

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 bariões e de leptões); 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 1015. 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 vértices (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.