pela forma como decorreram as Provas Finais cujos resultados são os seguintes:

Vencedores do 9.º ano

—*Escola Sec. Eça de Queiroz*—Póvoa de Varzim
ex-aequo com
—*Escola Sec. da Quinta das Flores*—Coimbra
constituídas respectivamente por:

—Ana Catarina Sampaio
Paulo Jorge dos Santos Rodrigues
Gabriela Dantas de Barro
e
—Isabel Margarida Reis Costa
João Manuel Rendeiro Cardoso
Dário Manuel da Silva Fonseca

Vencedores do 11.º ano

—*Escola Sec. Alves Martins*—Viseu
constituída por:

—Carla Marina de Oliveira Botelho
Cristina Maria Correia A. Pereira
José António Maciel Natário

As Provas de Criatividade para este ano foram do tipo B3, de acordo com o regulamento das Olimpíadas. Não tendo concorrido outras equipas para além da Zona Sul:

—*Escola Sec. de Paço de Arcos*—Oeiras
ex-aequo com a
—*Escola Sec. Mouzinho da Silveira*—Portalegre
constituídas respectivamente por:

—Ana Margarida Luís
Alexandre Santos
Carlos André
e
—Ana Margarida Martins
Patrícia Macedo
Sandra Roque Pinto

Palestras e Encontros de Formação

11 e 13 de Out.—Encontro sobre «A Electrónica no Ensino Secundário», pelo Prof. Manuel de Barros, na Fac. Ciências do Porto.

12 Out.—«O Universo Primitivo—Teoria de Kaluza-Klein», pelo Doutor Paulo Gali de Macedo, na Fac. Ciências do Porto.

16 Nov.—«Electrónica—uma abordagem muito elementar», pelo Prof. Manuel de Barros, na Esc. Sec. António Nobre.

31 de Nov.—«Mistérios Quânticos», pelo Doutor João Lopes dos Santos, na Esc. Sec. Almeida Garrett.

Próxima Realização

Encontro de Formação sobre «Óptica e Lasers» pelos Doutores A. Pereira Leite e J. Salcedo, nos dias 16 e 17 de Março, na Fac. Ciências do Porto.

3.ª ESCOLA IBÉRICA DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA

Real Sociedad Española de Física (GEFES)
Sociedade Portuguesa de Física (DFMC)

«Magnetismo e Materiais Magnéticos»

San Lorenzo del Escorial, Madrid
11 - 23 Setembro 1989

Inf: Soc. Port. Física, Div. Fís. Mat. Condensada

★

SOFT MAGNETIC MATERIALS

Universidade Complutense Madrid
European Physical Society

San Lorenzo del Escorial, Madrid
27 - 29 Setembro 1989

Main Topics: 1. Basic Problems 2. Experimental and Theoretical Methods 3. Amorphous Materials 4. Silicon Iron and other materials 5. Applications

Inf: Prof. A. Hernando, Soft Magnetic Materials 9 c/o Siasa Congresos, Paseo de la Habana 134 28036 Madrid, Spain; telex 46999 SIAC - E.

ÍNDICE DO VOLUME 11

Vol. 11 — Fasc. 1 (Janeiro a Março 1988)

A superfície líquida (M. M. Telo da Gama, B. S. Almeida e P. I. Teixeira) 1
Microscópios Electrónicos (Carlos Pinto Moreira de Sá) 10
Uma perspectiva construtivista para o ensino da Física. II - Objectivos para o Ensino de Física (Marília Fernandes Thomaz) 19
A composição da atmosfera e a vigilância da qualidade do ar. Um exemplo de multidisciplinaridade. (Renato A. C. Carvalho) 28
Monografias sobre temas de Física. I - Faculdade de Ciências do Porto (1971 - 87) (A. Gomes de Sá) 35
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física 37

Vol. 11 — Fasc. 2 (Abril a Junho 1988)

1.º Encontro Regional de Lisboa sobre o Ensino da Física (F. Parente) 41
Da natureza da ciência ao ensino da ciência (João Manuel Resina Rodrigues) 43
A Astronomia no Ensino Preparatório e Secundário (Maria Teresa V. Torrão Lago) 48
Desenvolvimento das capacidades metacognitivas e resolução de problemas (Maria Natália Cruz) . 51
«Devia ser em Portugúes!». Recordando Richard P. Feynman (Mário Pinheiro) 56
Origem e características da difusão de raios X e neutrões segundo ângulos pequenos (Dirce M. C. Guimarães) 57
Big Bang e inflação (I) (A. L. L. Videira) 63
Crítica de Livros (E. S. Lage) 71
Olimpíadas de Física da SPF (Provas Nacionais) 73
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física 76

Vol. 11 — Fasc. 3 (Julho a Setembro 1988)

Os cristais líquidos. Suas propriedades e aplicações (A. C. Ribeiro, J. L. Figueirinhas e M. H. Godinho) 81
A Teoria da Relatividade no Ensino Secundário. II - A Relatividade Geral (Fernando Cabrita e António Armando da Costa) 93
Avaliação no Ensino da Física (Jorge António Valadares e Vítor Duarte Teodoro) 103
Ciência integrada: uma inovação curricular para a reforma do ensino das ciências (Ana Esgalhado) 106
Prémio Nobel de Física 1988 110
VI Conferência Nacional de Física 111
4.as Olimpíadas de Física 114
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física 119

Vol. 11 — Fasc. 4 (Outubro a Dezembro 1988)

A Oceanografia e o Ensino da Física (Isabel Ambar) 125
Caos em Física (J. Sousa Ramos) 131
Comentário sobre a mesa-redonda subordinado ao tema «A Reforma do Ensino da Física» (Vincent N. Lunetta) 138
O Universo da Física Subnuclear (João Pulido) 140
DLA - Um exemplo simples de simulação computacional em física (Jorge Carvalho Silva e Carlos Fiolhais) 150
A reestruturação do Ensino da Física e da Química e a opinião dos professores (Jorge António Valadares e Vítor Duarte Teodoro) 156
A relatividade ao alcance de todas as bolsas (Carlos Fiolhais) 160
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física 162

10TH GENERAL CONFERENCE OF THE CONDENSED MATTER DIVISION OF THE EUROPEAN PHYSICAL SOCIETY

— Co-Sponsored by the Portuguese Physical Society —

9 - 12 April 1990 Lisbon, Portugal

This General Conference of the Condensed Matter Division of the European Physical Society will be the tenth of a series started in Antwerp in 1980, followed by Manchester 1982, Lausanne 1983, The Hague 1984, Berlin 1985, Stockolm 1986, Pisa 1987, Budapest 1988 and Nice 1989.

The 1990 Conference will be held in Lisbon, Portugal, in the Campus of the University of Lisbon, near the town center, under the responsability of the Condensed Matter Division of the Portuguese Physical Society.

The Conference sessions will run from Monday morning, April 9, through Thursday afternoon, April 12, 1990.

As usual the scientific sessions will cover the entire field of Condensed Matter Physics, basic and applied. The purpose is to provide a large overview of the research activity in Europe and to promote discussions and scientific exchange between participants. The Conference will include contributed papers (mainly posters) and a large number of symposia and individual invited talks.

Special attention will be paid to «hot topics».

The Conference is open to all interested Physicists from Europe and abroad. A call for contributions will be sent with the second circular. All contributed papers within the scope of the Conference will be accepted. Any more than one paper per person, however, may be relegated to a supplementary session or to be read by title only.

The Conference language will be Englih.

The deadline for the registration to the Conference and submission of abstract is 31 December 1989.

Suggestions concerning symposia, plenary talks and invited speakers are welcome.

Conference Chairman: J. Bessa Sousa
Conference Secretary: L. Alcácer
Prog. Comittee Chairman: A Farinha Martins

The second circular with call for papers, more details about the program, the general arrangements and registration forms will be sent in October 1989.

GAZETA DE FISICA

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

VOL. 11 • FASC. 4 • OUTUBRO 1988

SUMÁRIO

A Oceanografia e o Ensino da Física 125
Isabel Ambar

Caos em Física 131
J. Sousa Ramos

Comentário sobre a mesa-redonda subordinada ao tema «A Reforma do Ensino da Física» 138
Vincent N. Lunetta

O Universo da Física Subnuclear 140
João Pulido

DLA - Um exemplo simples de simulação computacional em física . . 150
Jorge Carvalho Silva e Carlos Fiolhais

A reestruturação do Ensino da Física e da Química e a opinião dos professores 156
Jorge António Valadares e Vítor Duarte Teodoro

A relatividade ao alcance de todas as bolsas 160
Carlos Fiolhais

Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física 162

Índice do volume 11 164