

G A Z E T A D E

FÍSICA



SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

VOL. 16 • FASC. 3 • 1993 • PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL • JULHO / SETEMBRO

Gazeta de Física

Propriedade da Sociedade Portuguesa de Física

Registo na DGCS n.º 107280 de 13/5/80

Depósito Legal n.º 51419/91

Publicação Trimestral

N.º 3 - 1993

Redacção e Administração

Avenida da República, 37 - 4.º - 1000 Lisboa

Telefone (01) 7973251

Fax (01) 7952349

Directores

João Bessa Sousa (FCUP)

Filipe Duarte Santos (FCUL)

Carlos Fiolhais (FCTUC)

Comissão de Redacção e Administração

Carlos Matos Ferreira (IST)

Margarida Telo da Gama (FCUL)

Ana Maria Eiró (FCUL)

Maria Margarida Cruz (FCUL)

Execução Gráfica

Imprensa Portuguesa

Rua Formosa, 108-116, 4000 Porto

Telefone (02) 2002466

Fax (02) 2015105

Tiragem: 2500 exemplares

Preço avulso: 600\$00

Assinatura anual (quatro números):

2000\$00 (Continente, Açores, Madeira e Macau)

35 US dólares (estrangeiro)

Distribuição gratuita aos sócios da SPF

**Publicação subsidiada pela Fundação Calouste Gulbenkian
e pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica**

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

Os **manuscritos** devem ser submetidos em duplicado, dactilografados em folhas A4 a dois espaços (máximo *equivalente* a 4000 palavras, incluindo figuras; 1 figura corresponde em média a 140 palavras). Deverão ter sempre um curto resumo, não excedendo 130 palavras. Deve ser indicado o(s) endereço(s) completo(s) das instituições dos autores. Agradece-se o envio do texto em disquete (de preferência «Word» para Macintosh ou PC). Os originais de figuras devem ser apresentadas em folhas separadas, prontos para reprodução. Endereço para correspondência: Gazeta de Física - Sociedade Portuguesa de Física, Av. da República, 37 - 4.º — 1000 Lisboa.

Na capa: Alto *Cumulus* lenticular em forma de disco voador, com um elevado grau de simetria. A nuvem repousa na crista de uma onda associada a um fluxo de ar sobre a montanha.

(A *Field Guide to the Atmosphere*, by Vicent J. Schaefer / John A. Day)



SUMÁRIO

2

A FÍSICA E O AMBIENTE: UMA VISÃO ACTUAL

José Pinto Peixoto

15

JUBILAÇÃO DO PROFESSOR JOSÉ PINTO PEIXOTO

Filipe Duarte Santos

16

FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA

H. Bruhns

21

O QUE HÁ DE NOVO?

29

LIVROS

31

OLIMPÍADAS DE FÍSICA

A FÍSICA E O AMBIENTE: UMA VISÃO ACTUAL

JOSÉ PINTO PEIXOTO

Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Neste artigo começamos por referir o papel que o determinismo laplaciano teve no desenvolvimento da Ciência e, em particular, no tratamento da problemática do ambiente. Assinalamos as duas grandes rupturas com o determinismo: a primeira, com o princípio da incerteza de Heisenberg, levou à criação da Mecânica Quântica; a segunda, com o estudo dos sistemas dinâmicos, levou à Teoria do Caos.

O Ambiente global, ou o sistema climático, é um sistema não linear em que todos os estados são transientes e de não equilíbrio; todos os seus componentes são sistemas caóticos. Em particular, a atmosfera é um sistema caótico, instável e dissipativo, em que a instabilidade se repercute na sua predictabilidade, que é limitada. Esta pode ser tratada e quantificada recorrendo à estrutura dos atractores, a partir dos expoentes de Lyapunov. Nestas condições, uma previsão correcta do sistema meteorológico não pode exceder pouco mais do que uma semana.

Os atractores do sistema dinâmico, que é a atmosfera, ficam confinados a uma região delimitada do espaço de fases. O ponto de fase permanece estatisticamente muito mais tempo sobre o atrator do que nas suas vizinhanças. Por isso, os atractores, que são de natureza fractal, podem identificar-se com as estatísticas a longo prazo da atmosfera, isto é, com o clima.

**Determinismo científico
e o Ambiente**

**Dinâmica dos Sistemas
Caóticos**

A complexidade da Atmosfera

**Limitação das simulações
matemáticas**

Instabilidade e predictabilidade

1. O Homem perante o Ambiente

Em termos dum modelo global e integrante, podemos considerar o ambiente constituído por dois grandes domínios: um referente ao sistema físico que nos rodeia — o sistema climático e outro, o sistema biológico, referente aos vários ciclos biológicos que decorrem no seio do primeiro.

Em sentido termo-hidrodinâmico ambos os sistemas são alimentados por fluxos de energia, de matéria e de informação.

Vamos, na acepção termodinâmica, tomar o ambiente natural, como o universo complementar do homem. Nesta concepção, é constituído pelos cinco subsistemas: a Litosfera, a Hidrosfera, a Atmosfera, a Criosfera e a Biosfera. Todos estes sub-sistemas são abertos para a matéria e a energia (Fig. 1).

O universo complementar é, de facto, o ambiente, isto é, o sistema climático global. Este é fechado para a massa mas aberto para a energia. Garante-se assim a existência do sistema, que sem perder massa, recebe energia, principalmente do Sol, e cede, por emissão de irradiação infravermelha, igual quantidade de energia ao espaço exterior. A energia recebida, proveniente de uma fonte a temperatura elevada, que é o Sol, é de alta qualidade, enquanto aquela que é emitida pela Terra, a uma temperatura muito mais baixa, tem uma entropia muitíssimo mais elevada.

Ao encararmos a Natureza, usamos, quase instintivamente, um mapa mental, pré-determinado, mas que está profundamente radicado na nossa cultura. Crescemos e fomos educados com a ideia de que a Ciência tinha por fim dominar a

CIÊNCIA ATRAVÉS DA EUROPA

Inscrições em Workshops para professores

Lisboa, Outubro / Novembro 1994

O Projecto «Science across Europe», desenvolvido nos últimos três anos na área de ciência-tecnologia-sociedade por uma equipa internacional de professores, tem tido uma boa aceitação. Em Portugal, existem já algumas dezenas de professores que se disponibilizaram a testar as unidades e/ou se inscreveram na rede do projecto, com um recurso no ensino ou integrado em projectos de escola. Na continuação das actividades ligadas ao projecto, a equipa de coordenação em Portugal propõe-se dinamizar dois workshops (W1 e W2) para professores.

O workshop W1 destina-se aos professores que, tendo aplicado as unidades, poderão partilhar as suas experiências na utilização do projecto.

O workshop W2 destina-se a divulgar o projecto e o modo de utilização das unidades entre professores que manifestaram interesse em conhecer o projecto e propõem inscrever as suas escolas na rede do projecto.

Os workshops, limitados a 30 participantes, realizar-se-ão na Av. da República, 37-4.º — 1000 Lisboa, nas seguintes datas:

- 18 de Outubro para o workshop W1;
- 24 de Novembro de 1993 para o workshop W2 (este decorrerá durante a Semana Europeia para a Cultura Científica). Para as inscrições e informações complementares, contactar:

Doutora MARIANA PEREIRA

Departamento de Educação FCUL,
Faculdade Ciências, Campo Grande — C1 - 3,
1700 Lisboa; Fax 01-757 36 24.

EPS - 14th General Conference on Condensed Matter Division

Madrid, March 28-31, 1994

Plenary Lectures

“Interaction of ions and electrons with bulk and surfaces”, P. Echenique (San Sebastian).

“Physics with third generation synchrotron radiation sources”, M. Altarelli (Grenoble).

“Nuclear magnetic ordering in metals”, F. Pobell (Bayreuth).

“Fullerenes”, H.W. Kroto (Sussex).

“Statistical mechanics” M.Parrinello (Ruschlikom).

“Quantum interference phenomena in superconducting mesoscopic systems”, V.V. Moshchalkov (Leuven).

Parallel Sessions

- A. Semiconductors and Insulators
- B. Surfaces and Interfaces
- C. Liquids and Statistical Mechanics
- D. Magnetism and Metals
- E. Macromolecules and Chemical Physics

Important dates:

- Dec. 1, 1993 - Deadline for reception of abstracts
Feb. 20, 1994 - Deadline for registration
- Deadline for hotel reservation

Further information:

14th General Conference of the Condensed Matter Division, GCCMD-14, Madrid 94

*Instituto de Ciencia de Materiales, Sede A,
CSIC - Serrano 144
E-28006 Madrid Spain
Tel. (34) (1) 561 88 06 (ext. 329/328)
Fax: (34) (1) 411 76 51*

Natureza. Era a ideia corrente que se estendeu pelos tempos, se acentuou com a grande revolução científica dos séculos XVII e XVIII e prosseguiu nos séculos XVIII e XIX, com a industrialização, e se tem vindo a prolongar, praticamente até aos nossos dias.

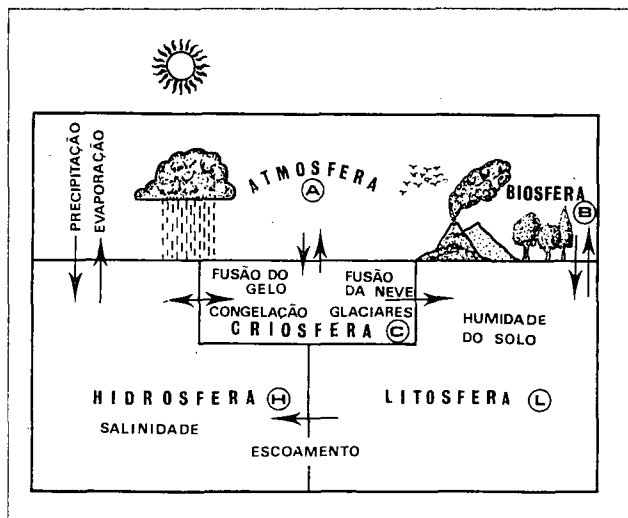


Fig. 1 — Diagrama esquemático do sistema climático.

É uma atitude característica da aproximação dualística da Ciência e da Filosofia Clássicas do Ocidente. De um lado, o homem, um ser livre e racional; do outro, uma Natureza que deve ser submetida, como se se tratasse dum autómato gigante, cujas regras de comportamento, a que chamamos «leis», a Ciência se encarregaria de descobrir e decifrar.

Esta dualidade exprime simultaneamente a imagem científica irreal do mundo e uma atitude, culturalmente viciada, *ab initio*. Era como se o ambiente tivesse sido criado, exclusivamente, para servir o homem.

A situação sobre estas duas atitudes evoluiu muito nas últimas décadas. Hoje temos uma posição de maior humildade e reconhecemos que o homem faz parte integrante do ambiente. A ciência actual já não nos induz a encarar a Natureza como um macrosistema, quase estacionário, que deva ser submetido à vontade do homem, nem como uma espécie qualquer de entidade passiva que possa e deva ser simplesmente manipulada. Começa a existir uma maior consciencialização dos perigos ecológicos e da nossa responsabilidade perante a Natureza.

À posição optimista dum progresso ilimitado e pré-determinado da Humanidade, sucedeu uma atitude de preocupação, de ansiedade e de dúvida. Constitui como que um sinal do período de transição por que a Cultura do



Licenciado em Matemática e em Geofísica pela Universidade de Lisboa, doutorado em Ciências Geofísicas, José Pinto Peixoto é autor de uma obra científica cuja extensão e qualidade impuseram o seu nome a nível internacional. Desde muito cedo (1956) tornou-se professor e cientista visitante do Departamento da Meteorologia do Massachusetts Institute of Technology (MIT), onde se desloca regularmente. O prestígio adquirido leva-lo-ia a exercer funções em outras Universidades estrangeiras e em organismos como a Organização Meteorológica Mundial (OMM).

Entre nós, como professor catedrático da Faculdade de Ciências de Lisboa, director do Instituto Geofísico da Universidade de Lisboa, presidente da SPUIAGG (Secção Portuguesa das Uniões Internacionais de Astronomia, Geodesia e Geofísica), colaborador generoso e assíduo de muitas das nossas novas Universidades, etc., a sua acção tem sido uma coerência e nível invulgares.

O mesmo se pode dizer da colaboração que deu, durante mais de um quarto de século, ao Instituto Nacional de Investigação Científica (anteriormente Instituto da Alta Cultura), bem como à Academia das Ciências de Lisboa para cuja presidência tem sido repetidamente eleito.

A sua obra científica, espalhada por prestigiadas publicações, tem abordado temas de Hidrologia, Meteorologia, Climatologia, Fundamentos da Termodinâmica, Teoria da Informação, História da Ciência, etc..

É autor de várias monografias publicadas pela OMM, UNESCO, Secretaria de Estado do Ambiente. Muito recentemente, publicou livros «Sistemas, Entropia, Coesão» (com F. Carvalho Rodrigues) e «The Physics of Climate» (com Abraham Oort).

Pinto Peixoto tem recebido numerosas distinções e provas de apreço, sendo de destacar — para além de vários prémios prestigiantes — a reunião científica internacional, organizada por ocasião dos seus 65 anos, com a presença e colaboração de eminentes cientistas. Numa revista como a *Gazeta de Física* seria imperdoável não pôr em destaque as invulgares qualidades didácticas do Prof. Pinto Peixoto. Não é qualquer Professor que consegue manter o seu auditório — alunos ou colegas — suspensos de uma exposição, e sempre com facetas inesperadas, que pode prolongar-se... Deus sabe até quando.

Tudo isto, para mais, feito por um Homem de cultura e grande generosidade.

homem está a passar. Hoje, na «aldeia global» em que vivemos, reconhecemos a fragilidade e a vulnerabilidade da nave terrestre em que somos obrigados a co-habitar. E temos que estar todos empenhados em preservar as reservas limitadas que nos são oferecidas, em solo, em água e em ar.

São um património colectivo da Humanidade, que urge proteger e respeitar para garantir a nossa sobrevivência. São muito mais do que recursos naturais que devemos gerir bem!

Uma situação que está a mudar tão rápida e profundamente tem que forçosamente gerar grandes tensões. É certo que os problemas e as tensões que surgem na interacção homem-ambiente não podem ser resolvidos, exclusivamente, pela Ciência. Mas, devemos acentuar bem, que sem o concurso da Ciência não é possível a sua solução.

Dentro desta concepção globalizante, o homem que é também um sistema termodinâmico aberto, faz parte integrante do ambiente, mas com responsabilidade de ser racional. Ganhou a consciência de que deixou de ser um mero espectador, ou um usufrutuário exclusivo dos bens que o rodeiam. Esta nova atitude gerou o conceito do *ambiente sustentável* em que a prudência na sua utilização e a preocupação com a sua preservação são hoje factores determinantes.

Por outro lado, do ponto de vista científico, com os progressos obtidos no estudo dos sistemas dinâmicos, o ambiente tem de ser encarado como um sistema dinâmico não linear, sujeito a um caos determinista, o que implica uma nova visão da atitude do homem perante o ambiente.

2. O Determinismo Científico e o Ambiente

2.1. A Génese do Determinismo Científico

A Ciência está também numa fase de transição. Simultaneamente, estamos a assistir a uma revolução tecnológica, que envolve principalmente a informação, a energia e a biologia. Os progressos, a que temos vindo a assistir e que afectam biliões de seres humanos, são o resultado da investigação científica e tecnológica desenvolvida, apenas, por um número relativamente reduzido de cientistas. Não há qualquer outro esforço colectivo, nem qualquer inovação, que tenham originado uma tal multiplicação de frutos para o bem-estar e qualidade de vida da Humanidade. Mas parece que estamos

ainda na fase inicial desta revolução científica, que já está a decorrer. Com efeito, não só se estão a alargar as fronteiras do nosso conhecimento, como também está a modificar-se o nosso modelo do saber sobre as concepções qualitativas do Mundo que nos rodeia.

A Ciência Clássica punha ênfase no *determinismo* e na *reversibilidade*; na *ordem* e na *regularidade*. O comportamento futuro dum sistema estava contido no seu presente, que, por sua vez, tinha sido determinado pelo passado. Do ponto de vista determinístico a distinção entre passado, presente e futuro era apenas uma questão de convenção.

Com o positivismo científico depressa se admitiu que as condições presentes, em conjunto com as leis que regem o comportamento de um sistema, «determinavam», completamente, as condições futuras. Esta hipótese assenta na atitude laplaciana do determinismo científico. Laplace escreveu o seu famoso tratado «*Mécanique Celeste*» nos fins do século XVIII e princípios do XIX aplicando as leis de Newton ao movimento dos corpos celestes. Como ele próprio dizia: o conhecimento das condições iniciais e a aplicação correcta das leis da Mecânica «determinam inexoravelmente» o movimento futuro dos corpos celestes, com todas as suas características, permitindo prever as suas posições, etc. Este determinismo laplaciano gerou na comunidade científica, durante todo o século XIX e o século XX, uma confiança quase ilimitada na utilização da Ciência e na sua aplicação ao estudo da Natureza!

Foi com base na «profissão de fé», que constituía o determinismo, que se começaram a investigar temas bem mais complexos (Termodinâmica, Dinâmica dos Flúidos, Mecânica Estatística, etc.). A esta atitude de confiança no determinismo científico não escaparam os meteorologistas (e outros cientistas das Ciências do Mundo Natural), que a partir do início do século XX começaram a utilizar as leis da Física, já bem estabelecidas, para a previsão do comportamento futuro da atmosfera. E, hoje, todos nós sabemos a importância que tem a previsão do tempo em todas as actividades humanas.

2.2. A ruptura com o determinismo científico

A primeira ruptura com o determinismo laplaciano deu-se por altura da década dos anos 20, já neste século, quando se começaram a compreender melhor os fenómenos à escala subatómica. Reconheceu-se que tinha que haver uma nova Mecânica para estudar o mundo sub-atómico, já que a Mecânica de Newton se revelou

incapaz e não correspondia às necessidades postas pela fenomenologia que se ia descobrindo, à escala atômica. Surgiu, assim, a «Mecânica Quântica», que postula uma dada «incerteza observacional» a que «não se pode escapar nem por princípio, nem na prática» (Princípio da Incerteza de Heisenberg).

Teve de se aceitar que os acontecimentos individuais, à escala atômica, vêm afectados dum dada incerteza, que só pode ser reduzida (mas nunca evitada, em termos absolutos) quando se consideram os valores médios estatísticos de um grande número de tais acontecimentos, que é precisamente o que se passa no mundo sub-atômico.

Como era de esperar, com a ruptura do primado do determinismo laplaciano houve um certo desconforto entre os cientistas, que se tinham habituado a ver neste princípio um «*non plus ultra*», a fronteira que separava a Ciência moderna, «livre e arejada», da Ciência primitiva, «casuísta e imbuída de superstições e de caprichos». O paradigma desta atitude foi personalizado por Einstein que até ao fim da vida resistiu à ideia dum base puramente probabilística da Física, porque «Deus não pode jogar aos dados».

Para avaliar até que ponto tem sido difícil modificar a nossa atitude, na adesão ao determinismo de Laplace, vamos recorrer ao testemunho de Max Planck. Planck, apesar de ser um dos criadores da Mecânica Quântica, em que um dos pilares é a teoria das probabilidades, era um determinista convicto. O Princípio da Causalidade, com todas as implicações que tem para o determinismo científico, era para ele a lei suprema da Natureza. O carácter estatístico da Mecânica Quântica devia atribuir-se, segundo Planck, à nossa interacção com a Natureza, que, se fosse deixada a si mesma, seria estritamente determinista.

Apesar desta revolução do pensamento da Ciência à escala atômica, continuava a aceitar-se que o comportamento do mundo macroscópico era diferente e que se podia e devia continuar a submeter-se ao determinismo laplaciano! Era uma nova manifestação do dualismo na atitude do homem, que lhe trazia um certo conforto e tranquilidade do ponto de vista intelectual.

No fim deste século estamos a transpor um dos grandes paradigmas que assentava na busca do *simples*, do *regular* e do *periódico*. Por toda a parte descobrimos, hoje, o *complexo*, a *multiplicidade*, a *diversidade*, a *desordem* e a *temporalidade*. É uma atitude geral em todos os domínios da investigação, mas que é particularmente evidente nas Ciências da Atmosfera, com todas as implicações que tem para o estudo do ambiente e

na mudança das nossas concepções sobre o Universo como um todo, como nos é dado pela Cosmologia Moderna.

A Astronomia Clássica, preocupava-se, fundamentalmente, com a regularidade dos movimentos periódicos e com a ordem que se manifestava no comportamento dos sistemas planetários, ou na estrutura das galáxias.

Mas quais são as origens, ou as razões desta reformulação da nossa atitude perante a fenomenologia do real? Supomos que um elemento importante foi a descoberta de que a irreversibilidade pode constituir uma fonte de ordem. Afinal, sabe-se agora que são possíveis as reconstituições de estruturas ordenadas e coerentes longe do equilíbrio (células de convecção de Bénard, etc.). Tudo se passa como se a irreversibilidade reconstituisse a ordem e reagrupasse, longe do equilíbrio, a informação que andava dispersa e quase perdida.

Outra razão determinante, é a melhor compreensão que temos agora dos sistemas dinâmicos não lineares, especialmente aqueles que estão sujeitos a condições instáveis de não equilíbrio.

O interesse por estes sistemas que são, afinal, a imagem matemática do mundo natural, aumentou de forma considerável na última década e o seu estudo tem levado a um crescimento quase explosivo do nosso conhecimento e do nosso saber.

A não linearidade e a instabilidade implicam uma grande sensibilidade para as condições iniciais, o que leva a uma perda de predictabilidade, ou mesmo à sua ausência total, o que é contrário às concepções do determinismo laplaciano. Foi a segunda ruptura com o determinismo clássico.

Reconhecemos hoje que a abordagem clássica, cuja ênfase incide sobre a *estabilidade*, a *regularidade*, a *permanência*, a *predictabilidade*, ignora aspectos essenciais dos sistemas naturais que são, em geral, instáveis e altamente não lineares. Os sistemas dinâmicos não lineares apresentam, fora do equilíbrio, uma variedade de comportamentos dinâmicos intrínsecos, muito complexos, tais como:

a) A possibilidade da coexistência de vários regimes simultaneamente estáveis, para certos valores dos parâmetros constitutivos que caracterizam o sistema;

b) A emergência de uma dinâmica caótica, em que um sistema de equações de evolução, determinístico, dá origem a um conjunto de soluções, aparentemente

erráticas e desordenadas, semelhantes, aos que seriam produzidos por processos estocásticos aleatórios.

De facto, não há a garantia de que o clima constitua um sistema *ergódico, transitivo*. Parece que se comporta como um sistema *quase transitivo*, com saltos relativamente rápidos, à escala do tempo geológico, que poderiam explicar a existência de grandes alternâncias do clima e alterações do Ambiente.

3. A Dinâmica dos Sistemas Caóticos

Definimos sistema caótico como aquele em que pequenas variações do estado, por vezes não detectáveis, podem produzir grandes variações em estados futuros.

O termo caótico classifica uma classe de movimentos de sistemas físicos deterministas, em que a evolução no decurso do tempo é sensível às condições iniciais. O caos tem uma estrutura subjacente que implica um certo ordenamento que não é, muitas vezes, visível no *espaço físico* e que se deve procurar no *espaço de fases*.

As variáveis dependentes, que representam as grandezas que definem o estado do sistema, ou os coeficientes de modelos espectrais (a única variável independente é o tempo) são tratadas como se fossem coordenadas num espaço cartesiano multidimensional, tais como os espaços de Gibbs e de Carathéodory da Termodinâmica, que constitui o *espaço de fase desejado*. O estado de um sistema num dado instante passa a ser representado por um ponto nesse espaço. À medida que o estado do sistema evolui no decurso do tempo, os pontos figurativos dos sucessivos estados descrevem no espaço de fases uma *trajectória*, ou uma *órbita*. Uma solução periódica é representada por uma órbita fechada, sem pontos múltiplos; uma solução estacionária reduz-se a um ponto fixo. Duas órbitas distintas nunca se podem intersectar, ainda que se possam aproximar, uma da outra, assintoticamente, visto que, por definição, um sistema não pode estar simultaneamente em dois estados diferentes; mas no decurso do tempo o sistema pode passar por estados quase idênticos, ou infinitamente próximos de estados anteriores.

Os sistemas físicos reais, com medidas finitas, isto é, com grandezas extensivas invariantes, ou limitadas, assumem uma importância especial na dinâmica dos sistemas não lineares dissipativos. O forçamento e a dissipação combinam-se para restringir todas as trajectórias a uma região confinada do espaço de fases e uma vez que a órbita penetra nesta região do espaço de fases correspondente à condição de invariância de uma

das suas propriedades, passa a permanecer nela indefinidamente. Para estes sistemas dinâmicos dissipativos pode definir-se um subconjunto do *espaço de fases* que se designa por *atractor* e que constitui o envolvente limite para que tendem, assintoticamente, as trajectórias acessíveis aos vários estados do sistema, quando as variações transientes desaparecem. Tudo se passa como se as trajectórias referentes a vários estados convergissem para esse conjunto atractor.

O *espaço físico* em que ocorre a circulação é substituído por um *espaço físico* abstracto, substituindo o comportamento da circulação física original pelas «trajectórias no espaço de fases». As propriedades da circulação real passam a ser estudadas através das propriedades topológicas das configurações no espaço físico, originando o que se pode chamar uma *dinâmica topológica* da circulação geral.

A principal causa da origem da complexidade é o fenómeno da *bifurcação*, que surge quando um regime repetitivo deixa de ser estável, podendo dar origem a um regime diferente do sistema, do ponto de vista qualitativo, ou topológico. Por exemplo, um estado de equilíbrio pode dar origem a dois estados de equilíbrio.

Em teoria dos sistemas dinâmicos estes regimes são representados por «objectos geométricos» designados, como dissemos, por atractores, imersos num espaço enquadrado pelas variáveis que participam na dinâmica do sistema, que é o espaço físico.

O atractor que descreve um regime repetitivo estacionário (localmente independente do tempo) reduz-se a um ponto, se for um estado de equilíbrio; se o regime for periódico, reduz-se a uma curva fechada sem pontos singulares. Os movimentos nestes atractores são previsíveis, no sentido em que pequenos erros na definição de um ponto (estado) do atractor se mantêm constantes ou decrescem com o tempo. Pelo contrário, o atractor dum regime caótico contém trajectórias aperiódicas que mostram uma grande sensibilidade para as condições iniciais; pequenas perturbações nos dados iniciais crescem, em média, exponencialmente, originando movimentos caóticos e imprevisíveis. Os sistemas caóticos, portanto, não têm predictabilidade. Apresentam uma *geometria fractal*, isto é, o atractor constitui uma entidade geométrica, difícil de visualizar na geometria euclidiana, com a mesma forma em todas as escalas (auto-semelhança) cuja dimensão (à Hausdorff) é um número fraccionário e não inteiro. É por isso que o seu atractor, sendo um *fractal*, se designa por atractor estranho (Fig. 2).

Este atrator não é constituído por um simples ponto, nem por uma curva, nem por uma variedade de ordem superior. É constituído por uma infinidade complexa de variedades. De facto, uma recta intersecta o atrator estranho numa infinidade não numerável de pontos, separados por subconjuntos contínuos, que constituem, afinal, um conjunto de Cantor.

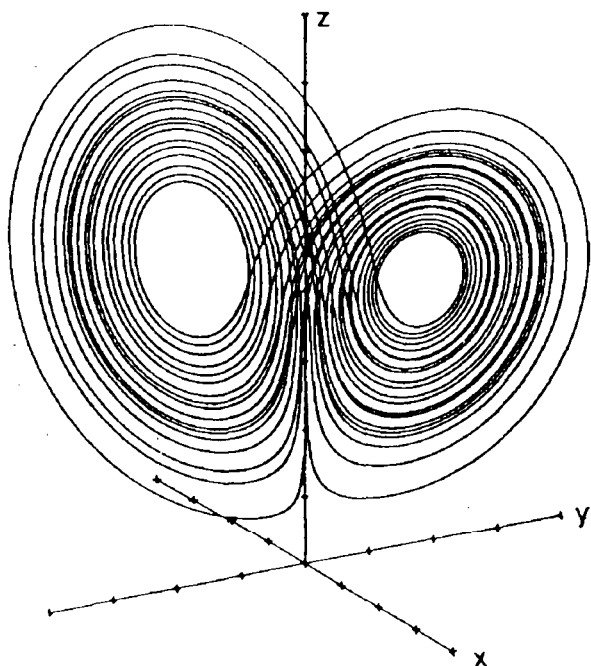


Fig. 2 — Atrator estranho (borboleta de Lorenz). Repetições com saltos inesperados: a curva representando uma sequência de estados do modelo de convecção enrola-se sobre si mesma ao longo de um eixo horizontal mas as «espessuras» vão variando progressivamente até que muda para a direcção oposta.

O conceito de predictabilidade é muito mais amplo e abrangente do que o conceito usual de previsão. A predictabilidade é a capacidade potencial, não só de avaliar a evolução cronológica do sistema, mas também a capacidade de prever regimes de comportamento, a sua variabilidade e a transição entre os diversos regimes.

A sensibilidade às condições iniciais pode ser quantificada em termos dos expoentes de Lyapunov. Estes medem a taxa da divergência, exponencial com o tempo, dos estados de dois sistemas, inicialmente vizinhos. Os expoentes de Lyapunov permitem quantificar as propriedades médias da estabilidade de um atrator. Um expoente de Lyapunov positivo indica um movimento instável de um sistema dinâmico, com trajectórias limitadas. Um sistema caótico tem, pelo menos, um expoente de Lyapunov positivo (1).

O aumento da incerteza no decurso do tempo de um sistema caótico pode interpretar-se em termos de perda de informação acerca das condições iniciais. Trata-se afinal de um aumento da entropia e que reflecte a taxa a que pontos inicialmente vizinhos no espaço de fases se dispersam no decurso do tempo. Esta taxa pode exprimir-se em bits por segundo. Como é evidente, a entropia (topológica) está relacionada com os expoentes de Lyapunov.

Apesar de uma semelhança aparente e superficial, *caos* não é *acaso*. O caos é o comportamento aparentemente desordenado e turbulento dum sistema determinístico. Há, portanto, uma certa ordem no caos.

Outra propriedade dos sistemas caóticos é a de que os seus estados nunca se repetem de forma exacta, ainda que, em muitos casos, se possam comportar duma forma quase cíclica. De facto, se os estados se repetissem exactamente, não seriam caóticos, visto que a natureza «determinística» das leis naturais asseguraria um comportamento único, bem definido, do sistema, numa perpetuação do ciclo, enquanto o sistema não fosse perturbado do exterior.

A possibilidade de um comportamento caótico de sistemas dinâmicos é conhecida desde Poincaré (1891), quando estudou o problema dos três corpos da Mecânica Celeste. No entanto só foi, de facto, reconhecido e identificado em 1961-1963 pelo Prof. Edward Lorenz (M.I.T.), ao tentar resolver, por simulação matemática,

(1) Se, num determinado instante, considerarmos uma hipersfera de raio infinitesimal $\varepsilon(0)$, centrada num ponto do atrator, esta transforma-se num elipsóide, devido à não uniformidade do «movimento» das trajectórias no espaço de fases, cujos eixos principais são num instante posterior t , $\varepsilon_i(t)$. Os expoentes de Lyapunov definem-se a partir da expressão:

$$\gamma_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log_2 \left(\frac{\varepsilon_i(t)}{\varepsilon(0)} \right)$$

com $i = 1, 2, \dots, N$. Os expoentes positivos de Lyapunov medem a divergência exponencial média de trajectórias, que eram inicialmente muito próximas. Logo, os expoentes positivos permitem quantificar o grau de sensibilidade, da dependência das condições iniciais. Os expoentes na equação anterior vêm expressos em bits de informação por unidade de tempo. Se L representar a soma dos expoentes positivos, o tempo de duplicação dos erros é L^{-1} . Se as condições iniciais forem determinadas com rigor de l bits, então ao fim do tempo l/L a incerteza inicial ter-se-á estendido a todo o atrator. É com base no crescimento dos erros que os l permitem quantificar a predição.

um problema relacionado com a previsão numérica do tempo e depois com a convecção.

4. A Complexidade e a irregularidade da atmosfera

4.1. Caracterização da atmosfera

A atmosfera, que é o subsistema central do sistema climático, constitui um sistema extremamente complexo. Do ponto de vista termo-hidrodinâmico é um sistema heterogêneo, multicomponente e politérmico; é um sistema aberto, não isolado em que todos os estados são transientes. A atmosfera é um sistema sempre em movimento, com circulações numa vastíssima gama de escalas espaço-temporais em regime forçado pelos efeitos térmicos e mecânicos, num globo animado de movimento de rotação. Além disso, ao considerar a atmosfera como um subsistema do sistema climático global, não se podem ignorar as interações entre a atmosfera e os outros subsistemas complementares, designadamente, com a litosfera, os oceanos e a criosfera. Estas interações traduzem-se pelos fluxos de massa, de energia e de quantidade de movimento através da interface, nos dois sentidos. São interações não lineares que afectam o comportamento próprio de cada um deles, originam numerosos efeitos de retroacção que, por sua vez, se manifestam em escalas espaço-temporais muito variadas.

Devido à incidência desigual da radiação solar, entre as regiões tropicais e as regiões polares do globo, gera-se um aquecimento diferencial com um forte gradiente meridional da temperatura.

Estas diferenças de temperatura conduzem a desigualdades de densidade e de pressão, que vão originar a circulação da atmosfera (ventos). O aparecimento dos ventos confirma o Princípio de LeChatelier-Bräun, pois são gerados exactamente pelas diferenças de temperatura, que eles depois tendem a opor-se e a reduzir, ao transportarem entalpia e energia latente das regiões mais aquecidas para as regiões mais frias (Fig. 3).

A atmosfera é um sistema irregular e dissipativo. A dissipação resulta dos mecanismos de interacção não lineares, internos e externos, estes devidos às condições fronteiras, já de si variáveis no tempo. Os mecanismos de interacção não lineares, permitem a transferência de energia entre a grande diversidade de escalas espaço-temporais, que ocorrem no interior da atmosfera, devido à sua instabilidade intrínseca. Essa transferência dá-se em regime de cascata descendente, à Kolmogoroff. A não linearidade e a acção dos agentes forçadores externos,

não permitem formular previsões, para além de um horizonte temporal limitado, condicionando a predictabilidade da atmosfera. É evidente que a atmosfera apresenta em alguns aspectos um comportamento quase periódico em que os estados futuros são previsíveis. É o caso das variações diurnas e sazonais forçadas por factores cósmicos externos (alternância dos dias e das noites e a sequência das estações do ano). No entanto, não são estes os casos que têm interesse na previsão do tempo, mas sim os que resultam da irregularidade e da diversidade da fenomenologia da atmosfera. Sem esta irregularidade e diversidade não faria sentido a previsão do tempo.

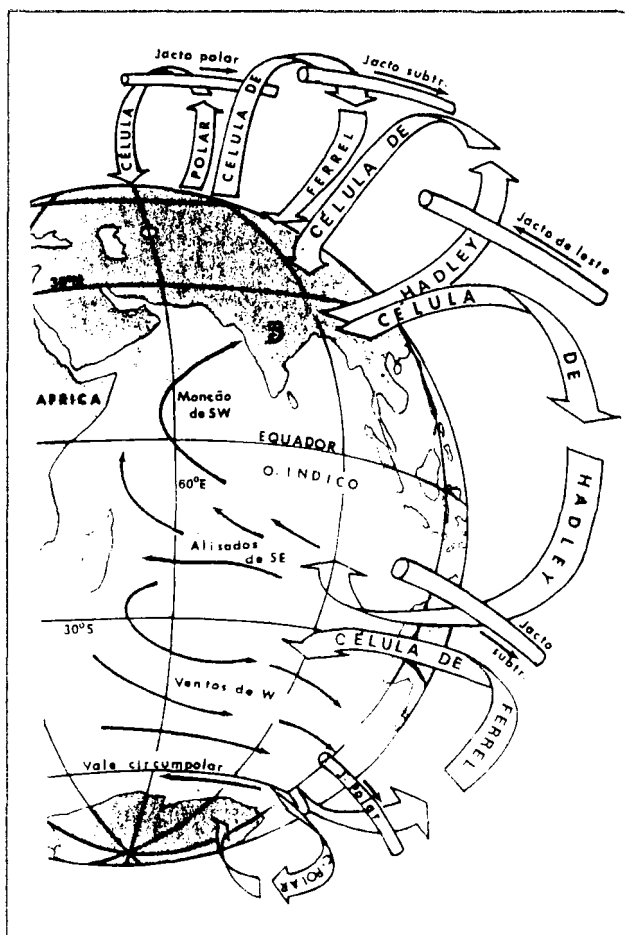


Fig. 3 — Descrição esquemática da circulação geral da atmosfera.

Vejamos agora que a atmosfera não é um sistema canónico e que todos os estados são transientes. Dos vários sistemas de circulação que ocorrem na atmosfera uns são estáveis (convergentes), enquanto outros são instáveis (divergentes). Diz-se que um sistema é estável se, quando for ligeiramente perturbado, converge para

uma sucessão de estados que poderiam ter ocorrido na ausência da perturbação. Um sistema diz-se instável quando o estado a seguir a uma pequena perturbação diverge dos estados futuros que poderiam ter ocorrido senão se verificasse a perturbação.

Se tomarmos como referência o estado de equilíbrio, diríamos que um sistema é estável, ou instável, quando perturbado tende a regressar, ou a afastar-se, respectivamente do estado de equilíbrio.

Estes conceitos são extremamente importantes na análise da predictabilidade, que para sistemas estáveis pode ser ilimitada, enquanto para sistemas instáveis é muito limitada.

A atmosfera é um sistema instável no sentido de que dois estados, que num dado instante inicial diferem muito pouco entre si, evoluem no decurso do tempo para estados progressivamente mais afastados (Fig. 4). É portanto, um sistema que tem uma grande sensibilidade para as condições iniciais, um dos requisitos para que a atmosfera tenha um comportamento *caótico* (isto é, irregular, desordenado e turbulento). A diversidade, a irregularidade e a variabilidade do comportamento da atmosfera são propriedades inerentes ao *caos*, que predomina na atmosfera, e são determinantes para a unidade do seu comportamento.

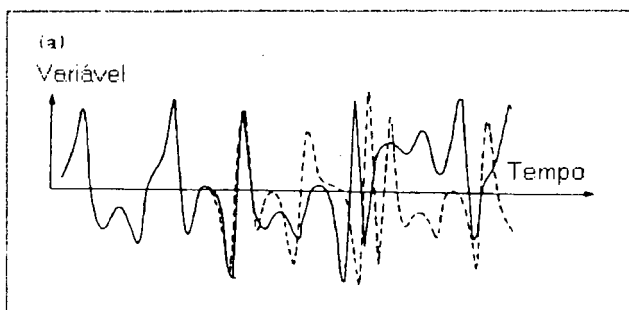


Fig. 4 — Duas saídas do mesmo modelo com condições iniciais muitíssimo próximas. A partir de dois terços do eixo dos tempos a semelhança entre as variáveis previstas (ordenadas) desaparece virtualmente.

4.2. Simulação matemática da atmosfera: limitações

Aceita-se que a estrutura que se observa na atmosfera e o seu comportamento são bem representadas pelas Leis da Física e da Química e que não há razões para se pôr em dúvida a validade das leis fundamentais da Física, estabelecidas no decorrer dos três últimos séculos. De facto, muitas das leis que se aplicam ao estudo da atmosfera, designadamente as leis da estática e da

dinâmica dos fluidos, as leis da conservação da massa e da energia e as leis da radiação, são leis bem conhecidas e que já deram as suas provas. No entanto, mesmo quando se considera um fenómeno simples da atmosfera, o seu estudo requer a aplicação simultânea de várias leis. Acontece, porém, que muitas vezes se dá a circunstância feliz de haver uma, ou apenas um número reduzido, que têm um papel determinante no estudo de um certo fenómeno.

Em geral, os sistemas dinâmicos são descritos em termos de conceitos geométricos, e o estado de um sistema, como a atmosfera, pode ser definido por um número limitado de grandezas (variância do sistema) que podem ser funções do tempo. As variações destas grandezas satisfazem, como no caso da atmosfera, a um número equivalente de equações.

É importante referir que o progresso no estudo da atmosfera assenta na combinação das observações com a teoria.

A modelação matemática conduz a resultados independentes das observações, mas que têm de ser validados e baseados no método observacional.

É também importante referir que os modelos, ainda que assentem nas equações da dinâmica, por serem modelos, diferem nas hipóteses formuladas, nas simplificações introduzidas, nas parametrizações que se utilizam, na natureza das condições fronteira, etc. Mas, todas estas hipóteses de trabalho e simplificações resultam do conhecimento que se tem do sistema físico que é a atmosfera e este é obtido por via experimental, observacional. Encarada desta forma, a simulação matemática é um exercício numérico gigantesco, que usa a Matemática para descrever, incompletamente, o que já se conhece, e a Análise Numérica para iterar o que «se põe» e «o que se vai obtendo», que «se volta a pôr», etc.

As variações atmosféricas são especificadas apenas nos nós de um *discretum* conceptual, ou ajustam-se a desenvolvimentos em série de Fourier (ou de outras quaisquer funções ortogonais), que têm de ser, inevitavelmente, truncadas. Estas formas de representação dos campos das grandezas meteorológicas, tanto num caso como no outro, não permitem representar a estrutura mais fina dos campos, filtrando, assim, a fenomenologia de menor escala.

A resolução do *discretum* que cobre a atmosfera é da ordem dos 100 km na horizontal e de 1 a 2 Km. na vertical. A esta resolução, usada em modelos operacionais da previsão do tempo, correspondem milhões e milhões de números. Os modelos

correspondentes, que usam desenvolvimentos de Fourier, ou outro sistema adequado de funções ortogonais, ao longo de paralelos na horizontal, estendem esse desenvolvimento até um número muito considerável de componentes (o ECMWF usa um modelo T-213).

Ambos os tipos de especificação seriam inconcebíveis e, até mesmo, proibitivos para o tratamento da atmosfera em estudos do clima. Daí a necessidade de utilizar modelos reduzidos, ditos de *ordem mais baixa*, em que o número de equações pode descer para menos de dez, ou em que se conservem apenas um número reduzido de componentes espectrais.

Até há poucos anos acreditava-se que a previsão do tempo se devia vir a aperfeiçoar à medida que os meios computacionais, a qualidade e a quantidade das observações melhorassem e aumentassem e os modelos matemáticos se aproximassem do modelo perfeito.

A simulação matemática parecia duplicar os aspectos essenciais do comportamento físico da atmosfera. Esperava-se que com os sucessivos aperfeiçoamentos viria a ser possível obter um modelo (quase) perfeito que incluísse toda a fenomenologia característica do comportamento do sistema físico real que é a atmosfera, permitindo, portanto, uma predictabilidade quase ilimitada.

Esta era a posição dos meteorologistas na década de 70, até aos trabalhos de Lorenz que mostravam a limitação da predictabilidade intrínseca da atmosfera. Um modelo perfeito duplicaria, portanto, a falta de predictabilidade da atmosfera (Fig. 5).

Além do conceito intrínseco de predictabilidade, inerente ao sistema físico real, anteriormente definido, é necessário definir a predictabilidade do modelo matemático que simula o comportamento da atmosfera. Assim, define-se capacidade predictiva do modelo como um limite teórico assintótico da possibilidade das previsões do mesmo.

5. A instabilidade e a predictabilidade da atmosfera

Os atratores do sistema dinâmico, que é a atmosfera, estão confinados ao interior de uma região limitada. O ponto de fase permanece estatisticamente muito mais tempo sobre o atrator do que nas regiões vizinhas. *Os atratores podem identificar-se com as estatísticas a longo prazo, isto é, com o clima.*

Analisemos algumas consequências e implicações da teoria dos sistemas dinâmicos não lineares, quando aplicada aos problemas do tempo e do clima, ou, mais especificamente, aos problemas da atmosfera. Esta

PREDICTIVE SKILL IN NUMERICAL WEATHER PREDICTION

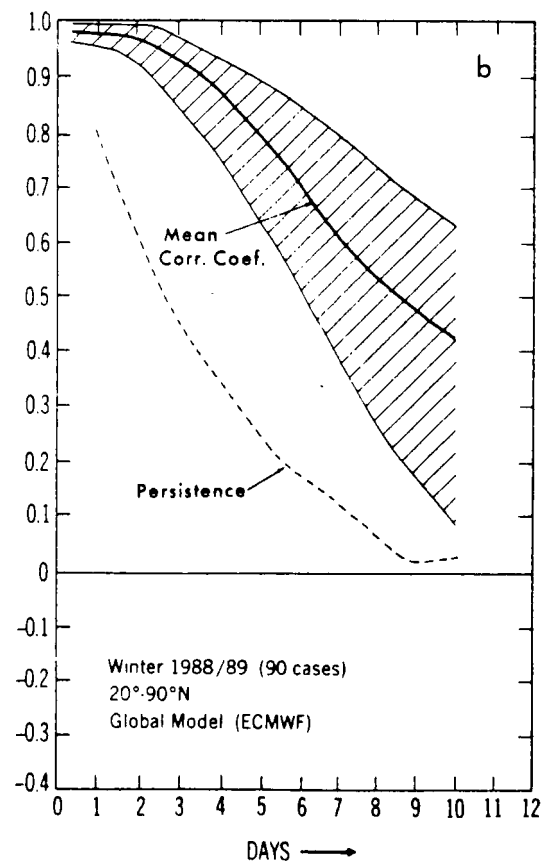
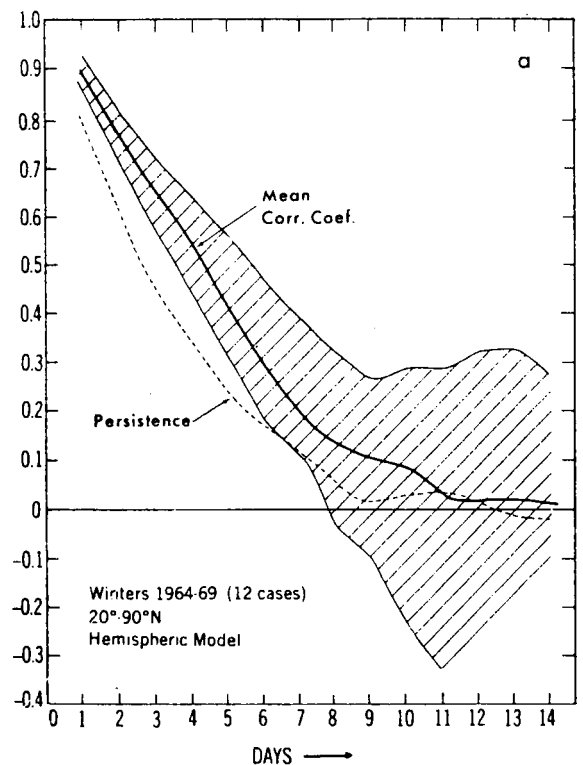


Fig. 5 — Melhoria na previsão numérica do tempo e o seu progresso desde o início dos anos 60 até ao final dos anos 80.

(Segundo Peixoto e Dort, 1992)

constitui um sistema dissipativo e possui mecanismos de interação não lineares entre várias escalas do movimento e está sujeita a efeitos forçadores externos.

A instabilidade parece ser a propriedade mais fundamental dos sistemas dinâmicos não lineares e pode, como dissemos, ser considerada a causa da irregularidade.

As soluções são instáveis, relativamente a pequenas perturbações. A aperiodicidade implica instabilidade, que por sua vez vai originar irregularidade e, portanto, falta de predictabilidade.

Devemos acentuar que algumas das flutuações que se observam na atmosfera são de natureza intrínseca e não resultam de irregularidades ou de variabilidade forçadoras externas.

Mas, a maior influência da irregularidade da atmosfera é a que se repercute na sua predictabilidade, isto é, na limitação que impõe à capacidade de prever o tempo, para períodos alongados. *A predictabilidade é o limite teórico para que tendem assintoticamente as possibilidades de prever o comportamento futuro de um sistema.* Um sistema, mesmo determinista, terá uma predictabilidade limitada, ou ilimitada, conforme seja instável ou estável.

A predictabilidade da atmosfera envolve aspectos muito mais vastos e profundos do que o de simplesmente prever o estado do tempo num certo e determinado instante. Pode englobar a previsão das condições médias da atmosfera num dado intervalo de tempo, numa dada região, a previsão do comportamento dinâmico de várias escalas espaciais, da duração e persistência de vários regimes de circulação da atmosfera, ou da transição de um regime para outro, etc.

Essa predictabilidade pode ser tratada e quantificada do ponto de vista da dinâmica dos sistemas caóticos, recorrendo em especial à estrutura dos atratores, a partir dos expoentes de Lyapunov.

Lorenz mostrou que no caso dos sistemas meteorológicos, o inverso dos expoentes de Lyapunov é da ordem de 2,5 dias. Logo a quantidade de informação requerida para elaborar uma previsão aumenta exponencialmente com o tempo com um factor de 2,5 dias. Nestas circunstâncias uma previsão perfeita (correcta, precisa) do estado do tempo nunca poderá ir além dum certo limite. Verifica-se assim que a predictabilidade do sistema meteorológico é limitada, talvez até pouco mais que uma semana.

Pode agora pôr-se a questão de saber se a qualidade da previsão a 24 horas pode ser melhorada a ponto de ser

quase infalível. Parece altamente improvável que mesmo um modelo perfeito possa produzir uma previsão aproximadamente exacta. De facto, o tempo de dobragem de 2,5 dias, obtido por Lorenz, aplica-se a escalas de centenas de quilómetros na horizontal. Ora para fenómenos de menor escala, como trovoadas, os erros dobram em algumas horas, ou em minutos, em vez de dias.

Portanto, mesmo na hipótese, pouco realista, de se observarem com suficiente rigor escalas destas dimensões numa base global, como as escalas estão dinamicamente ligadas entre si, os erros nas escalas inferiores, uma vez estabelecidos, vão introduzir erros nas escalas mais elevadas que, por sua vez, passam a aumentar, como se estivessem presentes nas condições iniciais à escala sinóptica.

Comparemos estes resultados com os da Mecânica Celeste em que é possível prever a posição dos planetas com períodos de milhões de anos.

É evidente que esta enorme diferença de predictabilidade, num e noutro caso, não é devido à falta de talento dos meteorologistas, quando comparados com os astrónomos. É, apenas, o resultado da diferença entre as naturezas dos dois sistemas dinâmicos correspondentes. De facto, nós sabemos que o sistema meteorológico constitui um sistema dinâmico instável, aperiódico, incompatível com os paradigmas de investigação deterministas, baseados na Física Clássica. É esta instabilidade que gera a falta de predictabilidade intrínseca, que não se pode atribuir ao carácter quase aleatório do tempo, nem às complicações provenientes da presença de uma grande variedade de factores, de difícil controlo, como durante tantos anos fomos levados, apressadamente, a concluir.

A falta de predictabilidade continuaria a verificar-se, mesmo que fosse possível conhecer exactamente a acção de factores não controláveis. Resulta da complexidade inerente à dinâmica intrínseca dos sistemas caóticos, como é a atmosfera.

Há mais de duas décadas que os cientistas da atmosfera têm vindo a investigar as causas e as consequências do que a experiência e a evidência revelavam sobre as limitações no horizonte temporal das previsões determinísticas do estado da atmosfera.

A expectativa clássica de que as soluções, com condições iniciais semelhantes, seriam também semelhantes, foi-se esbatendo e tornou-se, mesmo,

insustentável. Verificou-se, ainda, que, para além de um certo período de tempo, as previsões obtidas pelas sucessivas iterações não tinham contrapartida com a realidade. É o que se tem vindo a verificar com as previsões a 30 dias, por exemplo.

Os trabalhos de Lorenz vieram demonstrar que, afinal se verificava uma situação completamente diferente; as soluções tornam-se rapidamente independentes das condições iniciais, mas situam-se, no entanto, dentro de um domínio estatístico confinado. À medida que o movimento se vai desenvolvendo, as imagens dum conjunto de pontos inicialmente vizinhos num espaço multidimensional de fase, vão seguir trajectórias diferentes, divergindo em várias direcções, dobrando-se, por vezes, algumas sobre si mesmas. Ao fim de algum tempo as imagens dos pontos que eram inicialmente vizinhos, afastam-se e a bola inicial que continha os pontos imagens, deforma-se, ampliando-se numas direcções e comprimindo-se noutras.

Temos que reconhecer que os sistemas caóticos constituem a generalidade e não a excepção dos sistemas naturais. Foram os computadores, com a grande capacidade de cálculo, de simulação e de representação gráfica, que permitiram lançar luz e até visualizar o comportamento destes sistemas dinâmicos não lineares e ajudaram a compreender as características, aparentemente estranhas e confusas, das configurações e a perceber a estrutura do movimento caótico.

O comportamento caótico está associado à não linearidade e à perda de estabilidade das soluções estacionárias e periódicas. Assim, o comportamento caótico da atmosfera provém, exactamente, dos mesmos mecanismos de instabilidade que os meteorologistas sabem que vão determinar e manter o aparecimento de depressões, de ciclones, de sistemas convectivos e da turbulência.

Tem-se apenas um conhecimento impreciso do estado actual da atmosfera, visto que as observações não são rigorosas. O conhecimento é ainda incompleto, porque a informação só é fornecida em pontos isolados do *discretum* da rede e a atmosfera é um *continuum*.

A limitação da informação sobre o estado inicial da atmosfera permitiria definir uma distribuição de estados possíveis, compatíveis com a informação do sistema, constituindo uma colectividade estatística. O sistema passaria a ser descrito por uma evolução de probabilidade, uma posição semelhante à da Mecânica Estatística. Mas neste caso, não é a natureza estocástica que limita a predictabilidade da atmosfera, mas sim a instabilidade do sistema.

Ora, dentro destes limites existem realmente numerosíssimos estados diferentes da atmosfera e não é possível identificar, com exactidão, qual é o «verdadeiro» que se observa. Há uma incerteza que não é possível dirimir, em tudo análoga ao que se passa na Mecânica Estatística, quando se quer identificar o microestado instantâneo que realiza o macroestado observado. Como a atmosfera é muito sensível às condições iniciais, isto é, estados muito próximos (dentro do limite do erro das observações) podem, eventualmente, produzir soluções muito afastadas e como não podemos assegurar, da multiplicidade dos estados aproximadamente iguais, qual é o verdadeiro estado da atmosfera, falta-nos o fundamento para dizer qual de entre os vários estados futuros possíveis, tão largamente diferentes, é o que ocorre num determinado instante futuro, suficientemente afastado. Por outras palavras, a previsão correcta a longo prazo das condições meteorológicas torna-se impossível.

O conhecimento inevitavelmente incompleto, que temos das condições iniciais da atmosfera, não nos permite formular previsões, fora dum horizonte temporal limitado, condicionado pela sua instabilidade, que é o factor essencial que determina a predictabilidade.

Os limites da predictabilidade de vários fenómenos atmosféricos têm, como se calcula, uma grande importância para a previsão do tempo. Verificou-se muitas vezes que duas previsões numéricas, usando o mesmo modelo, mas com condições iniciais ligeiramente diferentes, começavam a divergir, e ao fim de algum tempo ficavam sem qualquer correlação. À medida que o intervalo de previsão aumenta, as diferenças entre as soluções são ampliadas pelos mecanismos da instabilidade.

Os limites da predictabilidade e a sua melhor especificação passaram a ser um dos grandes desafios que se têm posto nos últimos tempos aos meteorologistas, assim como o de saber se se pode determinar a predictabilidade inerente a um caso específico. Ora, em princípio, tal é possível, porque as condições iniciais podem ser perturbadas e as várias simulações matemáticas revelarão a taxa de divergência das soluções.

Poderiam aplicar-se técnicas relativamente sofisticadas no espaço de fases dos modelos espectrais para determinar essas taxas de divergência (expoentes de Lyapunov), mas seriam ainda impraticáveis por causa da dimensão do espaço de fases de qualquer modelo útil na prática. A predictabilidade começa a ser encarada como mais uma grandeza dinâmica a prever, em vez de ser tratada como uma grandeza que se deve calcular,

estatisticamente *a posteriori*. A dimensão do espaço de fases é dada pelo número de graus de liberdade do sistema. Estamos assim a colocar-nos agora a um nível diferente, que é o de prever a própria predictabilidade de um sistema, o que, na verdade, constitui um desafio insólito e inesperado.

A situação é, no entanto, provavelmente mais simples do que se supunha inicialmente. É que, independentemente das condições iniciais, as trajectórias no espaço de fases de um sistema caótico dissipativo, são atraídas e eventualmente confinadas a conjuntos finitos, por vezes bem delimitados, que são os atractores do sistema. No caso da atmosfera os pontos do atractor representam os estados que são compatíveis com o clima. Assim, as características estatísticas globais duma solução podem ser previstas qualitativamente, ainda que não se possa especificar o estado do sistema num certo e dado instante.

O reconhecimento de que a atmosfera constitui um sistema caótico, vem abrir novas perspectivas para as Ciências da Atmosfera. Em primeiro lugar, temos de encontrar directamente formas de descobrir, a partir das equações que regem a fenomenologia, sem ter de proceder a simulações se o sistema é caótico. Depois, temos de encontrar a estrutura matemática do atractor para o sistema caótico e as implicações estatísticas, que tem para os movimentos físicos reais, por via analítica. Por fim, devemos procurar escrever e calcular as trajectórias em coordenadas intrínsecas dentro dos atractores. Como se vê, do ponto de vista matemático, estamos a passar de um problema específico para um problema mais geral. O mesmo se passa na dinâmica dos fluidos não lineares: em vez de calcular apenas uma solução, ou realizar uma previsão, pretendemos determinar as propriedades duma família de soluções e avaliar as variações das características da família em resposta às variações das condições exteriores.

Se juntarmos a estes progressos as potencialidades e as capacidades da detecção remota a partir do espaço e da terra, as possibilidades dos computadores nos cálculos, na simulação e na visualização, e o melhor tratamento de dados poder-se-á vir a produzir uma verdadeira revolução nas Ciências da Atmosfera no século XXI.

O desenvolvimento de novos métodos matemáticos, para compreender melhor o comportamento dos sistemas caóticos constitui, de facto, um grande avanço conceptual para o melhor conhecimento da evolução dos sistemas não lineares e, em particular, da atmosfera.

6. Epílogo

Temos vindo a observar a atmosfera através duma «janela finita», relativamente estreita, que foi «aberta» pela Física Clássica. Agora, alargamos o horizonte e tanto as concepções determinísticas de Laplace, como as do Deus de Einstein que se «recusa a jogar aos dados o futuro do homem», passam a pertencer ao do passado.

Mas sejamos prudentes e justos. Não vamos julgar que a atitude determinista resultou de um vício de raciocínio, ou, de um defeito de pensamento humano. Enquadrava-se, de facto, numa perspectiva universal do diálogo do homem com a Natureza. Só que este diálogo não pode assentar em conceitos *a priori*, em que a razão do homem dita as regras que gostaríamos de impor à Natureza. Tem que se basear em construções teóricas e em respostas experimentais dadas pela Natureza. E é aqui que os ensinamentos da Meteorologia e da Climatologia se têm revelado cruciais para a compreensão da problemática do ambiente.

Sabemos que tanto o clima como o ambiente, sofreram grandes modificações em épocas geológicas passadas, quer numa escala espacial local, quer numa escala global. E nada nos leva a concluir que esta evolução não continue a verificar-se, ou que vá terminar. A compreensão, nem sempre fácil, dos mecanismos de base envolvidos nestas transformações e a dificuldade em prever e avaliar a tendência futura, tem constituído uma das grandes preocupações de várias gerações de cientistas em todos os domínios das Ciências Naturais, tomadas em sentido lato.

Em síntese, o ambiente global é, de facto, um sistema não linear, em que todos os estados são transientes e de não equilíbrio. Os seus componentes são sistemas caóticos. Somos assim levados a esperar que os resultados do estudo dos sistemas dinâmicos, designadamente os conceitos de bifurcação, de atractores estranhos, de expoentes de Lyapunov, etc., possam vir a ter aplicação no estudo do clima e nas suas relações com a qualidade futura do ambiente.

Parece que estamos a entrar numa nova era. É uma situação semelhante à que se passou durante o desenvolvimento da Mecânica Quântica. Começou por haver uma certa fermentação intelectual, até que a nova mecânica, depois de atingir a maturidade, se consolidou. Começaram depois a aparecer as aplicações.

Até agora a maior parte da investigação do caos tem sido descritiva. Um dos problemas fundamentais é o de distinguir o caos determinístico, do comportamento completamente aleatório e turbulento. O caos apresenta

uma certa ordem, com configurações, que não sendo periódicas, também não são completamente aleatórias: têm sempre um *atractor fractal*, por isso, estranho.

Levou mais de quinze anos antes que este tipo de configuração fenomenológica — os fractais — merecessem a atenção da comunidade científica e fossem reconhecidos como nova entidade geométrica. E levou ainda mais tempo para que a investigação sobre o caos ganhasse respeitabilidade científica. Na verdade, foi a consideração do comportamento caótico de alguns sistemas, que levou à revolução, a que hoje se assiste na ciência da dinâmica dos sistemas não lineares, e em especial das Ciências da Atmosfera.

Tudo indica que as observações e os modelos do clima parecem mostrar que os aspectos essenciais do comportamento do ambiente só se podem compreender em termos da nova linguagem qualitativa dos sistemas dinâmicos. Não serão de excluir as possibilidades da existência de estados estacionários múltiplos, quer, por exemplo, na química da estratosfera, quer no regime das circulações planetárias o que levaria à alternância de regimes climáticos, glaciais e interglaciais.

A concepção clássica da Ciência era muito atraente, porque parecia prometer um poder absoluto e, ao mesmo tempo, um isolamento ideal do homem perante a Natureza.

Ora este distanciamento tem vindo a estreitar-se, porque nos tempos mais recentes, admitimos que temos que nos inserir na Natureza e que o tempo irreversível não nos opõe ao ambiente, antes nos integra nele. A uma visão determinística do mundo objectivo, que privilegiava as leis simétricas no tempo, está a contrapor-se uma experiência subjectiva, baseada nas dinâmicas dos sistemas, que tem de aceitar a irreversibilidade do tempo e enfrentar, com decisão, a mensagem de solidariedade e de reciprocidade entre o Homem e a Natureza.

E, com encantamento, continuemos a escutar S. Francisco de Assis na sua concepção maravilhosa do ambiente, tão bem expressa no «Cântico do Sol».

«Louvado sejas, meu Senhor, pelo nosso irmão vento e pelo ar e pelas nuvens e pelo céu sereno que nos dá toda a espécie de tempo ...».

«Louvado sejas, meu Senhor, pela nossa irmã água, que é tão útil, tão preciosa e casta».

«Louvado sejas, meu Senhor, pela nossa irmã e Mãe Terra, que dá frutos variados, ervas e flores cloridas ... com os quais às tuas criaturas dás sustento».

Agradecimentos

Queremos agradecer aos Sr. Dr. Mário de Almeida (INMG) e ao Sr. Dr. António Tomé (UBI) a colaboração prestiosa que nos deram para a preparação desta lição.

BIBLIOGRAFIA

- ABARBANEL, H. R., BROWN and BRYANT, P. — Computing Lyapunov Spectrum of a dynamical system from observed time series, *Phys. Rev.*, A 43(6) 2287-2300. (1990)
- DUTTON, J. A. — *The Ceaseless Wind*, Dover 617 pp. (1986)
- ECKMANN, J. P., KAMPHORST, S., CILIBERTO, S. e RUELLE, D. — Lyapunov exponents from time series, *Phys. Rev.*, A, 34, 4971-4979. (1986)
- GHIL, M. — Dynamics, Statistics and Predictability of Planetary Flow Regimes: *In Irreversible Phenomena and Dynamical System Analyses in Geosciences*, editado por Nicolis e Nicolas D. Reidel Publishing Company. (1987)
- GRASSBERGER, P. — Do Climatic Attractors exist. *Nature*, 223, 609-612. (1986)
- LORENZ, E. N. — Deterministic non-periodic flow, *Jour. Atmos. Sci.*, 20, 130-141. (1963)
- LORENZ, E. N. — The Predictability of a Flow which possesses many scales of motion, *Tellus*, 21, 289-307. (1969)
- LORENZ, E. N. — Atmospheric Predictability Experiments with a large numerical model, *Tellus*, 34, 305-313. (1982)
- LORENZ, E. N. — Irregularity: a fundamental property of the atmosphere, *Tellus*, 36A, 98-110. (1984)
- LORENZ, E. N. — Can Chaos and intransitivity lead to interannual variability? *Tell*, 42A, 372-389. (1990)
- NICOLIS, C. e NICOLIS, G. — Is there a climatic attractor?, *Nature*, 311, 529-532. (1984)
- PEIXOTO, J. P. e OORT, A. — *Physics of Climate*, *Ame. Inst. of Phys.*, AIP, N.York. (1992)
- PRIGOGINE, I. e STENGERS, I. — *Order out of Chaos*, Bantam, N. York. (1983)
- SALTZMAN, B. — Climate System Analysis, *Adv. in Geophys.*, 25, 183-304. (1983)
- WOLF, A., SWIFT, B., SWINNEY e VASTANO, A. — Determining Lyapunov Exponents from a time Series, *Physica*, 16D, 285-317. (1985)

JUBILAÇÃO DO PROFESSOR JOSÉ PINTO PEIXOTO

O Professor José Pinto Peixoto é uma figura bem conhecida no meio científico e universitário português. O reconhecimento do seu mérito de cientista e professor não se limita, porém, às nossas fronteiras; é conhecido no mundo e faz parte da vanguarda da comunidade internacional dos cientistas deste século. Penso que se considera como um físico que utiliza a física para «descobrir» a atmosfera, ou de um ponto de vista mais geral, para descobrir o sistema climático da Terra.

Uma das principais mensagens da sua exemplar carreira de professor e investigador é a fidelidade à ciência fundamental, neste caso, a matemática e a física, como ferramentas e metodologias indispensáveis para interpretar e conhecer o clima ou qualquer outro domínio da ciência aplicada. O livro que publicou recentemente com Abraham H. Oort e cujo título é significativamente «Physics of Climate», constitui um testemunho eloquente dessa fidelidade.

O Prof. José Pinto Peixoto nasceu em Miuzela (Almeida) em 1922, licenciou-se em Ciências Matemáticas e em Ciências Geofísicas na Universidade de Lisboa, vindo a doutorar-se nesta mesma universidade depois de realizar estudos de pós-graduações no Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.). Desde 1957 é «Visiting Scientist» e «Visiting Professor» do M.I.T., Princeton University, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory/NOAA, de Princeton, Atmospheric Environmental Research e outros laboratórios dos E.U.A.. Para além destas actividades tem regido vários cursos específicos em diversas universidades nacionais e estrangeiras. Tem exercido a sua actividade de investigação seguintes grandes domínios: ciências da atmosfera, teoria do clima, hidrologia e termodinâmica (axiomática e conexão com a

teoria da informação). O Prof. José Pinto Peixoto tem desempenhado cargos de grande relevo e prestígio em várias instituições nacionais e estrangeiras. Presentemente é o Presidente da Academia das Ciências de Lisboa.

Não seria de modo algum possível nestas poucas linhas dar uma ideia do currículo do Prof. José Pinto Peixoto. Aliás, essa não é a minha intenção.

Gostaria apenas de deixar aqui o meu testemunho de reconhecimento do valor da sua obra e salientar a importância do seu exemplo na comunidade científica nacional. Todos aqueles que foram alunos do Prof. José Pinto Peixoto (foram muitos e eu fui um deles) não esquecem o rigor e o humor das suas aulas, a sua permanente vontade de cativar a atenção, de ir sempre um pouco mais além do que se podia prever e de cultivar a surpresa e a interrogação que

afinal constituem a essência da motivação científica.

O Prof. José Pinto Peixoto jubilou-se como professor catedrático de física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa em 18 de Junho de 1993. Nesse dia proferiu uma lição intitulada «A Física e o Ambiente: uma visão actual», cujo texto é publicado integralmente neste número da Gazeta da Física. O novo anfiteatro do edifício C3 da Faculdade, com mais de 320 lugares, esteve completamente cheio. Não foi uma despedida porque Pinto Peixoto continuará a sua actividade científica. Para todos os que assistiram foi uma oportunidade para ouvir o mestre e para lhe agradecer, de forma simples mas sincera, a sua dedicação à ciência e ao ensino no nosso país.

FILIFE DUARTE SANTOS
Departamento de Física da FCUL

FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA *

FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

H. BRUHNS

Commission of the European Communities,
DG XII Fusion Programme
Rue de la Loi 200, B-1049 Brussels,

Depois de, no último número da Gazeta, se terem descrito os conceitos básicos e o programa europeu de fusão termonuclear controlada (Gazeta de Física, vol. 16, n.º 2, 1993), apresenta-se aqui uma perspectiva dos desenvolvimentos futuros.

Ao JET seguir-se-á, no programa europeu, uma máquina chamada NET (Next European Torus), no quadro do programa «Next Step». Comercialmente, a energia da fusão só deverá estar acessível a meio do próximo século. A fusão nuclear é um dos maiores esforços científicos humanos, necessitando por isso de um planeamento rigoroso a longo prazo.

Status of fusion research

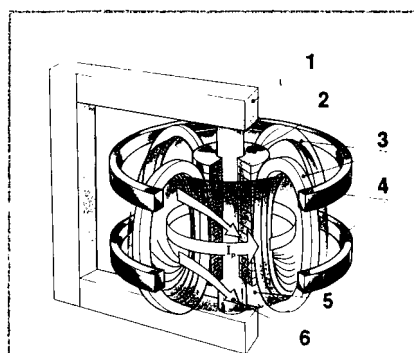
To improve the performance of fusion devices, a large number of complex, interconnected physical and technological developments have to be optimized. Progress in fusion research is therefore not a simple matter to describe. However, for an overall judgement, a figure of merit is the triple product of fuel density, fuel temperature and the energy confinement time. The first two factors determine how many fusion reactions will occur, the energy confinement time indicates how long it would take for the plasma to cool down if heating would be switched off: it is a measure of the thermal insulation between the hot plasma and the cool reactor vessel. Today, temperature gradients of 3 million degrees per centimetre can be maintained at the boundary of the plasma. The better the energy confinement time, the less heating power is required to maintain the fuel at the required temperature in a device. Of course, the energy confinement time rises with the volume of a given plasma.

Until now, there exists no fully satisfactory theoretical picture of the complicated transport and confinement

properties of a fusion plasma. Many aspects like macroscopic and microscopic plasma oscillations and fluctuations, the configurational features and effects caused by technically necessary deviations from ideal configurations have been studied in much detail, but still this field is governed by semi-empirical scaling laws and global models. However, the basis for extrapolations has greatly improved by statistical evaluations of large data bases assembled on many different devices.

A display of the triple product against the temperature for various Tokamaks of the large fusion programmes gives an impression of the requirements needed for a fusion reactor and shows that a temperature of about 15 keV (roughly 150 million degrees) must be achieved depending on the combination of the three factors in the triple product which can be varied to some extent. A measure for the approach to the reactor regime is given by the quality factor Q_{DT} , the ratio of the generated fusion power to the heating power. Curves of constant Q_{DT} can be plotted in the graph which shows

* Texto parcial da Conferência Plenária proferida na FÍSICA 92, Vila Real, 15-18 Setembro 1992. (conclusão).



Esquema de um Tokamak
(estado actual)

1. Circuito magnético (núcleo de transformador, em ferro).
2. Bobinas internas (circuito primário do transformador; campo magnético poloidal).
3. Bobinas de campo magnético toroidal.
4. Bobinas externas de campo magnético poloidal.
5. Plasma, transportando uma corrente de plasma I_p (circuito secundário do transformador).
6. Campo magnético helicoidal resultante (escala expandida).

the fusion performance of Tokamaks. $Q_{DT} = 1$ is called (scientific) break even: the fusion power equals the heating power which is needed to make the fuel react, For self-sustained burn of the plasma, i.e. ignition, $Q_{DT} > 5$ is necessary because only 1/5 of the fusion power is released via alpha-particles which can heat the plasma. The rest is in neutrons which directly transport their part of the fusion power to the breeding blanket at the inside of the reactor vessel. Here the neutron loose their energy, which converts into heat and is processed by the balance of plant, and they react with lithium to form tritium.

megawatt range has been released in accordance with the expectations for the specific fuel mixture (white dot in graph).

Future prospects

The Next Step and Related R&D issues

The development headed by JET has done more than just to provide the global performance. Many physical and technical problems, hitherto considered as serious obstacles, could be overcome, others were identified more clearly so that strategies towards their solution can be devised. In fact, a great step towards the demonstration of scientific feasibility of fusion has been taken and there now exists a substantial basis for heading towards the Next Step, the next, large experiment, which then should achieve reactor-like fusion power under long-burn conditions. Thereby, this Next Step machine would complete the demonstration of scientific feasibility and address the problems which must be solved for the demonstration of technological feasibility of fusion.

Several issues remain to be solved in order to have viable solutions for the Next Step experiment. JET and the Associations with their specialised devices are working on these problems which to some degree, however, will also be generic R&D issues for the Next Step programme itself. Some of them are explained below.

Power and Particle Exhaust

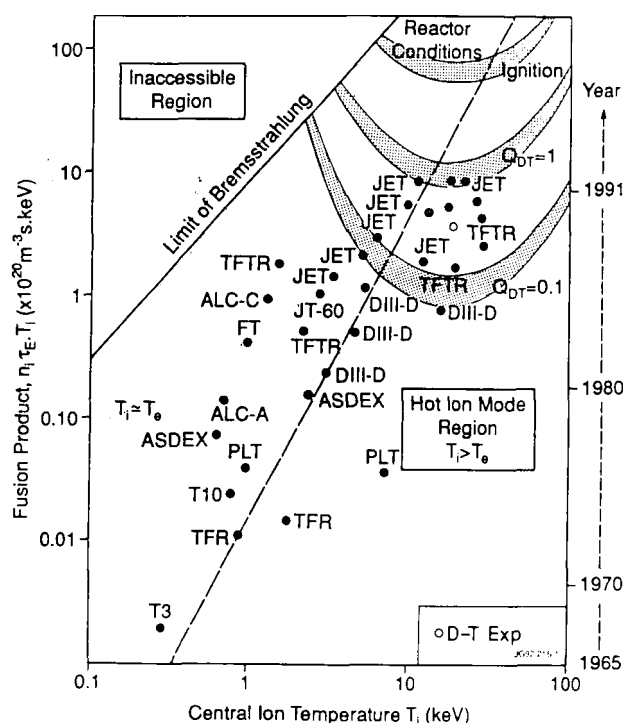
An important problem are the rather small surface areas which absorb power and particles exhausted from the plasma. Therefore, the power load on these areas, mainly on the so-called target plates, is extreme and material may be eroded. So far, a major limitation to JET's performance have been exhaust and impurity effects. The influx of particles from the target plates and the walls into the plasma must be controlled to keep the plasma pure.

Concepts to overcome this problem have been tested on specialized Tokamaks. Now, a magnetic divertor is being installed and JET aims at establishing reliable methods for plasma purity control in Next Step relevant conditions before it resumes, at the end of its life, operation with optimum D-T fuel, For these tasks, the duration of the JET Joint Undertaking has been extended for another four years, until end of 1996.

Operation and Disruption Control

Another difficulty is connected with the fact that temperature and density of the plasma, as well as current

Tokamak Performance



All data (except one) in the figure are from experiments in pure deuterium fuel (D-D) which is much less reactive than D-T fuel. Concerning the Q-value, a recalculation has been undertaken for assumed D-T operation. A time scale of progress in the triple product has been indicated; progress in recent years has been much faster than in previous decades. The best data result from experiments at JET which has more than attained the fuel temperature needed for a reactor. JET's D-D performance has already approached the (recalculated) break even; thus there remains only about a factor 5 in the triple product to achieve ignition.

In November 1991, the world's first experiments with deuterium-fuel containing a few percent tritium have been carried out in a preliminary D-T operation at JET. These experiments have confirmed the high performance of the device: for two seconds, fusion power in the

and magnetic field immersed into it, have radial profiles which must be maintained rather carefully in order to keep the performance optimum, and also to avoid disruptions or «vertical instabilities» which can drive the hot plasma against the wall. Position, shape and profile control are therefore important aspects and special heating and current-drive techniques must be developed.

Effects of Plasma Self-heating

The regime where fusion power becomes the dominant contribution to the heating of the plasma has not yet been accessible to experimental investigation and will be the proper domain of the Next Step. New effects may arise. The situation has been studied theoretically and some issues have been identified which need attention. As already explained, by the fundamentals of magnetic confinement fusion, it is impossible to get excessive fusion burn. Rather one has to devise means not to extinguish the burn: with fusion power, helium is produced — the ash of the fusion burn. It dilutes the fuel and therefore will reduce the fusion power. Thus, the helium particles must be transported efficiently to the outside of the plasma without, however, undesirably affecting the self-heating of the plasma and the energy transport.

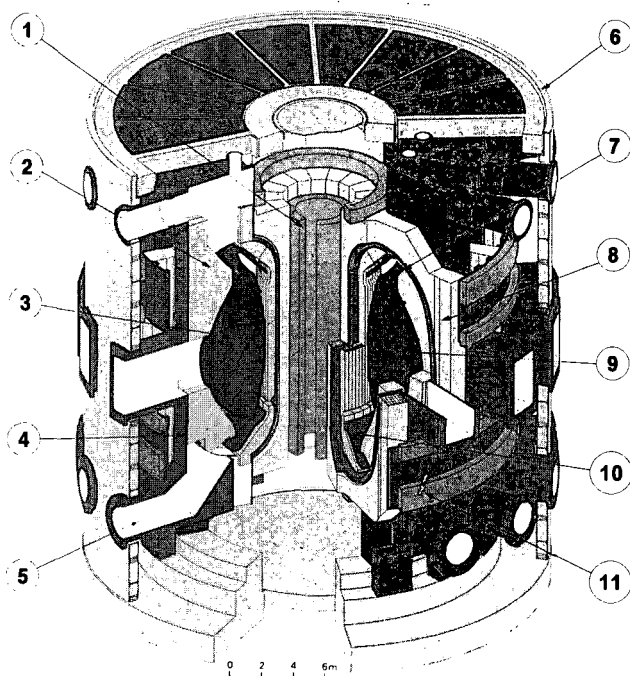
The Next Step: NET and ITER

During the last decade, parallel with the progress at JET, the Community Fusion Programme has prepared itself for the conception of a Next Step device, called Next European Torus (NET). However, in view of the large capital investment and the attraction of combining the know-how and potential of the world's major programmes, a quadripartite approach to the Next Step Tokamak has been started by Japan, the European Community, the United States and the Russian Federation (formerly the Soviet Union). By 1990, the conceptual design of the International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER, was established. This device, with a major radius in the order of 6 m, about twice as large as JET, would have about three times the plasma current of JET and would use Nb₃Sn superconducting magnetic field coils. The confined plasma would have a volume in the order of 1000 m³ and produce around 1 Gigawatt (GW) fusion power in extended burn pulses. Conceived as an experimental device, ITER is not designed to have a full blanket for tritium breeding but would rather be used as test-bed for blanket concepts. Also, the conventional part of a power station, the balance of plant for electricity production, will not be added.

ITER Engineering Design Activities

The Engineering Design Activities (EDA) for ITER are projected to last six years and to cost 1 billion Dollars; the negotiations for the EDA were concluded with the signature of an agreement by the four parties in July 1992. A team of about 200 professionals is now in the course of being established to work at three sites in Europe (Garching), Japan (Naka) and the USA (San Diego). Europe provides the ITER Director.

The ITER Device

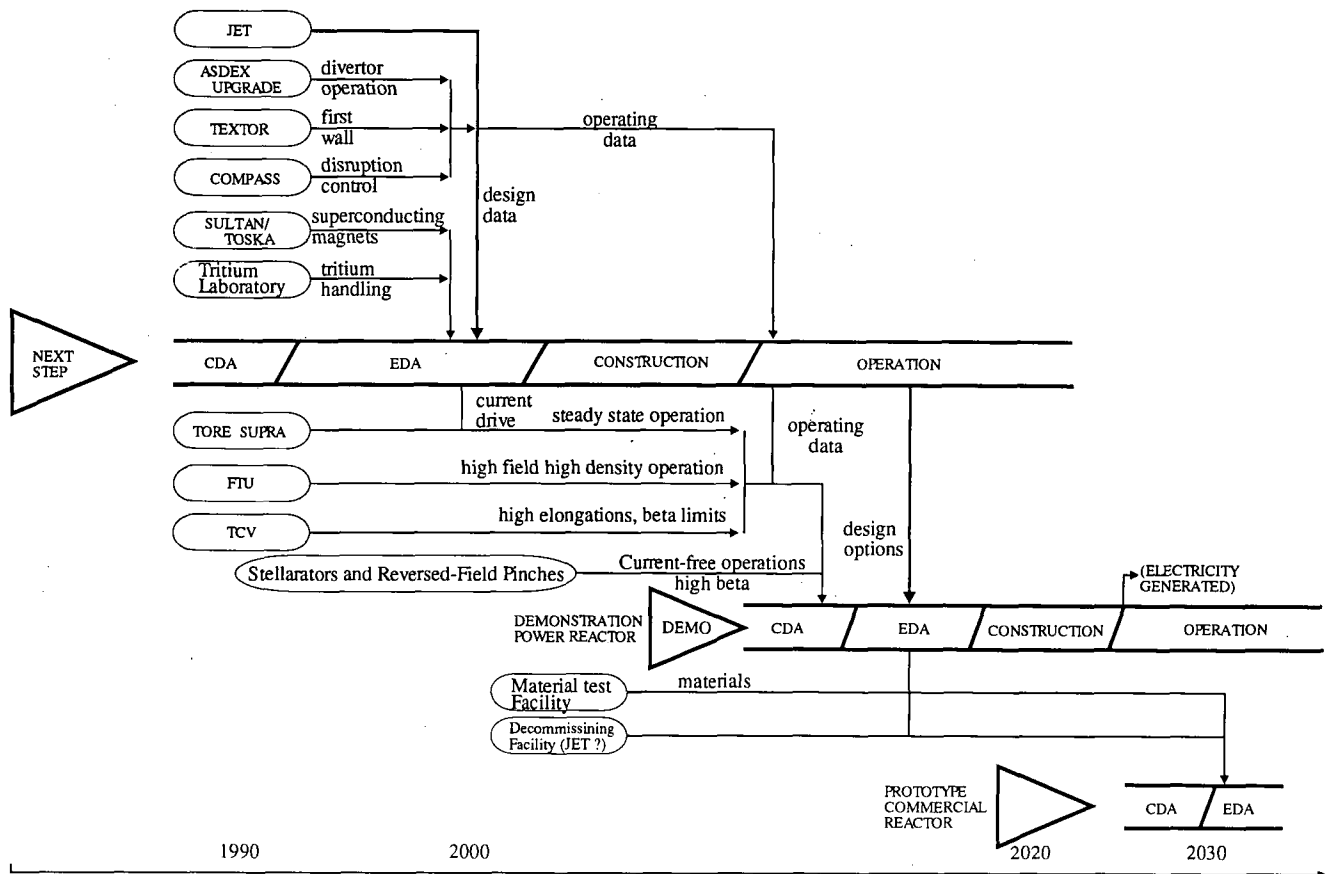


- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| 1 Central Solenoid | 7 Active Control Coils |
| 2 Shield / Blanket | 8 Toroidal Coils |
| 3 Plasma | 9 First Wall |
| 4 Vacuum Vessel - Shield | 10 Divertor Plates |
| 5 Plasma Exhaust | 11 Poloidal Field Coils |
| 6 Cryostat | |

During the ITER EDA the decision will have to be taken where to build the reactor. Europe will be a strong candidate for hosting this device. Its construction, estimated at about 5,000 million dollars will last approximately eight years. If the ITER collaboration would prove impossible beyond the design phase, the Community would be prepared to consider the realization of its own Next Step device.

The ITER time schedule foresees that ITER will start its operation within the mid-next decade, entering a first phase of Physics operation in order to complete the scientific information on a full-size fusion power

The European Fusion Strategy



producing plasma. The development of technological solutions for components of a fusion reactor would be the primary objective in the subsequent Technology Phase. As explained before, ITER itself already demands substantial technological developments. The major part of the EDA costs will go into these developments and the construction of prototypes for components. Part of this work goes beyond the capabilities of research institutions: industrial involvement in fusion becomes important. ITER, by its size and cost, is unlikely to test many modifications of concepts and components; its development plan must therefore be guided carefully: work on relevant specialised devices and a sufficient breadth of complementing R&D will also be necessary in the future.

Beyond the Next Step

In the European strategy the experience gained with the specialised devices and, in particular, with the Next Step will form the basis for the design of a Demonstration Reactor. Its conceptual design could be performed in parallel with the operation of ITER. It is envisaged that

the Demonstration Reactor will be the first electricity-producing fusion reactor. Concept improvements could enter its design: possible extensions of the parameter regime for Tokamak operation as well as the reactor potential of the Stellarator and of the RFP should be known by this time. In this context, the engineering design of a large Stellarator, Wendelstein VII-X, has been started. As mentioned, with progress in physics, work on the technological aspects of fusion increases in its importance. Development must be guided by environmental and safety criteria. In the perspective towards the ultimate goal, the prototype reactor, issues in particular are the conceptual design study for an electricity-producing fusion reactor and studies of its safety and environmental impact, as well as the development of suitable materials and of the reactor blanket. As a new facility, an intense neutron source for the testing of materials will be needed.

Conclusions

Fusion research has entered the phase where the experimental generation of fusion power in the gigawatt

range is within reach. To make further progress in reactor-oriented R&D, it is important to take this step.

The size and cost of the lead experiment in fusion R&D will be similar to those of other gigawatt power stations, and the timescales for design, construction and exploitation will be as long as those of other mega-projects. ITER, the Next Step, is becoming a central focus of the European (and the other Parties') magnetic confinement fusion programmes. In Europe, fusion research has been constantly streamlined to give maximum support to the central development line and to the lead project while maintaining a healthy breadth, necessary for a programme which needs and promises much innovation. While maintaining the support of JET, in the future, work in the Associations will be oriented increasingly towards ITER and towards collaborative efforts on some larger specialized devices. Such collaborations exist already to a significant extent; for example, the Portuguese Association is involved substantially in important research activities at other laboratories. As a source for innovation as well as for much needed education and training of young professionals, a solid basis of general fusion research has to be maintained. As in the past, also in the future such a well-balanced programme may save cost and time and will reduce the development risk.

Beyond ITER, taking into account all necessary development, engineering and construction times, a Demonstration Reactor might be envisaged to start operation around the year 2025. Commercially, fusion power will be available not before the middle of the next century: fusion is one of mankind's biggest and longest planned development efforts.

The expenditure of the Community Fusion Programme is about 450 Mio ECU per year of which 45% are provided by the Community budget. This compares to about half a percent of the annual electricity bill in the Community. In terms of the progress achieved so far and of the vanguard which Europe has achieved in fusion research, this effort has paid off — and it should be pursued in order to develop one of the few options to meet Europe's and mankind's future energy needs.

REFERENCES

- Evaluation of the Community Fusion Programme (1984-1990)*
U. Colombo *et al.*, CEC (1990), EUR 13104 EN.
Status Report on Controlled Nuclear Fusion, IAEA Vienna (1990) STI/PUB/872.

PRÉMIO EUROPHYSICS HEWLETT-PACKARD - 93

O Prémio Europhysics Hewlett-Packard é o mais importante atribuído na Europa a físicos da matéria condensada. Este ano foi atribuído aos físicos da ex-União Soviética, B. Alshuler, A. Aronov, D. Khmelnistkii, A. Larkin e B. Spivak, pelo seu «pioneiro trabalho teórico sobre fenómenos coerentes em condutores desordenados» (v. Europhysics News 24 (1993) 18). O estado dramático de desagregação da ciência na ex-União Soviética é testemunhado pelo facto daqueles investigadores se encontrarem actualmente todos emigrados, três nos Estados Unidos, um em Inglaterra e outro em Israel. Talvez o júri do Prémio, para além do reconhecimento de uma famosa escola de física teórica, estabelecida por Lev Landau, tenha querido chamar a atenção para o colapso da ciência nos países de Leste, que infelizmente ocasionou e continua a ocasionar a fuga ou o desemprego de muitos «cérebros». Aqueles físicos que trabalhavam em Moscovo e Leninegrado (hoje São Petersburgo) obtiveram, na linha de Landau, uma compreensão física simples da condutividade eléctrica e outros fenómenos de transporte em metais desordenados. Um dos laureados, A. Aronov, descreveu em Europhysics News 24 (1993) p. 98, os seus resultados sobre «coerência e interferência electrónica em condutores desordenados».

A comissão de selecção para o Prémio Europhysics convidou a comunidade de físicos europeus a efectuar propostas para o prémio de 1994. Os premiados devem ter efectuado contribuições no domínio da matéria condensada nos últimos cinco anos, que mostrem o potencial para possíveis aplicações em electrónica, ciências dos materiais ou outros domínios da engenharia. Os padrões de selecção têm sido bastante elevados, como mostra o facto de alguns premiados, no passado, terem depois obtido o prémio Nobel.

O que há de novo?

Nesta secção são apresentadas notícias e curtos resumos sobre recentes descobertas em Física e áreas afins, ideias novas que surgem, progressos experimentais com impacto na sociedade, etc.

Procurar-se-á também efectuar uma cobertura selectiva do noticiário que vai aparecendo numa série de revistas de actualidade.

Para esta cobertura contamos desde já com a colaboração de *Eduardo Lage, Matos Ferreira, Carlos Fiolhais, Ana Noronha, J. Lopes dos Santos, Margarida Telo Gama, Marília Thomaz, António Moreira Gonçalves, Anabela Martins. Agradecem-se outras colaborações para esta secção.*

P. A. M. DIRAC e a beleza da Física

Que diz ao leitor o nome «Dirac»? Designação de pomada para sapatos? Irmão de conhecido político francês?

Não deixa de ser irónico que tendo entrado no vocabulário comum palavras como «positrões» ou «antipartículas», quando não mesmo «antimundos» e «antiuniversos», se desconheça o autor destas e muitas outras ideias fundamentais de Física Moderna — Paul Adrien Maurice Dirac. Nascido em 1902, em Bristol (Inglaterra), Dirac é, por muitos, considerado um dos três grandes génios da Física do século XX (a par de Einstein e Bohr). Mas Dirac moveu-se num mundo de grande abstracção, sendo talvez, mais do que qualquer outro, a encarnação do «cientista numa torre-de-marfim», procurando, apenas, a beleza das equações fundamentais, como ele próprio definia o objectivo das suas investigações, desligado de qualquer preocupação de aplicações práticas ou tecnológicas.

Duma modéstia e taciturnidade legendárias, seria muito difícil a um interlocutor, que não o conhecesse, aperceber-se que estava na presença de alguém que ganhara o prémio Nobel aos 31 anos de idade e, mais importante, ficaria imortalizado, na história da ciência, pela fecundidade e originalidade das ideias que desenvolveu, sobretudo entre 1925 e 1933: a teoria das transformações (para Dirac, a sua obra mais importante), que unifica e generaliza as formulações diversas e aparentemente incompatíveis da Mecânica Quântica então embrionária, para a qual Dirac contribuiu ainda com o conceito fundamental de «observável»; a equação relativista do electrão, marco permanente da Física, nascida da necessidade de compatibilizar os princípios da

relatividade (restrita) com a teoria quântica, e de onde, num passe de magia, Dirac extraiu o spin do electrão, o acoplamento spin-orbita, o desdobramento fino das riscas de hidrogénio (reproduzindo os resultados de Sommerfeld) e... os estados de energia negativa. Estes estados foram reinterpretados por Dirac, inventando a ideia louca dos buracos ou vazios que se manifestam como partículas com as mesmas propriedades do electrão, mas carga oposta (e, portanto, momento magnético oposto) — são os positrões, que viriam a ser descobertos em 1932, por Anderson, e que abriram uma nova visão do mundo, um mundo dual, onde cada partícula tem associada uma antipartícula, prótão com antiprótão, neutrão com antineutrão, quark com antiquark, neutrino com antineutrino, etc.

Mas não ficaram por aqui as contribuições de Dirac. Bastariam os seus artigos fundamentais sobre electrodinâmica quântica para o colocarem ao nível dos gigantes da Física deste século, apesar de Dirac se ter apercebido, desde o início, das enormes dificuldades para libertar a teoria de divergências matemáticas e que, ainda hoje, permanecem por consertar, pelo menos com a elegância que Dirac exigia a toda a teoria (Dirac foi sempre um grande crítico dos processos de renormalização de Schwinger, Feynman e Tomonaga). Foi essa constante busca da beleza das equações que o levou a reformular as equações de Maxwell, introduzindo uma simetria nas fontes dos campos eléctrico e magnético, conduzindo-o à invenção do monopólo magnético, que, entre outras coisas, explicaria a quantificação da carga eléctrica, mas que ainda não teve confirmação experimental (que seria de enorme importância para a Cosmologia), apesar de Dirac considerar que dificilmente perceberia que a natureza tivesse desperdiçado uma tal oportunidade para criar essa partícula! E não podem deixar de ser referidas a sua

contribuição para a estatística dos fermiões (a estatística de Fermi-Dirac), a construção de um operador de permuta de spins (e que está na base do hamiltoniano de Heisenberg, peça fundamental de qualquer teoria do magnetismo), a teoria da variação das constantes fundamentais (que Dirac procurou utilizar em Cosmologia), a invenção da notação, hoje universalmente seguida em teoria quântica, dos «kets» e «bras» (aparentemente, Dirac ignorava o significado vulgar deste último termo!), ou mesmo (pasmem-se!) uma invenção experimental para separar isotopos (desenvolvida durante a II Guerra Mundial) — são, talvez obras menores do seu curriculum, mas fariam inchar de vaidade um qualquer menos prendado.

A um outro nível, deverá ser referida a sua obra «Principles of Quantum Mechanics», ainda hoje modelo de apresentação da teoria quântica, quer pela economia de linguagem, quer pela beleza da sua lógica formal, quer pela robustez da sua coerência. Aliás, Dirac dava as aulas lendo o seu livro, pois, segundo justificava, não conseguiria dizer melhor do que o que havia escrito!

O leitor ter-se-á apercebido da riqueza intelectual de Dirac. Mas que dizer do seu lado humano? Como explicar ou perceber a sua genialidade — obra dos genes ou da cultura? Será interessante notar a extrema importância, pela negativa, que o pai teve (ao contrário do que acontecera com Feynman), a ponto de Dirac, aos 36 anos, perante a morte do pai, confessar à mulher (irmã de E. Wigner, com quem casara um ano antes) que se sentia «muito mais livre, agora». Mas que, como pai, iria apresentar o mesmo distanciamento dos filhos! Que influência teve Cambridge, onde começou por estudar com Fowler, apresentou a primeira tese sobre Mecânica Quântica, leccionou o primeiro curso de Mecânica Quântica, e, aos 30 anos, herdou-a a cátedra de Newton (a célebre «Lucasian chair», hoje ocupada por S. Hawking)? Que importância tiveram a companhia de Heisenberg, Pauli, Fermi (seus contemporâneos) e, sobretudo, Bohr, no instituto do qual passaria grandes temporadas? Devemos aceitar, como Dirac nos quer fazer crer, que ele teve a sorte de nascer numa época onde era fácil a um físico de segunda categoria fazer trabalho de primeira categoria, ao contrário do que se passa agora, onde é difícil, mesmo a um físico de primeira categoria fazer trabalho de segunda categoria? Modéstia de Dirac, claro, mas sempre satisfaz os nossos egos...

Dirac morreu em 1985, mas já antes era uma lenda da Física, uma personalidade solitária, introspectiva e genial, objecto de múltiplos estudos da História e Filosofia das Ciências. Num artigo da «Scientific American», R. Corby Horis e Helga Kragh, historiadores de Física (o primeiro é

professor dessa especialidade na universidade americana de Cornell) apresentam diversos testemunhos de contemporâneos de Dirac e tentam penetrar no homem, por detrás do cientista, procurando fazer luz sobre personagem tão singular da história.

Scientific American, pág. 62, Maio 1993

E. L.

O Litoral Escondido

Onde se encontra a maior parte da água na Terra? A resposta parece óbvia, já que dois terços da superfície terrestre é constituída pelos oceanos.

No entanto, as aparências iludem e nos últimos anos geólogos e geofísicos começam a estar convencidos de que a maior parte da água pode estar dissolvida nas rochas que constituem o manto e o núcleo. Segundo as estimativas, essa água daria para encher os oceanos 10 vezes!

Recentemente, a possibilidade de obter no laboratório temperaturas e pressões comparáveis às que verificam no manto e mesmo no núcleo terrestre veio revolucionar o nosso conhecimento do interior da Terra. Nas novas células de alta pressão uma pequena amostra de rocha é apertada entre as faces de dois cristais de diamante, através dos quais se faz passar um feixe de laser de potência (ver caixa no artigo «The Core-Mantle Boundary» na «Scientific American» de Maio 1993). Como as faces dos diamantes são muito pequenas, conseguem-se atingir pressões da ordem de 250 000 atmosferas e temperaturas na amostra de 1700°C.

Pressões muito elevadas, tal como temperaturas elevadas, suprimem a possibilidade de o material fracturar, tornando-se dúctil e maleável, como acontece na cera e no plástico a temperaturas mais correntes. Este facto veio corroborar a ideia de que o material do manto terrestre tem movimentos de convecção como um fluido, embora muito lentos, em escalas de tempo de dezenas ou centenas de milhões de anos. É essa convecção interior que leva ao movimento das placas tectónicas, dando origem aos sismos, erupções vulcânicas, formação de montanhas e do fundo do mar, modelando a superfície terrestre.

Neste quadro, a existência de sismos com epicentro a grande profundidade permanecia um facto inexplicado visto que as condições de pressão e temperatura a estas profundidades (da ordem das 250 000 atmosferas e entre

1400°C e 1700°C) são incompatíveis com a possibilidade de a rocha fracturar ou deslizar ao longo de falhas, que são os mecanismos que dão origem aos sismos mais superficiais. Qual é então a origem destes sismos?

Uma das primeiras explicações propostas data dos anos 30 e prevê que a estrutura cristalina dos minerais que constituem as rochas possa mudar devido às condições de elevada pressão e temperatura do interior do manto. De facto, uma transição de uma rede cristalina para outra próxima na forma pode ocorrer bruscamente: por exemplo, uma estrutura cúbica pode passar a romboédrica. Ao contrário das transições de fase usuais, como a fusão do gelo, em que a estrutura cristalina muda gradualmente, neste caso todos os átomos movem-se rápida e coerentemente para as novas posições de equilíbrio, sendo estes movimentos acompanhados por vibrações, associadas a ruídos característicos de ruptura. São as transições martensíticas, que ocorrem ao arrefecer o aço e nalguns materiais cerâmicos e metálicos, em condições muito particulares de pressão e temperatura. Que tipos de materiais poderiam estar envolvidos nos sismos de grande profundidade?

Olhando para as regiões de globo onde a maior parte destes sismos profundos ocorre, verificamos que correspondem a regiões de subducção no extremo de uma placa tectónica, onde a crosta terrestre mais velha é puxada para o interior do manto, por debaixo de outra placa tectónica. Tal é o caso por exemplo da costa oeste da América do Sul e do norte e dos arcos de ilhas do Pacífico, como as Aleútas.

Antes de serem «puxadas» para o interior da Terra, os materiais constituintes da placa (85% piroxenas e olivinas) permanecem um certo tempo no fundo do mar onde são hidratados, originando-se hidroxilicatos. Quando se sujeita uma pequena amostra de hidroxilicato às pressões e temperaturas a que se dão os sismos profundos, dão-se transformações martensíticas! As vibrações das amostras, mesmo minúsculas, produzem sons audíveis que, depois de devidamente escalados, correspondiam a sismos de magnitudes 5 e 7 na escala de Richter!

Portanto uma enorme quantidade de água está a regressar ao manto terrestre nas zonas de subducção, um facto até aqui inteiramente ignorado. Ao longo da história da Terra, uma quantidade de água comparável à da actual hidrosfera regressou ao interior da Terra. Por outro lado, resultados experimentais mostram que uma vez atingidas as pressões e temperaturas do interior do manto terrestre, a água dissolvida nas rochas não se liberta. Minerais hidroxilicatados muito densos tornam-se estáveis a pressões acima de 50 000 atmosferas, mesmo a

temperaturas acima de 1000°C. Isto significa que toda a água que foi subduzida regressou ao interior da Terra, não voltando necessariamente ao ciclo hidrológico. Este facto contraria a teoria até aqui aceite sobre a origem da hidrosfera terrestre segundo a qual toda a água teria provindo da desidratação do manto e núcleo imediatamente após a formação da Terra, quando o planeta ainda estava suficientemente quente.

As novas experiências vêm assim pôr em causa os nossos conhecimentos sobre a formação dos oceanos, mostrando, além disso, que a água inicialmente dissolvida nos minerais que constituem o núcleo e o manto pode não ter sequer chegado a ser toda libertada. Estimativas apontam para uma quantidade de água «escondida» que pode ir até cerca de 10 vezes a que actualmente está contida nos oceanos. Daí o título do artigo de R. Jeanloz, «O litoral escondido», uma nova fronteira para o nosso conhecimento da Terra.

The Hidden Shore, R. Jeanloz, The Sciences, Jan. / Fev. 1993

A. N. C.

Ciência para além do zero absoluto

Que na Finlândia faz muito frio, já todos sabem. Mas que possam ser atingidas temperaturas da ordem μK ou pK (isto é, 10^{-9}K) só talvez saiba quem conhecer o grupo de P. Hakonen, da Universidade de Tecnologia de Helsínquia, que se tem dedicado a estudar as ordenações magnéticas de spins nucleares (na prata ou no ródio), numa «demanda do zero absoluto». As temperaturas agora atingidas são as mais próximas de $T = 0$ que alguma vez se conseguiu chegar - possivelmente, em nenhum outro lugar do Universo se terá estado tão perto dessa meta, que é contudo inatingível.

O leitor recordará que o conceito de temperatura absoluta T (igual à temperatura em $^{\circ}\text{C}$, adicionada de 273,16) surge, em Termodinâmica, do estudo do ciclo de Carnot: uma máquina térmica, funcionando em ciclo reversível, absorve calor (Q_1) da fonte quente e cede calor (Q_2) à fonte fria, com $Q_2 / Q_1 = T_2 / T_1$, relação (de Clausius) que define a razão das temperaturas absolutas. Por outro lado, verificou-se que a equação de estado de um gás perfeito (e um gás real aproxima-se tanto mais de um gás perfeito quanto menor for a densidade) faz intervir a temperatura absoluta. Esta não é mais que a pressão de uma mole de gás multiplicado pelo volume que ocupa e dividida pela constante dos gases perfeitos

($R = 2 \text{ cal / mole}^\circ\text{C}$): Mais tarde, a Física Estatística elucidou a natureza da temperatura absoluta — se um sistema está em equilíbrio térmico à temperatura T , ele passará por todos os seus estados microscópicos, mas não com igual frequência: a probabilidade de o encontrar num estado com energia E é proporcional ao factor de Boltzmann $e^{-E/k_B T}$ ($k_B = R/N_A = 1,4 \times 10^{-23} \text{ J / K}$ é a constante de Boltzmann, N_A é o número de Avogadro). Quanto mais alta for a energia de um estado, tanto menos frequente será encontrado sistema nesse estado!

Consideremos, agora, um sistema de spins (pequenos magnetos, cada um com momento magnético μ) sob a acção de um campo magnético externo B . Se pudermos ignorar as interacções entre os spins (porque B é «grande») e destes com a rede cristalina ou os electrões (porque as temperaturas são muito «baixas»), então a energia de um spin reduz-se ao termo de Zeeman ($E = -\mu B$) — ela é tanto mais pequena quanto mais o spin se alinha paralelamente ao campo. Estando os spins em equilíbrio térmico não admira que haja mais spins paralelos (factor de Boltzmann $= e^{\mu B/k_B T}$) que antiparalelos ($e^{-\mu B/k_B T}$) ao campo, daqui resultando uma pequena magnetização, paralela ao campo e com ele se anulando, o que justifica a designação para este comportamento de paramagnetismo (de Pauli). O leitor entende, agora, como se podem atingir temperaturas muito baixas — isole o sistema de spins (de modo a «congelar» as populações dos estados microscópicos) e diminua gradualmente o campo — como a razão B/T não se altera, T irá diminuir. Esta é a técnica de desmagnetização adiabática. Mas nem ela nem qualquer outra poderão atingir o zero absoluto. Essa impossibilidade foi erigida em terceiro princípio da Termodinâmica, mas no caso presente vemos a sua razão física — quando o campo externo for muito pequeno, não podemos ignorar os termos de interacção entre os spins, originando um campo magnético «efectivo» que limita a temperatura final do sistema. Para spins nucleares, as interacções entre spins (as inevitáveis interacções dipolares magnéticas, mas também, em metais, as que têm origem no mecanismo de Ruderman-Kittel) são realmente muito pequenas, pelo que não admira que as temperaturas mais baixas sejam atingidas nestes sistemas.

Mas o grupo finlandês não se limitou a atingir temperaturas positivas muito baixas — também conseguiu pequeníssimas temperaturas absolutas negativas. Como é isso possível? Nada na Termodinâmica exige que a temperatura absoluta seja sempre positiva, embora esse seja o caso mais frequente e, realmente, assim tem de ser para a equação de estado de um gás perfeito (a temperatura absoluta «é» a energia cinética média de um átomo). Porém, num sistema de

spins a equação de estado é outra e não estamos impossibilitados de observar $T < 0$. Considere o leitor o sistema de spins anterior, em equilíbrio a uma temperatura positiva, sob acção de um campo magnético externo, mas isolado do «resto do universo». Se invertermos subitamente o campo magnético, o que acontece? Os spins que apontam para «cima», permanecem para «cima», mas agora têm uma energia de Zeeman muito grande, porque o campo aponta para «baixo». Ora, como antes da inversão havia mais spins para «cima» que para «baixo», após a inversão haverá mais spins opostos ao campo que a ele paralelos. O factor de Boltzmann, para uma tal inversão de população, exige $T < 0$. É claro que isto é assim enquanto o sistema permanecer isolado — mas lentamente as interacções com o «exterior» levarão os spins a alinhar preferencialmente com o campo, o que os faz perder energia mas aproxima a sua população da «normalidade» ($T > 0$). Isto é, um sistema com $T < 0$ passa a $T > 0$ perdendo energia — se efectuarmos um ciclo de Carnot entre tais fontes, seremos obrigados a concluir (correctamente) que a fonte quente tem temperatura absoluta negativa, tanto mais negativa quanto mais «quente», como o exige a relação de Clausius. O leitor reconhecerá que só razões históricas nos levam a continuar a utilizar a temperatura como grandeza termodinâmica — se nos habituássemos à grandeza — $1/T$, nenhum destes aparentes absurdos nos chocaria!

Physics World, p. 24, Julho 1993

E. L.

Anti-hidrogénio

Os extraordinários desenvolvimentos verificados, nos últimos dez anos, em diversas tecnologias fundamentais, permitem, hoje, começar-se a pensar em experiências que, ainda há pouco, seriam consideradas impossíveis ou utópicas. Os avanços registados na produção e armazenamento de antipartículas, nas técnicas de «arrefecimento» por laser e na espectroscopia de alta precisão (capaz de medir riscas atómicas com erros de 1 parte em 10^{18}) levam diferentes grupos de investigação na Suíça, Estados Unidos e Alemanha (a que pertencem os autores de um artigo na *Physics World*, J. Endes, R. Hughes e C. Zimmerman) a iniciar investigações de enorme delicadeza com objectivos bem definidos — testar alguns dos princípios mais fundamentais da Física.

O princípio da equivalência (PE) é uma das pedras basilares da teoria da relatividade geral (TRG). Ele postula, muito simplesmente, a identidade da massa inerte (a que aparece na 2.^a lei de Newton, $F=ma$) com a massa gravítica (a que aparece na lei de atracção gravitacional, $F= GmM/r^2$). É por esta razão que corpos de massa diferente caem com a mesma aceleração, como têm mostrado experiências sucessivamente realizadas desde o tempo de Galileu. Se recordarmos que a TRG está na base da moderna cosmologia, facilmente percebemos a importância que teria a descoberta de uma violação do PE. Contudo, a igualdade já foi testada com uma precisão de 1 parte em 10^{12} .

A invariância CPT (Charge-Parity-Time) apareceu com a equação de Dirac, e faz hoje parte integrante das teorias quânticas de campo, base dos modelos de comportamento das partículas elementares. Ela já foi testada inúmeras vezes, tendo passado um dos mais exigentes exames quando se verificou (com a precisão de 5 partes em 10^{18}) a igualdade das massas (inertes) dos bósons K_0 (= ds) e \bar{K}_0 . A invariância CPT é o produto de 3 operações de simetria — a conjugação de carga (C), que a cada sistema físico associa outro com as cargas (eléctricas) das partículas trocadas (e correspondentes alterações nos números de bárions e de léptons); a paridade (P), que consiste em inverter (relativamente a uma origem arbitrária) os vectores de posição de cada partícula do sistema; e, finalmente, a inversão do tempo (T), que troca o passado com o futuro pondo o «filme a andar para trás», isto é, inverte as velocidades das partículas do sistema. Cada uma destas operações, considerada isoladamente, não é, necessariamente, uma operação de simetria dos sistemas físicos — por exemplo, a violação da paridade foi uma notável previsão de Lee e Yang, confirmada por T. Wu, ao observar a assimetria na distribuição do spin dos electrões emitidos na desintegração do cobalto na presença de um campo magnético. Também, a inversão do tempo não é (infelizmente?) uma operação de simetria real, como, obviamente, se constata na irreversibilidade do comportamento macroscópico («o futuro é para onde cresce a entropia») e, a nível microscópico, na desintegração do K_0 .

Mas serão simultaneamente compatíveis as duas simetrias PE e CPT? A observação cósmica sugere que o universo é feito de matéria e não de antimatéria — por que razão foi quebrada a simetria CPT à escala onde reina o PE? Será que a antimatéria satisfaz ao PE — por exemplo, sabendo que o protão satisfaz o PE, serão idênticas as massas inerte e gravitacional do antiprotão? E se fizéssemos antihidrogénio (H) — ligando um

antiprotão (p) com um positrão (e) — quem nos garante que a constante de Rydberg (conhecida com uma precisão de 1 parte em 10^{11}) seja a mesma? Se, por exemplo, só o positrão violar o PE, então a sua massa gravítica e, portanto a massa do antihidrogénio variará com a posição da Terra em relação ao Sol, devendo observar-se, uma flutuação sazonal da frequência da risca emitida na transição (dupla) $1S \rightarrow 2S$, fenómeno que não se verifica no hidrogénio.

Se tivéssemos antihidrogénio muitas outras experiências poderiam ser feitas gerando resposta conclusivas sobre a universalidade ou compatibilidade de princípios fundamentais. Mas fazê-lo não é fácil — é preciso criar protões e em grandes quantidades, arrefecê-los das energias dos MeV para eV, ou inferiores, fazê-los reagir com eficiência, de modo a criar átomos em estados não muito excitados e sempre com o cuidado de não deixar que estas antipartículas toquem nas paredes do recipiente, para evitar a aniquilação instantânea. Só depois poderemos fazer espectroscopia de alta precisão e verificar se as massas (e outras propriedades) das antipartículas podem ser obtidas das massas das correspondentes partículas por CPT e se, para uma e outra família, as massas inertes e gravitacionais são iguais, como requer o PE.

Mas se não é fácil produzir hidrogénio, tal não parece impossível. As técnicas necessárias atingem extremos muito elevados, colocando desafios inimagináveis aos investigadores, como nos dá conta o excelente artigo, em apreço que nos relata também vários dos problemas técnicos a resolver e apresenta algumas das experiências previstas. Do que ninguém parece duvidar, porém, é que desta procura, tão ideal quanto desinteressada, de testes para os grandes princípios da Física sairá fortalecida a ciência, mais poderosa a técnica e mais ricos os países envolvidos.

Physics World, p. 44, Julho 1993

E. L.

Números aleatórios... Que não o são

Já alguém, por anedota, disse que um livro com uma listagem de números aleatórios apresenta uma propriedade importante: não necessita de errata, porque está sempre certo! Basta, para isso, que qualquer erro tipográfico tenha sido feito ao acaso...

Existem livros desses. No entanto, são inúteis hoje em dia, com o advento de máquinas de calcular e computadores rápidos, baratos e que fornecem milhões de números aleatórios. Estes números são necessários nos

cálculos de Monte Carlo, algoritmos que resolvem certos problemas por meio da manipulação repetida de números ao acaso. A simplicidade e o poder de tais métodos é bem ilustrada pelo problema da determinação da área de um lago situado no interior de uma quinta com um grande muro à volta: basta tirar pedras ao acaso para dentro da quinta, contar o número de pedras que caem na água (fazem «splash»!) e dividir o número obtido pelo número total de pedras arremessadas. Tem-se assim rapidamente a fracção total da quinta que está ocupada pelo lago. Quanto mais pedras forem lançadas melhor será, em princípio, a determinação da área. O factor decisivo é que as pedras sejam lançadas ao acaso e não apenas só para um canto.

Os geradores de números aleatórios utilizados nos computadores são em geral obtidos por algoritmo chamados «geradores congruenciais lineares»

$$x_{n+1} = ax_n + b \pmod{m},$$

com a , b e m constantes convenientemente escolhidas. De facto, os números assim obtidos não são totalmente aleatórios, pois a sua sequência é afinal determinista (obtida por uma regra bem definida) e mostra um período, ainda que grande. Quanto maior o período, tanto melhor. É preferível chamar-lhes números pseudo-aleatórios. Na década de 60, foi mesmo descoberto que, se se representarem os pares $(x(n), x(n+1))$ num plano, aparece um padrão de linhas verticais. Existe uma certa ordem escondida, e foram propostos algoritmos modificados que evitavam o referido defeito.

Em artigo recente, o norte-americano Alan Ferrenberg e colaboradores (*Physical Review Letters* 69 (1992) 3382), num tratamento de Monte Carlo de uma rede magnética cujas propriedades termodinâmicas são conhecidas exactamente, verificou-se que os algoritmos supostamente melhores forneciam uma resposta errada, ao passo que os antigos algoritmos «congruenciais» davam a resposta correcta. Embora não se saiba bem porque é que os melhores números pseudo-aleatórios não são afinal melhores, a conclusão só pode ser que todos os cuidados são poucos com a aleatoriedade dos números usados repetidamente em métodos de Monte Carlo.

A «Bíblia» dos métodos numéricos utilizada pelos físicos modernos intitula-se «Numerical Recipes», sendo seus autores Press, Teukolsky, Vetterling e Flannery. Saiu há pouco a segunda edição (Cambridge University Press, 1992), que é cerca de 50% maior do que a anterior e que incorpora o conteúdo de toda uma série de artigos publicados na coluna «Numerical Recipes» da revista «Computers in Physics» da Sociedade Americana da

Física. O capítulo sobre números aleatórios foi bastante melhorado (os autores declaram mesmo no número da «Computers in Physics» de Sep. / Oct. de 1992, p. 522, que se envergonham do escrito anterior sobre esse tópico). Com a descoberta de Farrenberg, qualquer dia têm de fazer uma terceira edição!

Europhysics News

C. F.

Medidas precisas do tempo

Qualquer relógio baseia-se, evidentemente na regularidade de um qualquer fenómeno periódico. Mas um bom relógio tem que satisfazer três importantes critérios relativos à frequência utilizada:

- *Estabilidade* — A frequência deve permanecer constante ao longo de um dado intervalo de tempo;
- *Reproductibilidade* — Relógios identicamente constituídos devem reproduzir os mesmos resultados;
- *Precisão* — Um segundo (por exemplo) do relógio deve reproduzir um segundo padrão.

A precisão pode ser medida por um factor de qualidade Q tal como habitualmente se faz para circuitos eléctricos ressonantes: a ressonância apresenta uma frequência característica (ν) e uma largura ($\Delta\nu$) ou erro, determinando a «agudeza» da curva de ressonância. Nestas condições, $Q = \nu/\Delta\nu$ e, em geral, este factor cresce (não linearmente) com a frequência.

A história dos métodos de medição do tempo nos últimos 500 anos espelha as crescentes necessidades da tecnologia em relógios cada vez mais exigentes relativamente às propriedades referidas. Que progresso, dos relógios de pêndulo (de Galileu e Huyghens) e de corda aos relógios de «quartzo» e «atómicos»! Por exemplo, o ubíquo «quartzo» baseia-se na frequência de vibração de um pequeno cristal de quartzo, cortado, muitas vezes, com a forma de um diapasão ($\nu = 32768$ Hz) — o quartzo é piezoeléctrico (as vibrações mecânicas produzem campos eléctricos e vice-versa) de modo que um circuito eléctrico ressonante, para a mesma frequência, fica «escravizado» pelas vibrações do cristal, garantindo-lhe estabilidade (erro menor que 0,1 ms por dia) e precisão ($Q = 10^5$).

Os melhores relógios são, porém, os «atómicos». O fenómeno periódico corresponde à transição entre dois níveis atómicos separados pela interacção entre os momentos magnéticos electrónico e nuclear). À transição está associada a emissão ou absorção de um fóton, com

frequência na zona das micro-ondas (10^9 Hz), sugerindo um alto factor de qualidade. E, de facto, o «erro» Δv nesta frequência, embora com várias origens (efeito Doppler, colisões atómicas, radiação térmica) podem, mais ou menos, ser controlados, obtendo-se $Q > 10^8$. A técnica (ressonância de feixe atómico) foi inventada por I. Rabi, na década de 30 — essencialmente, um feixe atómico (de césio, por exemplo) atravessa um campo magnético que filtra os átomos no nível de energia desejado. Em seguida, o feixe é submetido a radiação de micro-ondas ($\nu = 9192$ MHz, para o Cs^{133}) e os átomos excitados são filtrados por um segundo campo magnético, indo depositar-se num alvo apropriado. Flutuações neste depósito reflectem flutuações na frequência das micro-ondas, o que permite utilizar um servo-mecanismo para estabilizar no valor correspondente ao maior depósito. A técnica foi aperfeiçoada por N. F. Ramsey (em 1949), que introduziu um segundo feixe de micro-ondas, obtendo drástica redução no erro Δv . Os relógios baseados nestes princípios são tão precisos ($Q = 10^8$) e tão reprodutivos (1 parte em 10^{14}) que, em 1967, foi decidido redefinir o segundo como o intervalo correspondente a 9192631770 vibrações atómicas do ^{133}Cs (a frequência de ressonância) e, mais recentemente, o metro passou a ser a distância percorrida pela luz (no vazio) em $1/299792458$ s — isto é, a velocidade da luz é *exatamente* $c = 299792458$ m/s. Aperfeiçoamentos posteriores da técnica substituíram as filtragens magnética por filtragens óptica, sendo este método utilizado na actual definição da frequência padrão nos EUA (corresponde à precisão de 1 s em 1 milhão de anos).

Uma técnica alternativa foi desenvolvida por Ramsey (em 1960), com a invenção do «maser» de hidrogénio atómico. Aqui, este elemento é produzido no primeiro estado excitado (hiperfino, separado do fundamental por $\nu = 1420$ MHz, a célebre risca de 21 cm), sendo, depois, medido num reservatório inserido numa cavidade ressonante. A transição de alguns átomos para o estado fundamental liberta fótons que estimulam novas transições, criando-se, portanto, uma radiação de micro-ondas «sintonizada» com a cavidade ($Q = 10^9$ e estabilidade de 1 parte em 10^{15} , que contudo, piora em alguns dias). Mais recentemente, passaram-se a usar «ratoeiras» (traps) para prender os iões ou átomos, conseguindo-se $Q = 10^{12}$ e reproductibilidades de 1 em 10^{12} . As mais utilizadas são «traps» de Penning, que combinam campos electrostáticos não uniformes com fortes campos magnéticos (e, por isso, são modificadas as frequências de ressonância) ou as «traps» de Paul, que usam, apenas, campos eléctricos oscilantes (e que, por isso, aquecem os átomos e elevam o «erro» Doppler). Os inconvenientes destas ratoeiras são evitados com as

técnicas de esfriamento por laser, desenvolvidas por H. G. Dehmelt (em 1975), obtendo-se reproductibilidades de 1 em 10^{15} . Seis feixes laser são feitos convergir, simetricamente, num ponto, aí se originando a acumulação dos átomos, desejados praticamente com velocidades nulas — esta imobilidade é conseguida escolhendo a frequência laser ligeiramente abaixo da frequência de absorção atómica, de modo que qualquer movimento produz, por desvio Doppler, a absorção do fóton e, conseqüentemente, travagem da velocidade do átomo. Mas as fortes intensidades dos lasers deslocam a frequência de ressonância atómica, o que pode ser corrigido dando um pequeno «piparote» óptico aos átomos, que os faz subir e descer no campo gravítico, deslocando-os para fora dos feixes e para dentro da cavidade ressonante onde se processa a excitação por micro-ondas.

Perguntará o leitor: para quê tanta precisão na medida do tempo? Os «quartzos» já nos servem tão bem! Mas há situações onde precisões extremas têm de ser exigidas. Alguns exemplos:

- Há pulsares que rodam com uma regularidade superior à de qualquer relógio atómico produzido; talvez uma melhor medição do tempo possa revelar algumas irregularidades do pulsar, levando-nos a suspeitar de novos fenómenos, tal como no passado, a melhor definição do segundo levou à descoberta de oscilações na rotação da Terra;

- A teoria da relatividade geral prevê que um relógio à altitude do Everest fique, ao fim de um ano, adiantado $30 \mu\text{s}$ em relação a idêntico relógio colocado ao nível do mar;

- A interferometria de larga escala permite simular um telescópio com milhares de quilómetros de abertura, através da sincronização de radiotelescópios separados por tais distâncias (ver o artigo «Moonball», de C. S. Powell, nesta mesma revista, p. 15-17);

- A localização de sondas espaciais é feita por triangulação, mas em que um vértice (a sonda) se encontra a horas-luz de distância, enquanto os outros vértice (telescópios de radar) se situam na Terra;

- A navegação (aérea, marítima ou, mesmo, de automóvel) aproveita relógios atómicos instalados em satélites para localizar o receptor a menos de 10 m.

Não é, assim, de admirar que o Prémio Nobel de 1989 tenha sido repartido por Paul, Dahmet e Ramsey, sendo este último o autor (juntamente com o seu ex-aluno W. Itano) de um excelente artigo de grande interesse e actualidade, na *Scientific American*.

Scientific American, Julho 1993 pp. 46-53

E. L.

Formação de assistentes para o ensino da Física a outros cursos

Um interessante artigo sobre este assunto foi publicado no «Journal of College Science Teaching» de Novembro de 1992. Esta revista preocupa-se com aspectos científicos e pedagógicos do ensino superior, e inclui, frequentemente, artigos da maior relevância para este nível de ensino.

As dificuldades encontradas, na aprendizagem de Física, por alunos de outros cursos, podem ser minoradas se os assistentes que têm a seu cargo as aulas práticas (laboratório) e teórico-práticas (resolução de problemas, com «papel e lápis»), frequentarem um seminário de formação, especificamente planeado para esse fim. A avaliação dos efeitos do seminário mostra que o mesmo desenvolve nos participantes uma maior confiança nas suas capacidades de ensino, maior eficácia na estruturação e gestão das actividades de resolução de problemas em grupo, e uma consciencialização da relevância da sua contribuição para a formação dos alunos. Por seu lado, os alunos desenvolvem atitudes mais positivas em relação às aulas práticas e teórico-práticas, capacidades de trabalho em grupo e de resolução de problemas, e uma melhor compreensão dos conceitos de Física.

O seminário de formação de assistentes constitui parte integrante de um projecto mais global visando a melhoria de um curso básico universitário de Física, destinado a alunos de outros cursos, nomeadamente farmácia, arquitectura, pescas e ambiente natural. O curso de Física engloba duas disciplinas semestrais, estruturadas sem o recurso ao cálculo diferencial e integral, e prevê um total de sete horas semanais — quatro teóricas, uma de resolução de problemas e duas de laboratório. O número de alunos é de cerca de 120, distribuídos por turmas práticas e teórico-práticas de 15 a 20 alunos cada. Os objectivos do curso, elaborados com base nos dados de um questionário aos departamentos que fornecem os alunos, são os seguintes:

- Levar os alunos à aprendizagem dos conceitos e princípios fundamentais de Física;
- Desenvolver nos alunos capacidades de de problemas, quer qualitativa quer quantitativa, e de aplicação a novas situações;
- Levar os alunos a ultrapassarem a fase de concepções intuitivas («misconceptions») no que respeita ao comportamento do mundo físico.

Por outro lado, os objectivos do seminário de formação de assistentes eram os seguintes:

- Desenvolver nos assistentes a compreensão dos objectivos e estrutura do curso de Física;
- Desenvolver nos assistentes a compreensão e apreciação das estratégias de resolução de problemas (quer de «papel e lápis», quer de laboratório) e de aprendizagem cooperativa em grupo;
- Desenvolver capacidades de concretização de ensino baseado no trabalho em grupo (quer nas aulas práticas, quer nas teórico-práticas) e na resolução de problemas.

O seminário incluiu 30 horas de formação — em sessões de 1,5 horas cada, duas vezes por semana, distribuídas ao longo do primeiro semestre lectivo. Versou os tópicos: objectivos e filosofia do curso de Física; resolução de problemas; avaliação dos alunos na resolução de problemas; concepções alternativas em Física e metodologia construtivista no ensino desta disciplina; aprendizagem cooperativa; planeamento de aulas; técnicas de fazer perguntas. As estratégias utilizadas no seminário de formação de assistentes incluíam: leituras, discussão, realização de actividades paralelas às que são pedidas aos alunos do curso de Física, e modelação, dos formadores com os participantes, da aprendizagem cooperativa e de técnicas de fazer perguntas. Depois de terminarem a frequência do seminário, os assistentes continuaram a ter apoio pedagógico: reuniões regulares com o professor do curso de Física, e supervisão por parte dos formadores responsáveis pelo seminário — o professor do curso de Física e um professor de educação científica.

A formação pedagógica dos docentes do ensino superior é uma preocupação não só nacional mas também internacional. O artigo de F. Lawrenz, P. Heller *et al* descreve uma resposta possível a tal preocupação.

Journal of College Teaching, Vol. XXII, n.º 2, Nov. 1992
J. F.

ERRATA

A Terra, o Cosmos e a Entropia

Gazeta de Física 16, pp. 16-18 (1993)

Varição de entropia na Terra = - (fluxo total de entropia entre a Terra e o Cosmos) + (produção de entropia na Terra).

Só assim está de acordo com as considerações que aparecem no texto, sobre o significado do 2.º e 3.º termos da equação 1. O erro ocorrido (troca na ordem dos 2.º e 3.º termos da equação 1) não aparecia no manuscrito enviado pelo autor, a quem apresentamos as nossas desculpas.

Physics of Climate

JOSÉ FINTO PEIXOTO E ABRAHAM H. OORT

American Institute of Physics

New York, 1992

O clima é hoje em dia um tema que suscita a atenção de grandes sectores da opinião pública mundial. Há um pressentimento, cada vez mais generalizado, de que o clima irá mudar e de que a humanidade pode contribuir para uma mudança, ainda que involuntariamente. Proliferam os estudos, debates e conferências sobre alterações climáticas, mas as incertezas não diminuem num contexto em que os interesses económicos e políticos tendem a fortalecer-se. Estaremos nas vésperas de um aquecimento global provocado pelo aumento artificial dos gases causadores do efeito de estufa origem é pleonasma! Será possível prever as futuras alterações climáticas?

Physics of Climate surge, pois, no momento certo. A sua mensagem mais importante é defender a necessidade de recorrer sistematicamente aos princípios fundamentais da física para efectuar previsões fiáveis sobre o comportamento do sistema climático ter-

restre. Para compreender a atmosfera é necessário considerar o sistema climático global que envolve os oceanos, a criosfera e as outras superfícies terrestres. A climatologia é uma ciência baseada na observação. **Physics of Climate** pretende determinar como funciona o sistema climático com base nas leis fundamentais de física e no vastíssimo conjunto de dados climáticos já acumulados.

Os capítulos iniciais destinam-se a introduzir a teoria do clima através das leis físicas fundamentais que governam o sistema climático. Há uma ênfase especial no estudo da circulação geral da atmosfera embora vários capítulos discutam os oceanos, a criosfera, a terra sólida, a biosfera e as respectivas interações.

Nos dois últimos capítulos os autores consideram o problema da variabilidade climática e a simulação matemática do clima. Embora estes temas não constituam o objectivo prioritário do livro, fica-se com a

sensação de que os autores poderiam ter desenvolvido mais a sua análise. Contudo, são domínios mais polémicos onde é necessário ponderar e justificar profundamente as proposições. Seria extremamente importante que estes dois notáveis cientistas pudessem dar-nos a sua opinião que, necessariamente, depende dos projectos de investigação em que estão envolvidos.

Physics of Climate é um livro de leitura fácil e atraente que será muito útil para uma vasta audiência de estudantes e cientistas, para além dos que se dedicam especificamente à Meteorologia e à Climatologia. Será, certamente, uma obra de referência e uma base sólida para futuros novos avanços da teoria do clima. Embora cautelosamente, permite-nos esperar uma compreensão do modo como funciona o clima da Terra, facultando-nos assim a possibilidade de prever a sua evolução.

FILIPE DUARTE SANTOS

História dos Balões

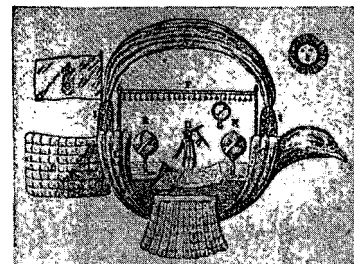
RÓMULO DE CARVALHO

Relógio de Água

Lisboa, 1993

Pertencem a uma geração de gente que era nova (quer dizer, mais nova) quando a colecção «Ciência para Gente Nova» da falecida editora Atlântida de Coimbra, era praticamente a única colecção portuguesa de divulgação de ciência. Aqueles livros, pequenos mas extremamente motivadores, valiam

bem mais do que os manuais de física e química dos liceus (o livro do Dr. Teixeira, lembram-se?), que nos cansávamos de tentar decifrar. Naqueles livrinhos para gente nova percebíamos tudo. O autor, como era bem manifesto, esforçava-se para que não só percebêssemos como gostássemos de ter percebido. A ciência não parecia acabada, em proposições rígidas, mas sim vestida num contexto histórico, de descoberta, de tentativa e erro. Hoje em dia, a casa onde era a livraria Atlântida na baixa coimbrã passou a ser a BENETTON e o papel da editora de divulgação científica foi tomada pela



A Passarola conforme foi impressa pela primeira vez em Portugal, com a data de 1774.

Gradiva, em Lisboa. A escola antiga, com os laboratórios repletos de balanças, já tem uns sensores e computadores. Está tudo mais moderno. Até nós deixámos de ser a gente nova que éramos. Mas aqueles livrinhos, pese embora a poeira dos anos, mantêm-se modernos, vivos como estão na nossa memória.

Foi Rómulo de Carvalho não só o autor como o responsável pela longevidade dessas publicações para gente nova. O seu estilo, a sua sensibilidade, a sua alegria de saber sobrevivem às perturbações do tempo. Leia-se a entrevista dele que a *Gazeta da Física* publicou em Abril de 1993 e pergunte-se quantos de nós, leitores dele, temos aquela frescura que é a mãe de toda a criatividade. Pois, para grande regozijo nosso e proveito da gente nova, uma pequena editora, a *Relógio de Água*, começou a reeditar a «Ciência para a gente nova». Apareceu já a «História dos Balões», que convém aqui e muito justamente publicitar. O autor, num prefácio pequeno mas justificativo, explica que a ideia da reedição daquele texto datado não é dele mas do editor. Ora, caro doutor Rómulo de Carvalho, datado é tudo o que acontece e deixa marcas e só não têm data aquelas coisas que não acontecem ou, esquecidas, não deixam marca. Queremos dizer-lhe que não só comprámos (na altura, pedimos emprestado o exemplar da biblioteca do liceu) como voltámos nesta data a ler. Aquilo tem a data de hoje.

A «História dos Balões» contém um relato resumido da «Passarola» do luso-brasileiro Padre Bartolomeu de Gusmão. Esse acontecimento de há trezentos anos faz parte, pela sua importância, dos almanaques mais actuais. Só para dar um exemplo, na edição de 1993 do livro *Guinness dos Recordes* lá vem: o primeiro voo de balão de ar quente, ainda que não tripulado e mal concluído, foi português. Realizou-se na Casa das Índias, no Terreiro do Paço, em

Lisboa, no dia 5 de Agosto do ano da graça de 1709. Tal facto pode-nos orgulhar bem mais do que a proeza de um tal bombeiro Vieira que aqui há anos bateu um recorde qualquer de andar de bicicleta. Rómulo de Carvalho explica como é que o acontecimento da Passarola foi visto na Áustria: a rainha portuguesa da época, a esposa de D. João V, era austríaca tendo uma princesa austríaca imaginado logo a rainha a visitar os Alpes de balão. Rómulo de Carvalho conta-nos, com humor evidente, como é que um diplomata português ridicularizou logo o invento: havia o perigo de os mouros, de posse de balões, invadirem facilmente o Algarve. Uma estampa sugere que o Padre Gusmão julgava, ingenuamente, que o balão subiria melhor se tivesse magnetes para atrair um fundo metálico... Não é delicioso? Gusmão, que foi doutor da Universidade de Coimbra (pouca gente sabe isso, assim como pouca gente sabe que o único Prémio Nobel português, Egas Moniz, foi doutor pela mesma universidade), não conseguiu muito mais e melhor do que aquela proeza pioneira de mostrar que algo mais pesado do que o ar podia subir no ar. Morreu relativamente novo em Toledo, onde está sepultado. Eu não saberia isto se não tivesse lido a «História dos Balões» em novo e relido agora.

Depois lá vem a odisseia dos irmãos Montgolfier e o resto da história dos balões. As ilustrações fazem lembrar os livros de Júlio Verne, que tinham a chancela da Bertrand, de entre os quais um se intitula precisamente «Cinco semanas em balão». Os intérpretes principais têm direito ao nome em maiúsculas para nós lhes fixarmos facilmente os nomes. O princípio dos balões, baseado em Arquimedes, está lá bem explicado, com números e tudo. Trata-se, portanto, de um livro curioso com pormenores sobre a história dos balões e balonistas para quem tenha a chama da curiosidade bem acesa.

Há, porém, outra coisa de que discordamos no prefácio do autor. Então, caro doutor Rómulo de Carvalho, a história dos balões já teve um fim?

Que o autor não quisesse ou pudesse actualizar essa história, está no seu pleno direito mas as proezas recentes de travessia do Pacífico, do Japão à Califórnia, num balão de ar quente, em tempo recorde, o que fazem é continuar essa história. Isto para não já falar dos instrumentos meteorológicos que são colocados a grande altitude a bordo de balões, ou do balão astronáutico que está planeado para explorar o planeta Marte. De resto, só agora é que a técnica de viajar em balão se está a transformar num desporto acessível ao comum dos cidadãos, embora reconheça-se ainda perigoso (qualquer dia no «Portugal radical» o balonismo já terá direito ao mesmo espaço da asa-delta e do surf). Para os mais novos, a *Gradiva* já lançou uma «Ciência com Balões», que ensina mil e um truques com balões de soprar. Os balões são moderníssimos.

Estamos todos à espera da «História da electricidade estática», com espantosas histórias anedóticas sobre pássaros electrocutados (e não se diga que a electricidade estática passou à história, pois ela está presente nas nossas modernas fotocopiadoras) e da «História dos Isótopos», com o relato interessantíssimo da descoberta do nucleão por via teórica (os isótopos, como é sobejamente conhecido, servem hoje para datar quadros e tratar doentes). A «História dos Isótopos», tem capa de um poeta português que Rómulo de Carvalho bem conhece — António Gedeão. Em Rómulo de Carvalho, a ciência não está desligada da poesia!

Rómulo de Carvalho, «História dos Balões», *Relógio de Água*, Lisboa, 1991.

CARLOS FOLHAIS

ETAPAS REGIONAIS 1993**Delegação Regional do Sul e Ilhas****Prova para o 9.º ano****1.ª Parte (60 min.)**

Verifica se sobre a mesa de trabalho se encontra o seguinte material:

- Um copo de plástico com água;
- Uma garrafa de plástico com tampa cheia de água;
- Uma tampa de esferográfica;
- Um bocado de plasticina.

1 — Vais começar por construir um flutuador. Espeta um pedaço de plasticina na haste da tampa da esferográfica. Em seguida, com a bola de plasticina para baixo, mergulha-a na água do copo. Ajusta a quantidade de plasticina de modo a que o conjunto flutue. Desenha em esquema a situação criada;

2 — Procura explicar o fenómeno da flutuação da tampa;

3 — Muda agora a posição da plasticina para a outra extremidade da tampa. Descreve o que acontece quando a mergulhas na água, procurando interpretar a observação efectuada;

4 — Em seguida coloca o teu flutuador na garrafa com água, e fecha-a completamente com a tampa. Com as mãos aperta a garrafa suave mas progressivamente com mais força. Descreve o que observas com o flutuador;

5 — Procura agora interpretar a observação efectuada.

2.ª Parte (60 min.)

Verifica se sobre a mesa de trabalho se encontra o seguinte material:

- Uma barra de madeira;
- Dois *punaises*;
- Um fio;
- Dois balões iguais;
- Uma régua;

1 — Vais começar por construir uma balança. Espeta os *punaises* a meio da barra de madeira, um de cada lado, de modo a que possas dependurá-la com a mão pelo fio. Se tiveres cuidado com a operação, a barra deverá ficar na horizontal. Faz um esquema da situação e procura explicar porque é que tal acontece;

2 — Em seguida dependura os balões, um em cada extremo da barra. A barra deverá continuar a ficar na horizontal. Faz novamente um esquema da situação e procura explicar porque é que tal acontece;

3 — Por fim retira um dos balões, e enche-o de ar. Volta novamente a prendê-lo à barra. Descreve o que observas quanto à posição da barra ao ser dependurado pelo fio;

4 — Procura agora interpretar a observação feita.

Prova para o 11.º ano**1.ª Parte (90 min.)**

Verifica se sobre a mesa de trabalho se encontra o seguinte material:

- Massa pendular (1);
- Suporte (1);
- Cronómetro (1);
- Régua (1);
- Transferidor (1);
- Papel milimétrico.

1 — Planeiem várias situações experimentais que permitam identificar de que forma o comprimento do pêndulo e a amplitude do movimento afectam o período de oscilação;

2 — Descrevam cuidadosamente as situações experimentais que planearam e enumerem as precauções a serem tomadas em cada caso;

3 — Realizem experiências relativas às situações planeadas por vós;

4 — Construam tabelas onde registem os valores obtidos para cada um dos factores estudados;

5 — Elaborem gráficos a partir dos valores que registaram nas tabelas;

6 — A partir da análise dos gráficos elaborados tentem estabelecer uma relação que traduza a forma como o período de oscilação varia com os factores estudados;

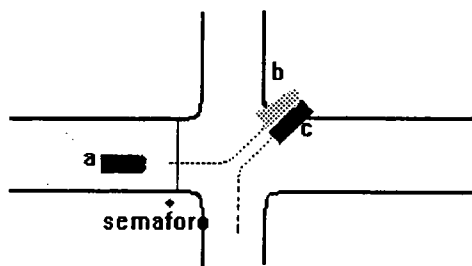
7 — Determinem, experimentalmente, o período de oscilação de um pêndulo de 35 cm de comprimento. Comparem este valor com o obtido a partir da relação estabelecida na alínea anterior. Comentem os resultados;

8 — Um determinado relógio de pêndulo atrasa sistematicamente. O que fariam para o acertar?

2.ª Parte (60 min.)

As situações que a seguir se relatam correspondem a factos imaginários que podem fazer parte do nosso quotidiano:

I. Num determinado cruzamento verificou-se um acidente que envolveu três veículos automóveis idênticos. A ocorrência deu-se ao princípio da manhã. Constatou-se que durante a noite havia geado. O *croquis* constante do relatório da polícia encontra-se a seguir reproduzido.



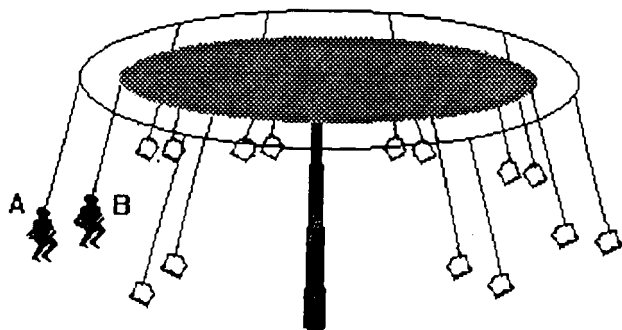
O veículo *a* embateu no veículo *b*, que se encontrava parado junto ao semáforo, tendo este por sua vez embatido no veículo *c* que se deslocava através do cruzamento naquela ocasião. As posições assinaladas referem-se aos locais onde os veículos ficaram após as duas colisões sucessivas.

1 — Em termos comparativos, que afirmação se pode fazer sobre as velocidades dos diversos veículos no momento das colisões? Expliquem quais as bases físicas que conduziram à resposta formulada;

2 — Que importância tem, para a compreensão do acidente, o conhecimento de ter geado na noite que o antecedeu?

3 — Seria possível obter valores numéricos concretos para as velocidades, e não efectuar apenas comparações qualitativas?

II. Num *luna-park* ocorreu um acidente com um passageiro de um carrocel de cadeiras suspensas. O esquema do carrocel encontra-se a seguir indicado. A ocorrência traduziu-se no facto do passageiro da cadeira *A* afirmar que havia sido tocado pela cadeira *B*. Afirma-se peremptoriamente que tal facto se devia à irresponsabilidade da direcção do *luna-park*, por ter permitido que o passageiro da cadeira *B* tivesse um peso muito superior ao seu. Face à reclamação apresentada pelo cliente, a direcção do *luna-park* pediu um parecer técnico a um físico sobre esta matéria. Coloca-te na posição desse técnico, e elabora o teu parecer sobre a matéria em questão.



- FÍSICA 94 -

9.ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE FÍSICA

Universidade da Beira Interior, Covilhã

- 19 a 23 de Setembro de 1994 -

• A organização desta 9.ª Conferência Nacional de Física estará a cargo da Delegação Regional do Centro, da Sociedade Portuguesa de Física.

• Espera-se que a 1.ª circular seja distribuída no período Outubro/ Novembro 1993.

Informações preliminares:

M. MARGARIDA R. COSTA

Departamento de Física
da Universidade de Coimbra

3000 COIMBRA

Telefone: 039-23671 • Fax: 39-29158

DIVISÃO TÉCNICA DE FÍSICA DOS PLASMAS (DTFP)

Organizou nos dias 5 e 6 de Julho em colaboração com o Centro de Fusão Nuclear (CFN) do Instituto Superior Técnico, uma Acção de Formação em Física dos Plasmas, que foi frequentada por cerca de 40 professores do ensino secundário.

O Centro de Fusão Nuclear, em colaboração com a DTFP, vai organizar um concurso nacional de trabalhos sobre a fusão nuclear controlada, destinado a alunos e professores dos ensinos secundário e superior.

Os interessados poderão solicitar o regulamento deste concurso directamente para:

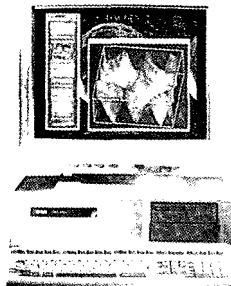
Centro de Fusão Nuclear
Instituto Superior Técnico (Telefone 01-841 76 96)



i imagine a estação gráfica
mais rápida do mundo.
Pode ser sua hoje!

Mike Hewitt / Action-Plus Photographic

QUANDO O PROBLEMA É A
RELAÇÃO PREÇO/DESEMPENHO, E É
PRECISO OPTAR POR UMA ESTAÇÃO
GRÁFICA UNIX, DESCOBRE-SE QUE A
NOVA E EXTRAORDINÁRIA GAMA
DE ESTAÇÕES ALPHA AXP ESTÁ
UMA GERAÇÃO À FRENTE DA
CONCORRÊNCIA.



Agora, a potência e a rapidez
dos Alpha AXP aceleram a execução
de aplicações tão exigentes como
CAD/CAM, engenharia, modelos financeiros,

desenvolvimento de software, análise e
simulações. Os Alpha AXP não apenas
oferecem a maior gama de estações gráficas
disponível, mas também lhe proporcionam

liberdade de escolha, total
capacidade de upgrade, uma
integração mais fácil e um
desempenho surpreendente
(400 MIPS, 161 SPECmark). Toda a
potência necessária para manter a liderança
do seu negócio!

Contacte-nos pelo telefone 0 500 1 500

digital

imaginação a trabalhar

NO PRÓXIMO NÚMERO

G A Z E T A D E
FÍSICA

RADIAÇÃO DE SINCROTRÃO

MAGNETISMO NA PROSPECÇÃO ARQUEOLÓGICA

CONCEITO FÍSICO DE MASSA