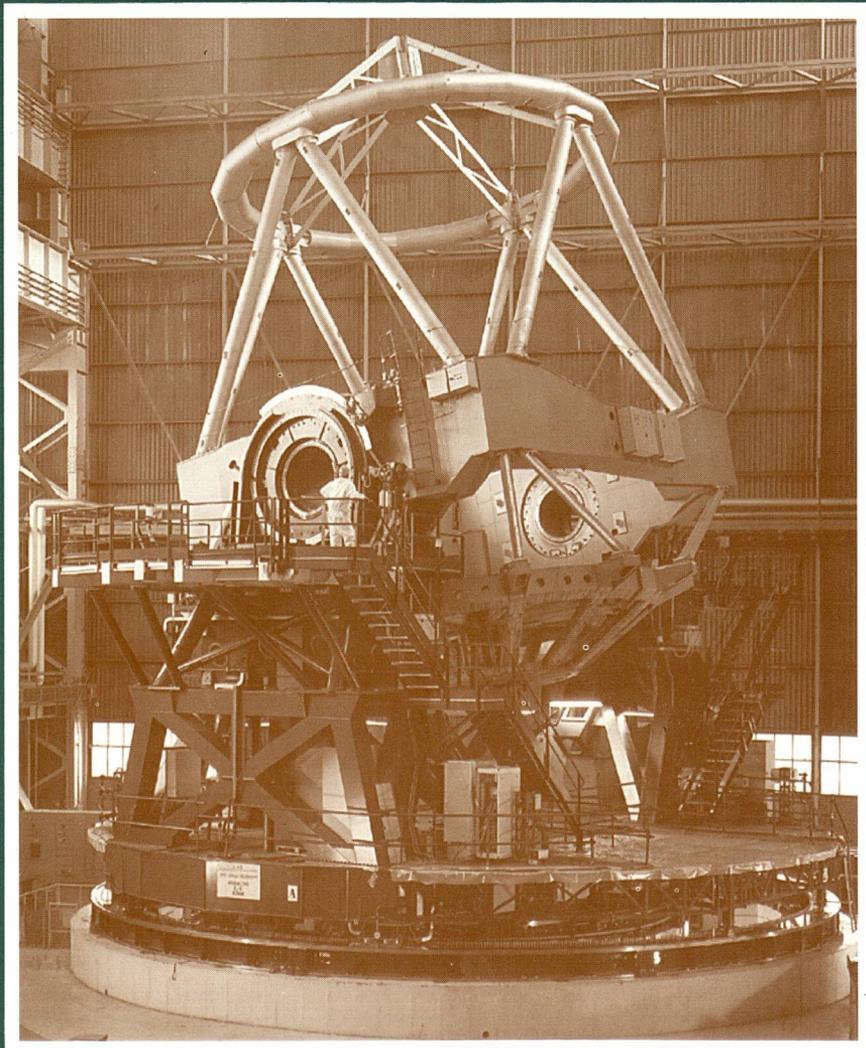


G A Z E T A D E

FÍSICA



SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

VOL. 21 • FASC. 2 • 1998 • PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL • ABRIL / JUNHO

Gazeta de Física

Propriedade da Sociedade Portuguesa de Física

ISSN: 0367-3561

Registo na DGCS n.º 107280 de 13/5/80

Depósito Legal n.º 51419/91

Publicação Trimestral

N.º 2 — 1998

Redacção e Administração

Avenida da República, 37-4.º — 1050 Lisboa

Telefone (01) 7993665

Fax (01) 7952349

Director

João Bessa Sousa (FCUP)

Comissão de Redacção e Administração

Carlos Matos Ferreira (IST)

Margarida Telo da Gama (FCUL)

Ana Maria Eiró (FCUL)

Adriano Sampaio e Sousa (ESFPM)

Preparação e Revisão de Texto

Florbelá Martins Teixeira

Execução Gráfica

Imprensa Portuguesa

Rua Formosa, 108-116 — 4000 Porto

Telefone (02) 2002466

Fax (02) 2015105

Tiragem: 1500 exemplares

Preço avulso: 650\$00

Assinatura anual (quatro números):

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

35 US dólares (estrangeiro)

Publicação subsidiada 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 3500 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 apresentados em folhas separadas, prontos para reprodução. Endereço para correspondência: **Gazeta de Física — Sociedade Portuguesa de Física, Av. da República, 37-4.º — 1050 Lisboa.**

Na capa: Estrutura do maior telescópio óptico do mundo (VLT: *Very Large Telescope*), com um espelho com 50 m² de área, desenvolvido pelo European Southern Observatory (ESO) e instalado no cimo da montanha Cerro Paranal, Chile (2632 metros de altitude), no deserto Atacama, uma das regiões mais secas da Terra. As primeiras observações iniciaram-se em 16 de Maio de 1998, com resultados espectaculares em resolução e no grande aumento do poder colector. Este projecto ESO prevê a construção de uma rede de 7 telescópios totalizando uma área de 210 m² de espelhos. Portugal, como membro associado do ESO, tem acesso à utilização deste novo telescópio, através de propostas científicas sujeitas a aprovação. Informações adicionais: ESO WWW Homepage <http://www.eso.org>.

SUMÁRIO

2

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EXCENTRICIDADE
DA ÓRBITA DA TERRA**
Guilherme de Almeida

6

GRAVITAÇÃO, INÉRCIA E O PARADOXO DA FORÇA CENTRÍFUGA
Ismael Tereno e Paulo Crawford

14

**SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO
PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS**
Miguel C. Brito

19

**FRANCISCO DE FARIA E ARAGÃO
E A ELECTRICIDADE NO SÉC. XVIII**
Luís Miguel Bernardo

26

EDUCAÇÃO EM FÍSICA

28

OLIMPIADAS DE FÍSICA

32

NOTICIÁRIO SPF

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA EXCENTRIDADE DA ÓRBITA DA TERRA

GUILHERME DE ALMEIDA

Escola Secundária Marquês de Pombal
Rua Alexandre Sá Pinto, 1300 Lisboa

É sabido dos livros de texto que as órbitas dos planetas são aproximadamente elipses. Assim sendo, a Terra não escapa a este facto. Será possível, com meios muito simples, tanto no aspecto material como do ponto de vista matemático, determinar a excentricidade da órbita do nosso planeta em torno do Sol? É esse o objectivo deste artigo. Pode satisfazer a curiosidade dos alunos e professores que queiram fazer as medições necessárias e comparar os seus resultados com os que se vêem nos livros, ou servir de base a um programa de trabalho numa escola secundária, para alunos que estejam integrados num grupo de Astronomia.

Tal como afirma a 1.^a lei de Kepler (publicada em 1609), as órbitas que os planetas descrevem em torno do Sol são elipses, situando-se o Sol num dos focos. Portanto, a órbita da Terra é também uma elipse. Nas figuras que aparecem em alguns livros, muitas vezes exagera-se incrivelmente a forma da órbita do nosso planeta, havendo representações que mostram esta órbita como uma circunferência (Fig. 1), enquanto outras

uma outra posição (denominada *periélio*), na qual está à distância mínima da nossa estrela (situação que ocorre a 4 de Janeiro de cada ano).

A órbita que a Terra descreve em torno do Sol não é tão alongada como por vezes se pensa.

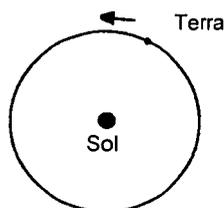


Fig. 1

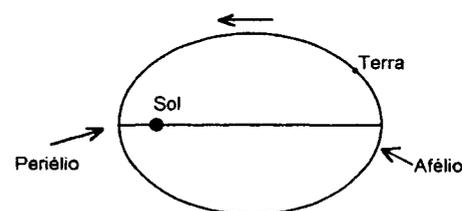


Fig. 2

Pretendemos saber como é, *de facto*, a órbita da Terra. Para isso, como primeira aproximação, começaremos por averiguar no sentido de decidir se ela é mais parecida com a da Fig. 1 ou com a da Fig. 2. No primeiro caso, veríamos o Sol sempre com o mesmo diâmetro aparente (Fig. 3) ao longo de todo o ano; se fosse o caso da Fig. 2 deveríamos ver o Sol *aparentemente* muito menor quando a Terra passa no afélio, e bastante maior no periélio. Esta primeira necessidade de decisão leva-nos a olhar mais atentamente para a nossa estrela.

É sabido que não se deve olhar para o Sol sem protecção visual apropriada.

A variação anual do diâmetro do Sol é um indicador da excentricidade da órbita da Terra.

insistem numa elipse muito excêntrica (Fig. 2).

Dado que a órbita que a Terra descreve em torno do Sol é elíptica (Fig. 2), o nosso planeta, ao descrevê-la, passa por uma posição que é a mais afastada possível do Sol (o *afélio*), que ocorre por volta de 4 de Julho de cada ano, e por

No caso de observações a olho nu, que não sejam muito prolongadas, pode-se utilizar o filtro de protecção utilizado nas soldaduras por arco eléctrico, à venda nas lojas de ferragens a um preço acessível (pode-se adquirir só o filtro de vidro ou dois filtros, um para cada olho, já montados em óculos apropriados, o que permite ter as mãos livres). Como resultado destas observações, ou pela experiência pessoal de cada um de nós, conclui-se que, à primeira impressão, o Sol parece mostrar-nos o mesmo diâmetro aparente durante todo o ano: não notamos alteração significativa. Isto significa que a órbita da Terra deve parecer-se mais com a da Fig. 1 do que com a da Fig. 2.

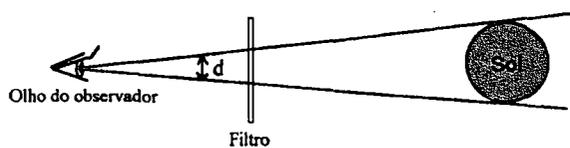


Fig. 3 — O diâmetro aparente do Sol é o ângulo indicado pela letra d . As dimensões aparentes são sempre angulares. Esta noção é aplicável a outras situações (por. ex. o diâmetro aparente da Lua, ou a altura aparente de um prédio visto a uma certa distância do observador).

A Fig. 4 mostra um dado objecto de altura h , observado a duas diferentes distâncias, r_1 e r_2 , às quais é visto segundo as alturas aparentes θ_1 e θ_2 , respectivamente. Desta figura conclui-se que

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{r_1}{r_2}.$$

No entanto, tratando-se de ângulos pequenos, pode-se escrever

$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\theta_1}{\theta_2}, \text{ e logo } \frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{r_2}{r_1}.$$

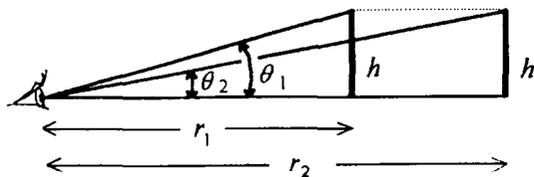


Fig. 4

Como o diâmetro aparente do Sol (Fig. 3) é pequeno, pois mede cerca de $0,5^\circ$ (em média), podemos consequentemente dizer que tal diâmetro aparente é inversamente proporcional à distância a que estamos da nossa estrela. Isto quer dizer que se a distância da Terra ao Sol duplicasse, o diâmetro aparente deste (d) passava para metade, e assim sucessivamente. Se a Fig. 2 cor-

respondesse ao que se passa, o Sol pareceria 5 vezes maior no periélio do que no afélio (compare as distâncias), do mesmo modo que um automóvel visto a 200 m de nós parece cinco vezes maior que a 1000 m. A desigualdade do tamanho aparente do Sol ao longo do ano é, portanto, um indicador da excentricidade da órbita da Terra.

Para facilitar as indicações que daremos seguidamente, representaremos a distância da Terra ao Sol, no periélio, por r_p ("p" de "periélio") e por r_a a correspondente distância no afélio.

A Fig. 5 mostra alguns parâmetros geométricos de uma elipse. Dela se conclui facilmente, que $r_p = a - c$ e $r_a = a + c$.

Como o diâmetro aparente do Sol, visto da Terra, é inversamente proporcional à distância a que dele nos encontramos, podemos escrever

$$\frac{d_p}{d_a} = \frac{r_a}{r_p}, \text{ ou seja, } \frac{d_p}{d_a} = \frac{a + c}{a - c},$$

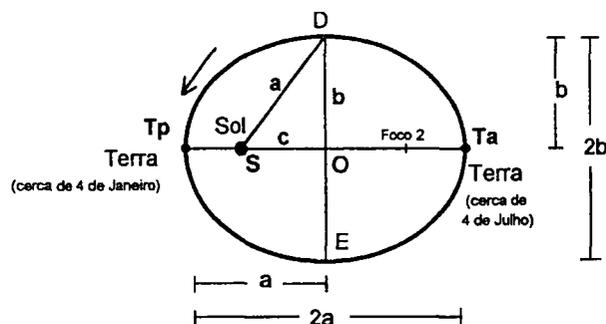


Fig. 5 — As indicações Tp e Ta representam as posições da Terra no periélio e no afélio, respectivamente. A excentricidade desta elipse foi exagerada (relativamente à forma da órbita da Terra), para melhor visibilidade dos seus parâmetros geométricos.

onde d_p representa o diâmetro aparente do Sol no periélio, e d_a o correspondente valor no afélio.

Dá-se o nome de excentricidade de uma elipse ao parâmetro $e = c/a$ (Fig. 5). Porém, como $c = ea$, pode-se também escrever

$$\frac{d_p}{d_a} = \frac{a + ea}{a - ea}, \text{ ou seja, } \frac{d_p}{d_a} = \frac{1 + e}{1 - e},$$

Desta última expressão concluímos que

$$d_p - d_a = e(d_p + d_a), \text{ e consequentemente}$$

$$e = \frac{d_p - d_a}{d_p + d_a}.$$

As medições actuais permitem concluir que o diâmetro aparente do Sol varia, ao longo do ano, entre 32,58' (no periélio) e 31,51' (no afélio), onde «'» representa, como se sabe, o símbolo do minuto angular. Baseando-nos nestes valores concluímos que

$$e = \frac{32,58' - 31,51'}{32,58' + 31,51'}, \text{ ou seja, } e = 0,01669.$$

É precisamente esta a excentricidade da órbita do nosso planeta em torno do Sol, segundo as melhores determinações actuais, valor frequentemente arredondado para 0,0167. Ficámos satisfeitos? Nem por isso, pois os valores dos diâmetros aparentes do Sol *não eram* nossos, e não é fácil obter tal exactidão com meios simples. Vamos, portanto, utilizar valores medidos por nós, com o nosso material e nas nossas condições, nunca excelentes mas que nos poderão proporcionar um outro nível de satisfação.

Projectemos a imagem do Sol, num ecrã de papel, com uma luneta diafragmada ou com um telescópio criteriosamente diafragmado. Não há nada a recear se se diafragmar a f40 (diâmetro do diafragma = 1/40 da distância focal da objectiva). Nas várias medições utilize o *mesmo* telescópio, com a *mesma* ocular para a projecção (de preferência uma ocular de distância focal compreendida entre 20 mm e 30 mm. É essencial que se mantenha constante, *em todas as medições*, a distância desde a ocular até ao ecrã de projecção (use uma vara de madeira como bitola). Nestas condições, o diâmetro da imagem do Sol, *projectada no ecrã*, é directamente proporcional ao diâmetro angular da nossa estrela.

O ecrã deve estar fixo ao telescópio, ou ao solo (com tripé) e o seu plano deverá ser perpendicular ao eixo óptico da ocular. A imagem deverá estar bem focada. Pegue numa régua graduada e, encostando-a ao ecrã, meça o diâmetro da imagem do Sol a 4 de Julho e depois a 4 de Janeiro (aproveitando as próximas oportunidades). Ser-lhe-á difícil medir o diâmetro com erro inferior a 1 mm, e as ondulações do limbo solar (provocadas por correntes de convecção na nossa atmosfera) não facilitam. Para minimizar este último problema, faça as medições da parte da manhã, entre as 10 h e as 11 h. Também será difícil saber que estamos mesmo a medir o diâmetro, pois o bordo da régua pode estar a passar ligeiramente ao lado do centro da imagem do disco solar e não se dar por isso.

Pelas razões apontadas, convém fazer *várias* medições (pelo menos 4), tirando e voltando a colocar a régua em cada uma das medições, calculando depois, em cada data, a média dos valores medidos. Por exemplo, admitamos que obtivemos 120 mm como diâmetro *médio* da imagem a 4 de Julho, valor que representaremos por D_p

(diâmetro da imagem no afélio), e 124 mm no periélio, a 4 de Janeiro (D_p). Podemos continuar a utilizar a expressão anterior (que relaciona a excentricidade da órbita da Terra com os diâmetros aparentes do Sol no afélio e no periélio

$$e = \frac{d_p - d_a}{d_p + d_a}, \text{ escrevendo agora } e = \frac{D_p - D_a}{D_p + D_a}$$

visto que, nas condições em que trabalhamos, o diâmetro da imagem projectada no ecrã é directamente proporcional ao diâmetro aparente do Sol. Introduzindo nesta última expressão os nossos valores de D_p e D_a , obtemos:

$$e = \frac{124 - 120}{124 + 120} = 0,0164,$$

que é um resultado bastante satisfatório para um trabalho feito com meios tão simples. Repare-se que uma diferença de $0,0164 - 0,0167 = -0,0003$, em 0,0167, dá um erro relativo de -1,8%.

Embora o observador esteja à superfície da Terra, e não no seu centro, podemos desprezar as dimensões do nosso planeta face às dimensões da sua órbita. De facto a órbita da Terra é uma elipse, mas a sua excentricidade é tão pequena que mais parece uma circunferência.

Façamos um desenho cuidadoso, e grande, à escala, com o eixo maior (a distância $2a$ na Fig. 4) a valer precisamente 1000,0 mm. Nessas condições, na mesma escala, quanto mediria o eixo menor (distância $2b$ na mesma figura)? O cálculo é simples: a Fig. 4 permite concluir que $a^2 = b^2 + c^2$ e sabemos que $e = c/a$ (definição de excentricidade da elipse). Portanto,

$$\frac{a^2}{b^2} = \frac{a^2}{a^2 - c^2} = \frac{a^2}{a^2 - a^2 e^2}, \text{ de onde se conclui que,}$$

$$\frac{a}{b} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^2}} \Leftrightarrow \frac{2a}{2b} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^2}}.$$

Introduzindo nesta última expressão o valor da excentricidade da órbita da Terra ($e = 0,0167$) e de $2a$ (que queremos desenhar com 1000,0 mm), concluímos que o eixo menor mediria 999,86 mm (portanto, a diferença $2a - 2b$ é apenas de 0,14 mm). Distingue-se visualmente de uma circunferência?

E o Sol, no desenho, ficaria a que distância do centro da elipse? Essa distância (c na Fig. 4), é dada pela relação $c = ea$ (que vimos anteriormente). Por isso, no desenho, $c = 0,0167 \times 500 \text{ mm} = 8,35 \text{ mm}$. Num desenho menor as diferenças seriam ainda menos detectáveis.

No "tamanho natural", a órbita da Terra tem $a = 149,598$ milhões de quilómetros (unidade astronómica, abreviadamente representada por u.a.);

$b = 149,577$ milhões de quilómetros;

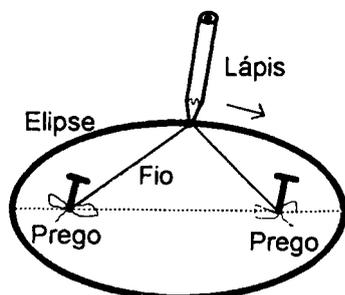
$c = 2,498$ milhões de quilómetros;

$e = 0,0167$ (não depende da escala, como é óbvio).

A excentricidade órbita de Plutão é 0,25, e no caso de Vénus é apenas de 0,007. A excentricidade da órbita da Lua em torno da Terra é 0,055. Porém, a excentricidade das órbitas dos cometas é bastante superior (cerca de 0,9 no caso do Halley). Sabidas as respectivas distâncias ao Sol, no afélio e no periélio, basta fazer

$$\frac{r_a}{r_p} = \frac{1+e}{1-e}, \text{ e portanto } e = \frac{r_a - r_p}{r_a + r_p},$$

É fácil desenhar uma elipse com dois pregos e um fio, numa superfície plana, usando um lápis. Os pregos marcam as posições dos focos, o comprimento *útil* do fio é $2a$ e a distância entre os pregos é $2c$, devendo o fio manter-se sempre esticado. Seguindo estas indicações, a elipse pode ser traçada de acordo com os parâmetros pretendidos.



Bibliografia

FERREIRA, Máximo e ALMEIDA, Guilherme de — *Introdução à Astronomia e às Observações Astronómicas*, Plátano Editora, 4.ª edição (revista e aumentada), pp. 203-249 e 259-260, Lisboa, 1997.

Guilherme de Almeida é professor efectivo do Ensino Secundário. Autor de obras sobre iniciação à Astronomia e observações astronómicas, e de diversos artigos, realizou numerosas acções de formação para professores e é formador do programa FOCO para as áreas de Astronomia e Física.

PROJECTO "FÍSICA EM ACÇÃO"

O projecto "Física em Acção", financiado pelo programa Ciência Viva do Ministério da Ciência e Tecnologia, pretende estimular o ensino experimental da Física nas escolas secundárias com base em novas tecnologias, nomeadamente o uso de sensores, computadores e interfaces de aquisição de dados nos laboratórios escolares.

Este projecto surge na continuação de um projecto homólogo, realizado no ano passado, onde 10 Escolas Secundárias foram equipadas com um kit de sensores da PASCO, uma interface de aquisição de dados e um computador multimédia, com os quais é possível a realização de um grande número de experiências de Física de forma fácil e muito apelativa para os jovens. A SPF assume, neste projecto, o papel de coordenador da rede de escolas oferecendo apoio e formação aos professores, nomeadamente realizando *workshops* de formação e através de ajuda presencial nas escolas prestada por monitores.

Nesta nova edição do projecto, a rede foi expandida com a inclusão de mais nove escolas, seleccionadas a partir do concurso nacional aberto a todas as escolas secundárias, realizado no ano passado. Os critérios de selecção foram análogos aos que então se utilizaram. Procurou-se manter, em particular, uma equipartição geográfica, tendo sido seleccionadas 3 escolas por cada região, Norte, Centro e Sul e Ilhas.

As actividades iniciaram-se com um *workshop* de formação para os professores das novas escolas envolvidas neste projecto (ver programa no noticiário da Delegação Centro). Este *workshop* decorreu nos dias 3 e 4 de Abril de 1998, no Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Estiveram presentes 18 professores e os 9 monitores que acompanharão as escolas *in loco*. Durante este *workshop* os professores tiveram sessões de demonstração do equipamento, e foram discutidos vários aspectos didácticos do uso de sensores e computadores no ensino da Física. Aproveitou-se a oportunidade para discutir vários aspectos de organização, como sejam a acção dos monitores nas escolas. Foram ainda seleccionadas, pelos professores participantes, um conjunto de experiências de Física consideradas mais significativas para os *curricula*, que as escolas se empenharam em realizar com o novo equipamento.

O equipamento completo já foi entregue às escolas e os monitores estão em acção prestando formação nas escolas. Este projecto prolongar-se-á para o próximo ano lectivo. Para mais informações sobre o projecto consultar na Web o endereço (<http://www.fis.uc.pt/~spf/fisacao/index.htm>) ou contactar o Prof. Doutor José António Paixão (jap@pollux.fis.uc.pt).

GRAVITAÇÃO, INÉRCIA E O PARADOXO DA FORÇA CENTRÍFUGA *

ISMAEL TERENO ¹ e PAULO CRAWFORD ²

Departamento de Física e Centro de Física Nuclear da UL
Av. Prof. Gama Pinto, 2, 1699 Lisboa

Num buraco negro esfericamente simétrico e sem carga, a órbita circular $r = 3MG/c^2$ tem propriedades surpreendentes. Os fotões movem-se livremente nessa órbita dando origem a um raio luminoso em torno do buraco. Além disso, duas naves espaciais podem mover-se nessa órbita com diferentes velocidades mas com a mesma aceleração radial. Porém, o mais surpreendente é que para raios menores ($r < 3MG/c^2$), a atracção exercida sobre um corpo que se mova numa dada órbita circular aumenta com a velocidade. Este fenómeno contra intuitivo, conhecido há já algum tempo como o "efeito de Abramowicz", não tem uma interpretação física consensual. Neste artigo são discutidas três interpretações alternativas e mostra-se que uma delas implica uma nova definição de inércia. Só esta última, já apresentada nesta revista, procura explicar o paradoxo em termos de uma anomalia da força centrífuga nessa região.

Introdução

A uma distância crítica de um buraco negro, quanto mais rapidamente uma partícula se move numa órbita circular, maior é a atracção exercida por este sobre a partícula.

Há vários anos que este fenómeno é conhecido como "efeito de Abramowicz" e explicado em termos de um mecanismo não-newtoniano: a força centrífuga inverte o seu sentido no interior da rotoesfera, uma região que se situa dentro de uma distância (coordenada) igual a 1,5 vezes o raio de um buraco negro esfericamente simétrico; isto é, quando a coordenada radial é $r < 3MG/c^2$. Segundo Marek Abramowicz e seus colaboradores, nesta região a força centrífuga, em vez de ser uma força repulsiva que atira os objectos para fora, torna-se uma força de atracção que puxa o material para o interior do buraco negro.

Porém, estamos longe de ter chegado a um consenso sobre a melhor interpretação física para este fenómeno contra-intuitivo. E a primeira dificuldade decorre naturalmente de não existir um

conceito de força centrífuga na teoria da Relatividade Geral (RG). Aliás, no âmbito desta teoria, o conceito de força gravítica é substituído pelo de curvatura do espaço-tempo. Torna-se assim necessário implementar uma separação do espaço-tempo em espaço e tempo de modo a reencontrar, no espaço tri-dimensional, uma expressão que se assemelhe à expressão newtoniana de força centrífuga. Veremos que este processo não é isento de ambiguidade e, por isso, neste artigo são apresentadas três interpretações alternativas. Mostraremos ainda que a primeira interpretação deste fenómeno, também conhecido como o paradoxo da força centrífuga, e já apresentado nesta revista [1], implica uma nova definição de inércia.

Definição de Inércia

A inércia é uma característica de todos os corpos, que pode ser definida

* Trabalho parcialmente financiado pelo programa PRAXIS XXI BM4488/94 da J.N.I.C.T. e pelo projecto CERN/P/FIS/1096/96.

¹ ismael@cosmo.cii.fc.ul.pt

² crawford@cosmo.cii.fc.ul.pt

Buraco negro

Espaço-tempo curvo

Geodésica

Forças inerciais

como uma resistência à aceleração. Quando a velocidade de um corpo varia em valor absoluto, ou quando este se move numa trajectória não rectilínea, surgem os efeitos de inércia sob a forma de forças (fictícias) actuantes sobre o corpo.

Segundo as ideias do físico e filósofo Mach (1836-1916), que muito influenciaram Einstein na construção da teoria da RG, a inércia de um corpo tem origem numa interacção (não especificada) entre o corpo e todas as outras massas do Universo.

A influência preponderante é a dos corpos distantes, historicamente denominados estrelas fixas, pois é a distâncias cosmológicas que se encontra a maior parte da matéria. Experimentalmente não se conseguiu determinar a influência de massas locais, como a Terra e o Sol, nos efeitos de inércia. Consequentemente não se espera que estes variem de ponto para ponto.

Um referencial no qual não existam efeitos de inércia, um referencial inercial, está num estado de movimento privilegiado em relação às estrelas fixas. Portanto são estas, através das suas massas, distribuição e movimento, que determinam o referencial inercial. Esta é a essência do princípio de Mach.

Recentemente foi proposto [2] que os efeitos de inércia surgem quando um corpo se move numa trajectória diferente da descrita pela luz no espaço.

Num espaço plano esta proposição não se distingue da habitual pois aí a luz descreve trajectórias rectilíneas. Porém, na presença de grandes massas e no quadro da RG, onde a intensidade do campo gravítico é dada pela curvatura do espaço-tempo, as trajectórias luminosas poderão ser fortemente encurvadas.

Vejam agora como surgiu esta nova ideia de inércia. Seja dada uma família de observadores num espaço-tempo 4-dimensional M . Os seus 4-vectores velocidade, u^a , $a = 0, 1, 2, 3$, que são os vectores em M tangentes às linhas do Universo desses observadores, permitem uma partição em tempo e espaço: $M = R \times \Sigma$ (o termo técnico é "foliação". Esta foliação traduz-se na seguinte decomposição da métrica:

$$g_{ab} = -u_a u_b + h_{ab}$$

o que permite escrever o elemento de linha na forma

$$ds^2 = g_{ab} dx^a dx^b = -(u_a dx^a)^2 + h_{ab} dx^a dx^b = -d\tau^2 + d\ell^2$$

Na fórmula anterior utiliza-se a convenção de Einstein de soma nos índices repetidos. O espaço Σ é uma hiper-superfície de 3 dimensões, o espaço de repouso do observador com 4-velocidade u^a , no qual todos os acontecimentos (pontos do espaço-tempo) têm o mesmo valor da coordenada temporal, e é caracterizado pela métrica h_{ab} . Note-se que h_{ab} tem ainda a propriedade de projectar qualquer 4-vector no espaço tan-

gente à hipersuperfície Σ e, em particular, $h_{ab}u^b = 0$. Este espaço 3-dimensional, tal como o espaço-tempo, pode ser curvo. A recta real R representa aqui a direcção temporal e, portanto, a direcção definida pelos 4-vectores velocidade u^a .

As trajectórias espaciais, descritas pelos corpos, são as projecções, sobre o espaço Σ das correspondentes linhas do Universo. Em geral, a projecção de uma geodésica de M não é uma geodésica de Σ . Mas há várias maneiras de fazer a partição do espaço-tempo. Em particular é possível fazê-la de modo que as geodésicas de Σ , sejam a projecção das trajectórias luminosas em M , sobre Σ . De um espaço com esta propriedade diz-se que tem uma geometria de referência óptica.

Dado um campo gravítico independente do tempo, representado por um espaço-tempo curvo estático, consideremos as linhas do Universo dos observadores (fixos) que descrevem trajectórias de espaço-tempo tangentes à direcção temporal de simetria.

Suponha-se que um observador (fixo) mede o 4-vector aceleração de um corpo em movimento. A grandeza física aceleração, que é um 3-vector, é calculada a partir da projecção deste 4-vector, a^c , sobre o espaço de repouso do observador. Cada observador pode fazer a sua partição do espaço-tempo, usando o seu tempo próprio, como se explicou atrás. Posteriormente, o 3-vector aceleração, obtido por projecção no espaço associado ao observador, pode ser decomposto numa soma de várias parcelas.

Suponha-se que se faz esta decomposição de maneira que uma das parcelas seja exactamente igual ao termo da aceleração gravítica, tal como é conhecido da teoria newtoniana. Nestas condições, sobra sempre uma outra parcela que se verifica que é proporcional ao desvio da geodésica de um espaço com geometria de referência óptica. Esta última é interpretada como a componente inercial.

Conclui-se assim que a parte inercial se anula quando a trajectória espacial do corpo é idêntica à geodésica desse espaço, ou seja, quando coincide com a trajectória da luz.

Refira-se ainda que, embora se tenha considerado um espaço-tempo estacionário, é possível estender este resultado a um espaço-tempo arbitrário.

Órbitas Circulares num Campo Estático

A partir de agora passa-se a considerar uma situação específica, de modo a analisar, através de um exemplo, o resultado referido.

Considera-se uma nave em órbita circular, no vácuo, em torno de um buraco negro estático e esfericamente simétrico de massa m e sem carga. Calcula-se a sua aceleração, medida por um observador em repouso em relação à massa que cria o campo gravítico.

A geometria do espaço-tempo existente nessa região é definida pela solução das equações de Einstein da RG obtida por Karl Schwarzschild em 1916, menos de dois meses após a publicação desta teoria. Analiticamente esta geometria é caracterizada pela seguinte métrica (em coordenadas esféricas),

$$ds^2 = c^2 \left(1 - \frac{2mG}{rc^2}\right) dt^2 + \frac{l}{1 - \frac{2mG}{rc^2}} dr^2 + r^2 (d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\varphi^2) \quad (1)$$

A nave, em órbita circular plana, mantém constantes as suas coordenadas r e θ e, portanto, o seu deslocamento infinitesimal espaço-temporal (admitindo $\theta = \pi/2$, o que não reduz a generalidade do problema, dada a sua simetria esférica) escreve-se,

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2 + r^2 d\varphi^2 \quad (2)$$

Note que, a partir daqui, se passam a usar as unidades geometrizadas. Isto é, faz-se $G = c = 1$, o que deixa distâncias, tempos e massas, todos com a mesma dimensão.

O 4-vector velocidade da nave é definido como a derivada do 4-vector deslocamento em ordem ao tempo medido pelo viajante (o tempo próprio, τ). As suas componentes são,

$$u^a = \left(\frac{dt}{d\tau}, 0, 0, \frac{d\varphi}{d\tau}\right) = (i, 0, 0, \Omega i)$$

onde $\Omega = d\varphi/dt$ é a velocidade angular da nave medida por observadores no infinito.

Como $d\tau = -ds^2$, este 4-vector tem norma

$$g_{ab} u^a u^b = g_{ab} \frac{dx^a}{d\tau} \frac{dx^b}{d\tau} = u^t u_t + u^\varphi u_\varphi = -1$$

Assim as duas componentes não nulas de u^a não são independentes e da condição de normalização do 4-vector velocidade resulta

$$i^2 = \frac{l}{1 - \frac{2m}{r} - \Omega^2 r^2} \quad (3)$$

Num espaço-tempo curvo, o 4-vector aceleração é calculado a partir da derivada dirigida (covariante) do 4-vector velocidade u^a segundo o próprio u^a , ou seja,

$$a^c = \frac{d^2 x^c}{d\tau^2} + \Gamma^c_{bd} \frac{dx^b}{d\tau} \frac{dx^d}{d\tau}$$

Substituindo as conexões (Γ^a_{bc}) pelas suas expressões na solução de Schwarzschild e considerando um movimento com $\Omega = \text{constante}$ obtém-se,

$$a^r = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) \left(\frac{m}{r^2} - \Omega^2 r\right) i^2 \quad (4)$$

só a componente radial é diferente de zero.

Como a métrica é estática, o eixo dos tempos é ortogonal à hipersuperfície espacial $\Sigma(r, \vartheta, \varphi)$, que é o espaço associado a um observador em repouso em relação à massa (ou seja com r, ϑ, φ constantes). Então o 4-vector aceleração tem projecção sobre S idêntica à sua parte espacial:

$$\vec{a} = (a^r, 0, 0)$$

A trajectória helicoidal, descrita no espaço-tempo, projecta-se em Σ na órbita circular descrita pela nave.

Note-se que o 3-vector, \vec{a} , não tem o mesmo significado do vector aceleração medido no referencial em repouso na teoria de Newton. Este, coincide com a aceleração gravitacional $a_G(r)$ sentida no raio r da órbita e é diferente do vector aceleração medido no referencial da nave, que é $\vec{a}_G + \vec{a}_C$ (gravitacional + centrífuga).

Pelo contrário, a norma da 4-aceleração é um invariante que mede o desvio à geodésica. O quadrado da norma, $a^c a_c$, identifica-se com o quadrado do 3-vector aceleração, \vec{a}^2 , num só referencial: o referencial próprio (neste caso o referencial da nave). Assim, cálculos feitos no referencial em repouso, permitem obter informação sobre as contribuições inerciais.

Observem-se agora as figuras 1 a 3. Representam, utilizando (4), o quadrado da aceleração total, da nave que percorre a órbita de raio coordenado r com Ω constante, em função desse Ω .

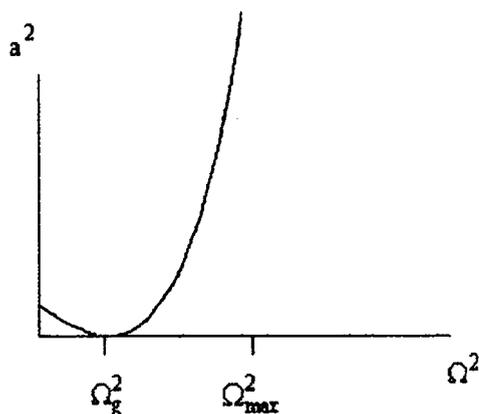


Fig. 1 — $a^2(\Omega^2)$ para o caso $r > 3m$.

Distinguem-se três situações; respectivamente, órbitas com $r > 3m$, $r = 3m$ e $2m < r < 3m$. No eixo das abcissas evidenciam-se dois valores de Ω : Ω_g e Ω_{max} . Ω_g é o valor da velocidade angular da nave que, em cada situação, lhe permite viajar livremente, sem a ajuda de motores, não sofrendo aceleração. Ou seja, é o valor de Ω que a nave tem de ter para descrever uma geodésica. De acordo com (4) é dado por

$$\Omega_g^2 = \frac{m}{r^3}$$

Ω_{max} é o limite superior da velocidade angular da nave, isto é,

$$\Omega_{max}^2 = \Omega^2(v=1) = \frac{r-2m}{r^3}$$

Esta expressão é facilmente obtida, a partir das fórmulas até agora apresentadas. Para isso recorde-se que, na RR, quando a velocidade de um corpo se aproxima da velocidade da luz, a razão entre o seu tempo próprio e o tempo coordenado tende para zero. Então, Ω_{max} é calculado a partir do anulamento do denominador de (3).

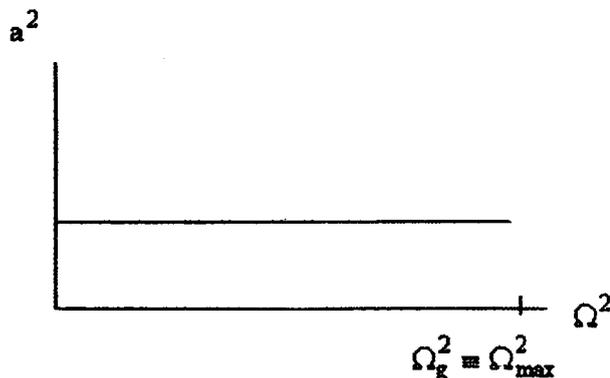


Fig. 2 — $a^2(\Omega^2)$ para o caso $r > 3m$. Aqui Ω_g e Ω_{max} coincidem.

Nestas condições a aceleração é infinita, pois a nave, um corpo material, não pode atingir a velocidade da luz ($v = 1$).

As principais propriedades da aceleração da nave numa órbita circular, patentes nas figuras, são as seguintes:

- Na região $r > 3m$, com o aumento da velocidade a atracção diminui. É o que se espera intuitivamente do conhecimento das órbitas em teoria Newtoniana.
- Em $r = 3m$, a aceleração não varia com a velocidade; isto é, objectos com diferentes velocidades têm a mesma aceleração.
- Na região entre $2m$ e $3m$, com o aumento da velocidade aumenta a atracção.

Nas próximas secções veremos como interpretar estes novos efeitos. Para isso utiliza-se um método que consiste, primeiro, em decompor a aceleração em várias parcelas, às quais se tenta atribuir significado físico; e, depois, em analisar os efeitos a partir do balanço entre essas parcelas.

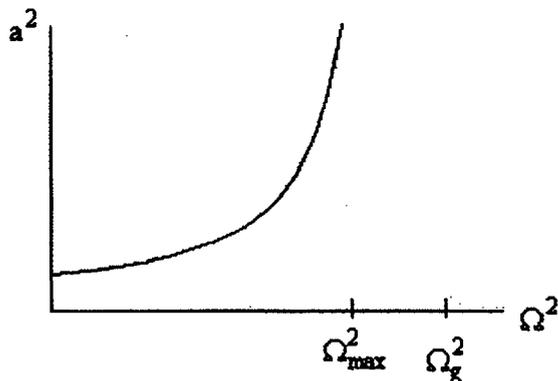


Fig. 3 — $a^2(\Omega^2)$ para o caso $2m < r < 3m$.

Esse tipo de raciocínio é o utilizado em teoria Newtoniana. Relembre-se que aí a aceleração da nave em órbita é dada por

$$a_N = \frac{m}{r^2} - \omega^2 r$$

Esta velocidade angular, ω , representa a variação da coordenada angular j com o tempo medido no referencial do observador. Para fazer uma comparação com a expressão obtida em relatividade geral (4), tem de se notar que aí o tempo próprio medido pelo observador em repouso, é diferente da coordenada t . Então pode-se escrever,

$$\omega = \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{d\varphi}{dt} i$$

E a aceleração é,

$$a_N = \frac{m}{r^2} - \Omega^2 i^2 r \quad (5)$$

1.ª Decomposição

Considera-se que sobre a nave actua uma aceleração gravítica apenas função de r , independente da velocidade. E ainda que o que mantém a nave em órbita é a aceleração centrífuga produzida pelo movimento em órbita. Pode-se assim escrever,

$$a = a_G(r) - a_C(r, \Omega)$$

Separe-se então a aceleração (4) nestas duas parcelas

$$a = \frac{1 - \frac{2m}{r}}{r} \left[\frac{\frac{m}{r} - \Omega^2 r^2 + (1 - \frac{2m}{r}) - (1 - \frac{2m}{r})}{(1 - \frac{2m}{r}) - \Omega^2 r^2} \right]$$

$$= \frac{(1 - \frac{2m}{r})}{r} - \frac{(1 - \frac{3m}{r})(1 - \frac{2m}{r})}{\left[(1 - \frac{2m}{r}) - \Omega^2 r^2 \right] r}$$

Só a segunda parcela depende da velocidade. No entanto esta não é a parte centrífuga pois não se anula quando $\Omega = 0$. Ou seja, tem de se verificar $a(\Omega = 0) = a_G$ e a parte centrífuga que passamos a representar por a_C obtém-se de $-a_C = a - a_G$.

Calcule-se então,

$$a(\Omega = 0) = \frac{(1 - \frac{2m}{r})}{r} - \frac{(1 - \frac{3m}{r})(1 - \frac{2m}{r})}{(1 - \frac{2m}{r})r} = \frac{m}{r^2}$$

E portanto,

$$-a_C = \frac{(1 - \frac{2m}{r})}{r} - \frac{(1 - \frac{2m}{r})(1 - \frac{3m}{r})i^2}{r} - \frac{m}{r^2}$$

$$a_C = -\frac{(1 - \frac{3m}{r})}{r} \left[1 - (1 - \frac{2m}{r})i^2 \right]$$

Finalmente,

$$a = \frac{m}{r^2} - (1 - \frac{3m}{r})\Omega^2 r i^2. \quad (6)$$

Esta expressão põe em evidência um aspecto surpreendente. A aceleração centrífuga, embora cresça com a velocidade em valor absoluto, muda de sinal quando $r < 3m$. Ao manter a definição newtoniana de aceleração gravítica, esta decomposição produz uma alteração da parcela centrífuga para certos valores da coordenada radial r .

A expressão (6) permite explicar os efeitos representados nas figuras 1 a 3, do seguinte modo:

Na figura 1, a nave, quando parada em relação à massa, sofre uma certa atracção. Ao começar a rodar numa órbita circular fica também sujeita a uma aceleração centrífuga que contraria a atracção. Para uma certa velocidade as duas acelerações cancelam-se e a trajectória no espaço-tempo, correspondente a esta órbita livre

no espaço é uma geodésica. Aumentando a velocidade, desfaz-se o equilíbrio e a nave é puxada para fora. É o comportamento esperado com base na Mecânica newtoniana.

Na figura 2, a nave sofre sempre a mesma aceleração, qualquer que seja a velocidade com que percorra a órbita $r=3m$, porque aí não há aceleração centrífuga.

Refira-se que na vizinhança de um buraco negro de Schwarzschild, a curvatura é de tal modo intensa que existe uma geodésica para a luz, com r constante. Esse valor é precisamente $r=3m$ [3]. A projecção desta geodésica helicoidal sobre Σ é a órbita $r=3m$ percorrida pela nave. Conclui-se então que a nave, ao percorrer esta trajectória espacial da luz, não sofre efeitos de inércia, como se afirmou no final da secção II.

Na figura 3, a nave, quando parada, sofre uma certa atracção, mas, ao mover-se, esta aumenta. Isto acontece porque, nesta região, a aceleração centrífuga contribui para a atracção. Este efeito é conhecido como o paradoxo da força centrífuga e foi já referido na Gazeta de Física [1].

Esta situação pode não parecer paradoxal se se tomar em consideração que os conceitos de sentido interior e sentido exterior não são absolutos [4]. De facto, com alguma manipulação algébrica [5], mostra-se que a parcela da aceleração centrífuga dada em (6) tem a direcção e sentido da normal exterior à superfície

$$\frac{r \operatorname{sen}(\theta)}{\sqrt{1 - \frac{2m}{r}}} = \text{const.}$$

Assim, dado um certo ponto (r, ϑ, φ) de uma órbita, se se definir localmente esta direcção como a direcção exterior, pode-se dizer que a força centrífuga aponta sempre para o exterior. Na figura 4 representa-se a superfície

$$\frac{r \operatorname{sen}(\theta)}{\sqrt{1 - \frac{2m}{r}}} = 3\sqrt{3}m$$

É a superfície de um sólido conhecido por cilindro de Von Zeipel.

Observa-se que em $r=3m$ a superfície vira-se do avesso. Globalmente, o sentido exterior num ponto com $r > 3m$ (ponto B na figura) parece ser o inverso do sentido exterior desenhado a partir de um ponto com $r < 3m$ (ponto A). Note-se que a figura não está desenhada à escala. O eixo z está dilatado em relação aos eixos x e y .

O sentido exterior local na região $r < 3m$ é o sentido interior global, isto é, aponta para o interior da órbita,

para o eixo de rotação. Pode-se assim considerar que a situação não é paradoxal, já que a força centrífuga aponta sempre localmente para o exterior.

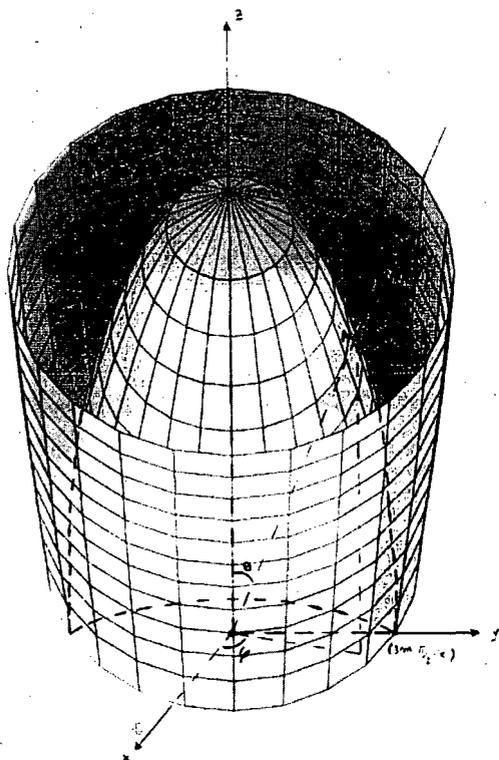


Fig. 4 — Cilindro de Vonz Zeipel.

Voltando à figura 3, note-se que $\Omega_g > \Omega_{max}$. Isto indica que a nave nunca se pode mover livremente nessas órbitas, pois para isso teria de atingir uma velocidade superior à da luz.

Refira-se ainda que nesta análise não se consideram órbitas com $r < 2m$ ($r = 2m$ é o raio de Schwarzschild) pois essa é a região interior do buraco negro, para lá do horizonte. A região referente à figura 3 é portanto próxima do horizonte. Num buraco negro com massa 10 vezes a massa solar, a órbita $r = 3m$, convertida para quilômetros, corresponde a $r = 44.2$ Km.

Se se aceitar esta interpretação, baseada na análise da nova aceleração centrífuga, para os dois fenômenos contra-intuitivos previstos pela teoria da relatividade geral, tem de se colocar a seguinte questão:

Porque é que a força centrífuga tem este comportamento? Ou, qual a razão de não haver efeitos de inércia nas trajetórias da luz? A resposta não é conhecida. Se o fosse, constituiria uma importante contribuição para o conhecimento da origem da inércia. No entanto apre-

senta-se uma ideia [6] que ajuda a tornar estes fenômenos intuitivos, e que foi já divulgada em [1].

Imagine-se dois astronautas no interior de uma estação espacial em forma de anel, de comprimento $6\pi m$, disposta ao longo da órbita $r = 3m$. Um deles desloca-se ao longo da estação e o outro observa-o. A luz que se reflecte no primeiro, viaja ao longo do anel até ao segundo astronauta, que nunca deixa de ver o que se afasta. Por outras palavras, aquele que observa pensa que o viajante se desloca ao longo de uma recta e aceita como natural que o movimento de um veículo ao longo da estação não sofra efeitos centrífugos. Isto é, deste ponto de vista, a trajetória da luz não é curva; podemos dizer que é opticamente rectilínea.

Então a definição de inércia pode ser mantida, desde que se substitua a palavra rectilínea pela expressão opticamente rectilínea.

2.ª Decomposição

Adopte-se agora um outro critério de decomposição [7] — considere-se que durante a translação a nave aumenta a sua energia com a velocidade, como consequência do aumento da massa efectiva (relativista) da nave $m\sqrt{1-v^2} = m\gamma(v)$, onde v é a velocidade da nave, medida pelo observador em repouso. A aceleração gravítica deve, consequentemente, aumentar do mesmo modo, ou seja, proporcionalmente a uma potência do factor γ de Lorentz.

A nave tem um deslocamento espacio-temporal dado por (2). As partes espacial e temporal dessa expressão são os deslocamentos espacial e temporal medidos pelo observador em repouso em relação à massa. Logo a velocidade é simplesmente a razão entre esses dois deslocamentos,

$$v^2 = \frac{r^2}{\left(1 - \frac{2m}{r}\right)} \left(\frac{d\phi}{dt}\right)^2 = \frac{r^2 \Omega^2}{\left(1 - \frac{2m}{r}\right)}$$

$$\Rightarrow \gamma^2 = \left(1 - \frac{2m}{r}\right) i^2$$

Substituindo na expressão da aceleração (4), obtém-se,

$$a = \gamma^2 \left(\frac{m}{r^2} - \Omega^2 r^2\right) \quad (7)$$

Note-se que (7) está já na forma separada de acordo com o novo pressuposto.

Isto é,

$$a_G = \frac{m}{r^2} \gamma^2$$

e

$$a_C = r\Omega^2 \gamma^2$$

Este novo critério leva a uma diferente expressão para a aceleração centrífuga que, mantendo as características de se anular quando $\Omega=0$ e ser, em valor absoluto, crescente com Ω , já não se anula, nem muda de sinal, em nenhuma região de r . É o comportamento esperado da aceleração centrífuga.

Se se aceitar esta como sendo a verdadeira aceleração centrífuga, então deixa de se verificar a ausência de efeitos de inércia nas trajectórias da luz e a inversão em $r < 3m$.

No entanto a aceleração total não se altera e portanto as figuras 1-3 continuam a ser válidas. As interpretações é que são diferentes.

Em $r = 3m$ a aceleração não varia com a velocidade. Isto deve-se ao facto de, nesta órbita, a atracção (a_G) e a repulsão (a_C) aumentarem do mesmo modo e ambos os acréscimos se cancelarem.

Entre $r = 2m$ e $r = 3m$ o aumento de velocidade faz aumentar a atracção. Isto é explicado através de (7), que mostra que nessa região a_G aumenta mais do que a_C e o seu efeito domina.

3.ª Decomposição

Agora o critério vai ser o de admitir que os conceitos familiares de aceleração gravítica e centrífuga se devem manter [8].

Para simplificação do cálculo, parta-se da aceleração total na forma (6). Desenvolvendo o produto do factor entre parêntesis obtém-se:

$$a = \frac{m}{r^2} - \Omega^2 r i^2 + 3m\Omega^2 i^2 \quad (8)$$

Os dois primeiros termos identificam-se, respectivamente, com as componentes gravítica e centrífuga. São exactamente iguais aos newtonianos, como se pode ver na expressão (5).

Este novo critério faz surgir um novo termo, de sinal atractivo. Em $r = 3m$, este último cancela o centrífugo, ficando $a = a_G$, o que explica a figura 2.

Na região entre $2m$ e $3m$, o novo termo atractivo vence o centrífugo, o que explica o aumento da atracção na figura 3.

E na região $r > 3m$, o termo centrífugo domina o novo termo atractivo.

Os parâmetros do movimento da nave em torno do buraco negro, são a massa deste (m), que rege a parte

potencial, e a velocidade angular daquela W , que determina o comportamento cinético.

O novo termo contém o produto entre os dois parâmetros. Diz-se assim que é um termo de acoplamento potencial-cinético. Isto implica a existência de um novo termo a contribuir para a energia do sistema — a energia gravito-rotacional.

Este tipo de energia não existe na teoria Newtoniana e, portanto, a ser válido este 3º critério, conclui-se que é necessário introduzir um novo acoplamento não linear, a juntar às forças habituais, para permitir reinterpretar o comportamento da nave em torno de um buraco negro. Isto não é de surpreender numa teoria como a relatividade geral que é não linear.

Conclusão

Foram apresentadas três interpretações diferentes para um efeito previsto pela teoria da relatividade geral. É importante realçar que, por ser possível considerar mais do que uma interpretação, isto não significa que esta teoria não seja exacta. Este facto põe apenas em evidência a não existência de uma forma única de separar, em várias contribuições, uma força total calculada em RG; isto é, evidencia a não unicidade da definição das forças gravitacional e centrífuga, nesta teoria.

Fazendo outras decomposições apareceriam novas definições destas forças, diferentes das apresentadas. Estas três foram as escolhidas neste artigo pela lógica dos seus pressupostos, que não podem à partida ser rejeitados, e pelo interesse das suas implicações.

Recapitulando, os pressupostos podem ser escritos da seguinte forma:

1.ª Decomposição — Mantem-se o conceito de aceleração gravítica e define-se o que sobra como sendo a componente centrífuga.

2.ª Decomposição — Mantem-se o conceito de aceleração centrífuga e define-se o que sobra como sendo a componente gravítica.

3.ª Decomposição — Mantém-se os conceitos de aceleração gravítica e de aceleração centrífuga e o que sobra é interpretado como um efeito da relatividade geral. Note-se que outras decomposições possíveis teriam de alterar ambos os conceitos habituais.

Todas as abordagens permitem explicar o efeito em estudo, mas têm diferentes consequências. Estas podem ser sintetizadas da seguinte forma:

1.ª Decomposição — A nova definição de aceleração centrífuga leva a uma nova definição de inércia:

Um corpo sente os efeitos de inércia se estiver acelerado ou se, movendo-se com velocidade de módulo

constante, percorrer uma trajectória que não seja "opticamente rectilínea". (Note-se que, de acordo com a secção II, este resultado é geral. Isto é, não é apenas válido para trajectórias circulares na solução de Schwarzschild).

2.ª Decomposição — A nova definição de aceleração gravítica leva a que esta varie com a velocidade. Assim, por exemplo, um avião ao atravessar o Atlântico, seguindo um paralelo constante, pesa mais do que parado no aeroporto.

3.ª Decomposição — Em Relatividade Geral existe um novo tipo de forças, desprezáveis no limite em que a teoria de Newton é válida, que se deve a um acoplamento entre a energia gravitacional e a energia cinética.

Não se sabe qual dos critérios é o correcto, ou mesmo se algum deles o é. Uma maneira de descobrir seria idealizar uma experiência para ser realizada numa viagem à vizinhança de um buraco negro. No entanto a 1ª abordagem tem uma característica diferente das outras, que lhe pode dar uma certa vantagem. Explica o fenómeno da mudança de comportamento da aceleração em $r=3m$, baseando-se no facto de essa ser a trajectória da luz. Pelo contrário, nos outros dois casos, apenas se prevê que essa mudança tem de ocorrer. Nestes, o facto desta mudança acontecer na órbita da luz $r=3m$, é apenas uma coincidência. Porém, em física as coincidências levantam suspeitas.

Referências:

1. LAGE, E. — *Gazeta da Física* (1993) 16 23-24.
2. ABRAMOWICZ, A. & LASOTA, J. P. — *Class. Quantum Gravity* (1997) 14 A23-A30 (e referências aí citadas).
3. SCHUTZ, B. — *A First Course in General Relativity*, (1985) Cambridge University Press p. 279.
4. ABRAMOWICZ, A. — *Mon. Not. R. Astr. Soc.* (1992) 256 710-718.
5. ABRAMOWICZ, A. — *Mon. Not. R. Astr. Soc.* (1990) 245 720-728.
6. ABRAMOWICZ, A. — *Scientific American* (1993) (Março) 26.
7. PAGE, D. *Scientific American* (1993) (Agosto) 9.
8. CHAKRABARTI, S. — *Mon. Not. R. Astr. Soc.* (1993) 261 625-629.

Ismael Tereno é licenciado em Física pela FCUL. Está actualmente a concluir o mestrado em «Física de Altas Energias e Gravitação» na mesma instituição.

Paulo Crawford é doutorado em Física pela Universidade de Lisboa e professor auxiliar da Faculdade de Ciências da mesma Universidade, onde rege entre outras a disciplina de Relatividade e Cosmologia. É responsável pelo grupo de Gravitação e Cosmologia do CFNUL.

PROJECTO "CIÊNCIA A BRINCAR"

O projecto "Ciência a Brincar", financiado pelo programa Ciência Viva II do Ministério da Ciência e Tecnologia, destina-se a crianças do ensino pré-escolar e 1.º ciclo do ensino básico, pretendendo despertar o espírito de observação e a curiosidade pela Ciência.

Neste projecto, foram preparadas 250 caixas contendo material para a realização de 13 experiências muito simples.

Cada caixa foi acompanhada por um caderno com a descrição e ilustração de cada experiência, organizadas de forma a que a sequência corresponda a um grau crescente de dificuldade. Os textos procuram, numa linguagem simples e viva destinada às crianças, apelar ao sentido de observação e estimular a curiosidade e o gosto pela experimentação. O caderno inclui ainda bibliografia onde os educadores poderão encontrar sugestões de experiências adicionais, de forma a que a utilização deste kit possa ter um efeito multiplicativo.

No interior de cada caixa, o material associado às diferentes experiências foi embalado separadamente, com a identificação do respectivo número. O material foi escolhido de forma a que as experiências fossem de baixo custo e facilmente reproduzíveis nas escolas. Assim, todo o material contido no kit pode ser adquirido em lojas como supermercados, papelarias, retro-sarias, lojas de ferragens, etc., não sendo necessário recorrer a casas de especialidade.

Foram contactadas por carta 60 escolas do 1.º ciclo do ensino básico e jardins de infância da região Centro, explicando os objectivos do projecto e solicitando a sua adesão. Aderiram ao projecto 26 escolas, representadas por 47 professores.

No dia 1 de Abril de 1998 foi realizada a sessão de lançamento do projecto no Departamento de Física da Universidade de Coimbra destinada aos professores. A sessão contou com a presença do Secretário-Geral da Sociedade Portuguesa de Física, Prof. Dr. Carlos Matos Ferreira e do Presidente do Departamento de Física da Universidade de Coimbra, Prof. Dr. João da Providência e Costa, bem como toda a equipa do Ciência a Brincar. Foram realizadas as 13 experiências propostas, seguindo-se um debate com os professores sobre os objectivos e o modo prático de execução do projecto. No final, foram entregues dois kits por professor. Estes últimos orientarão a execução das experiências nas respectivas turmas.

Posteriormente à realização da sessão, a Sociedade Portuguesa de Física tem recebido numerosos pedidos de adesão ao projecto, sendo o número total de professores envolvidos neste momento de 75, em 44 escolas. Pelas informações que nos chegam, as experiências têm-se realizado com dinamismo e entusiasmo. Continuaremos, naturalmente, a aceitar pedidos de adesão enquanto houver kits disponíveis para entregar. Estas adesões ao projecto têm revelado que o retraimento inicial de alguns professores perante uma iniciativa que é inovadora no ensino básico, se tem vindo a dissipar à medida que estes tomam conhecimento do sucesso que a realização das experiências tem junto das crianças.

Neste momento, e com base na experiência adquirida, estamos a preparar um livro de actividades experimentais para crianças.

SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS

MIGUEL C. BRITO

Departamento de Física das Atmosferas, Oceanos e Planetas
Universidade de Oxford — Reino Unido

A observação no infravermelho pode revelar informação essencial e única para a compreensão dos processos físicos da atmosfera da Terra e dos restantes planetas do Sistema Solar, a temperatura dos oceanos ou a história de longínquas galáxias activas. A crescente necessidade de melhor resolução espacial e espectral levou ao desenvolvimento de detectores cada vez mais sofisticados. Com a presente tecnologia estes instrumentos precisam de funcionar num ambiente de temperaturas criogénicas. Neste artigo discutem-se os requisitos destes sistemas de refrigeração para aplicações espaciais descrevendo-se ainda algumas das soluções entretanto encontradas.

Introdução

A zona infravermelha do espectro foi alvo nas últimas décadas de um espantoso desenvolvimento científico e tecnológico. As suas aplicações à observação da superfície terrestre, ao estudo da atmosfera, não só da Terra mas também dos restantes planetas do Sistema Solar, e à astronomia, vieram revolucionar as ideias que tínhamos sobre estes objectos. Exemplos famosos são a descoberta do buraco do ozono sobre a Antárctida ou a confirmação das flutuações na radiação cósmica de fundo.

A observação da superfície da Terra a partir de plataformas em órbita tem que ser feita em comprimentos de onda para os quais a atmosfera é transparente. Duas destas bandas transparentes encontram-se entre 0.3-2 μm (utilizada para medir radiação solar reflectida pela superfície) e 8-14 μm (utilizada para medir radiação emitida pela própria superfície). Detectores de infravermelhos (IV) sensíveis a estes comprimentos de onda tem que funcionar imersos em ambientes de temperaturas muito baixas de modo a reduzir o ruído térmico. Algumas das aplicações podem exigir o arrefecimento não só do detector em si mas também de parte da componente óptica do instrumento.

Já o estudo da atmosfera tem que ser feito a frequências para as quais a

atmosfera não é transparente. A sua emissão térmica (que se estende até ao longínquo IV 5-100 μm) revela a abundância relativa das diferentes espécies (por exemplo 8 μm para o vapor de água e 9.6 μm para o ozono) e pode ainda indicar ventos, perfis de temperatura ou distribuições verticais e espaciais dos diferentes gases contribuindo deste modo para a compreensão dos processos físicos que governam a atmosfera, tais como a dinâmica de larga escala, a fotoquímica ou a meteorologia.

Também em astronomia o IV é uma banda do espectro particularmente importante. Os primeiros estádios da evolução das estrelas, as flutuações na radiação cósmica de fundo e o estudo de cometas são alguns dos muitos exemplos onde observações no IV trouxeram alterações fundamentais à nossa compreensão da física destes astros.

Se, como vimos, a atmosfera da Terra absorve e emite radiação nestes comprimentos de onda, a astronomia dos IV deve assentar naturalmente em observações a partir de plataformas espaciais. Para este tipo de observação onde o ruído de fundo é a principal limitação, todo o telescópio tem que ser arrefecido de modo a atenuar a radiação térmica emitida pelas diferentes componentes do instrumento.

Refrigeração espacial

Sistemas passivos

Sistemas de He líquido

Refrigeradores mecânicos

O Infrared Astronomical Satellite (IRAS) foi o primeiro dos grandes telescópios a orbitar a Terra e em 1983 surpreendeu a comunidade astronómica com a descoberta de fortes emissões galácticas no IV. O sistema de refrigeração consistia num tanque com 540 litros de hélio superfluido construído pela Ball Aerospace Division. A missão teve uma duração de 10 meses e foi considerada um sucesso.

Dois anos mais tarde foi a vez do Cosmic Background Explorer (COBE) que, com um sistema de refrigeração idêntico, estudou as flutuações na radiação cósmica de fundo.

Desde então foram muitas as missões com telescópios de IV. A Tabela 1 resume as principais características dos sistemas de arrefecimento das diferentes missões.

Tabela 1 — Sistemas de refrigeração para telescópios de IV em órbita

Missão	Data	Agência	Duração	Comentário
IRAS Infrared Astronomical Satellite	1983	NASA	10 meses	540 litros, hélio superfluido, 1.8 K
COBE Cosmic Background Explorer	1985	NASA	18 meses	versão mais sofisticada do IRAS
IRTS IR Telescope in Space	1995	NASDA	20 dias	10 litros, hélio superfluido, 1.8 K
ISO Infrared European Observatory	1995	ESA	18 meses	2100 litros, hélio superfluido, 1.8 K
STIRF Space IR Telescope Facility	2001	NASA	2.5 anos	540 litros, hélio superfluido, 1.8 K
FIRE Far IR Explorer	2003	NASA	5 anos	versão mais sofisticada do COBE

Requisitos especiais para funcionamento no Espaço

A obtenção de baixas temperaturas no espaço levanta problemas tecnológicos muito diferentes dos dos sistemas de refrigeração que se usam em laboratórios e telescópios à superfície da Terra.

A primeira grande diferença entre um sistema a bordo de uma nave espacial ou de um satélite e um sistema terrestre é o tempo de vida. Na superfície, se alguma coisa corre mal interrompe-se a observação, chama-se o técnico da manutenção e corrige-se o problema. No espaço, onde a manutenção é impossível¹ e uma falha um desastre completo, a fiabilidade do sistema é o mais crucial dos requisitos.

Outras das limitações destes sistemas espaciais são, por exemplo, o consumo de energia, as dimensões e peso do sistema, o ruído (um sistema mecânico de refrigeração que provoque vibrações no detector pode limitar seriamente a qualidade de imagem do telescópio) e a robustez (não nos podemos esquecer que o sistema tem que sobreviver às duras condições do lançamento).

A solução de todos estes problemas é uma missão difícil, mas que tem progredido formidavelmente nos últimos trinta anos, desde os primeiros passos da Era do Espaço quando eram os sistemas criogénicos que limitavam o tempo de observação a alguns dias ou por vezes apenas algumas horas, até aos dias de hoje onde se assiste a missões que mantêm temperaturas de -220°C durante anos de funcionamento contínuo.

Sistemas Passivos

Todos sabemos que a temperatura do espaço é apenas 4 K. Pergunta-se então: qual é a necessidade de arrefecer um sistema num ambiente já por si tão frio?

De facto, um dos mais eficientes processos de refrigeração no espaço consiste precisamente num disco preto, chamado **radiador**, orientado para a gelada escuridão interstelar, radiando o calor produzido pelos diferentes sistemas da nave ou satélite. Um dos problemas deste tipo de sistemas reside na necessidade de restringir a orientação da nave de modo a evitar que o disco receba luz do Sol, directamente ou reflectida na Terra ou na Lua.

Outra limitação dos radiadores é a sua dimensão que se torna proibitiva para temperaturas muito baixas (o diâmetro é inversamente proporcional ao quadrado da temperatura absoluta).

Os sistemas radiativos são ainda particularmente sensíveis à contaminação. Um ambiente com poeiras, por exemplo a cauda de um cometa, poderia danificar o disco preto degradando o comportamento de todo o instrumento.

Apesar de todas estas limitações e constrangimentos, sistemas radiativos têm sido utilizados com regularidade em aplicações espaciais, desde o tempo dos satélites meteorológicos NOAM -7 até aos dias de hoje. Um exemplo recente é o do CIRS² a bordo da missão Cassini, iniciada em Setembro de 1997, que refrigera um espectrómetro que pretende analisar em detalhe a atmosfera de Saturno.

Sistemas de hélio líquido

Outro modo óbvio de manter temperaturas baixas é o uso de materiais naturalmente muito frios, por exemplo **hélio líquido**. A ideia é usar um grande tanque cheio de

¹ A excepção é o Hubble Space Telescope, um caso único da história do Espaço que prevê uma série de missões de *upgrade* e manutenção. Durante a próxima visita, em Dezembro de 1999, os astronautas irão instalar um refrigerador mecânico que substituirá os 100 kg de azoto líquido para arrefecer o NICMOS (Near IR Camera Multi Object Spectrometer) que entre tanto evaporaram (New Scientist, 18 Maio 1997, pp 12).

² Composite Infrared Spectrometer.

hélio líquido que está em permanente contacto com os detectores. A temperatura assim obtida é inferior a 4.2 K, preferencialmente inferior a 2.2 K para minimizar a taxa de evaporação do hélio líquido e dura enquanto o criogéne não evaporar completamente.

A grande vantagem deste sistema é a sua fiabilidade mas o peso e as dimensões do tanque podem tornar-se incomportáveis para missões de longa duração.

Outro problema com os tanques de hélio líquido é o chamado problema da separação das fases. Num laboratório à superfície, devido à gravidade, a componente líquida fica no fundo do tanque e a componente gasosa, por ser menos densa, fica por cima. Se o detector estiver em contacto com o fundo do tanque não há problema em manter a sua temperatura sobre controle.

No espaço o caso muda de figura. Num ambiente de microgravidade, não há razão para o líquido ficar por baixo e por isso torna-se necessário introduzir um complicado sistema de vasos capilares para conduzir a componente líquida (i.e. fria) do criogéne para a zona em contacto com o detector.

Sistemas como este foram desenvolvidos nos anos 1970 pelos militares norte americanos mas nunca foram utilizados em aplicações espaciais, civis ou científicas.

Uma alternativa que resolve o problema da separação das fases é o recurso a **hélio superfluido insaturado**, isto é, hélio líquido armazenado a pressões superiores à pressão de saturação, pressão à qual o hélio líquido se encontra em equilíbrio com o seu vapor. Resolve-se o problema da separação das fases com o custo da massa e peso adicionais para reforçar os tanques de modo a suportar pressões tão elevadas.

Telescópios no infravermelho a bordo de satélites como o COBE ou o ISO³ utilizaram com sucesso sistemas de hélio superfluido (c.f. Tabela 1).

Refrigeradores Mecânicos

Existe uma terceira categoria de sistemas de refrigeração para aplicações espaciais chamados Refrigeradores Mecânicos que consistem essencialmente em diferentes configurações de pistões que sucessivamente comprimem e expandem o gás (geralmente hélio) convertendo calor em trabalho. O resultado final é a transferência de calor da zona fria (onde se monta o detector) para a zona quente, geralmente um pequeno radiador que re-irradia esse calor para o espaço.

Os refrigeradores mecânicos podem arrefecer instrumentos a uma grande variedade de temperaturas e com uma grande variedade de eficiências. De um modo geral estas máquinas são pequenas e leves, de baixo custo e versáteis. As desvantagens relativamente aos radiadores e aos sistemas de hélio líquido são o consumo de energia e a dificuldade em controlar as vibrações.

De entre os vários refrigeradores desenvolvidos, os baseados no ciclo de Stirling revelaram-se os mais efi-

cientes tendo sido os únicos que foram usados em sistemas de refrigeração em órbita.

Essencialmente, o refrigerador baseado no ciclo de Stirling é constituído por dois pistões e um permutador. O permutador é uma espécie de esponja térmica que mantém um gradiente de temperatura entre a região fria e a região de compressão: o permutador absorve calor quando o fluido quente o atravessa a caminho da zona fria; o fluido recupera esse calor quando, na segunda fase do ciclo, o fluido frio atravessa o permutador no sentido contrário.

O princípio de funcionamento do refrigerador Stirling consiste numa sucessão de compressões e expansões a temperaturas diferentes, resultando numa transferência de calor de T_E para T_C (c.f. Figura 1). O ciclo termodinâmico consiste em 4 fases distintas. No início do ciclo, o pistão compressor aproxima-se do permutador enquanto o pistão de expansão se mantém estacionário. Durante esta fase o fluido é comprimido, a pressão aumenta mas a temperatura mantém-se pois o calor gerado é transferido para o exterior. Em seguida, os dois pistões movem-se simultaneamente de modo a que o volume entre os dois pistões se mantém constante. O fluido atravessa a permutador e por isso arrefece. A redução de temperatura provoca a redução de pressão. Segue-se o processo de expansão. O volume aumenta e a pressão diminui mas a temperatura mantém-se constante pois o refrigerador está a absorver calor do exterior. Finalmente, para encerrar o ciclo, os dois pistões movem-se simultaneamente, transferindo o fluido do espaço de expansão para a zona de compressão. O fluido atravessa o permutador e re-absorve o calor que aí deixara na segunda fase do ciclo.

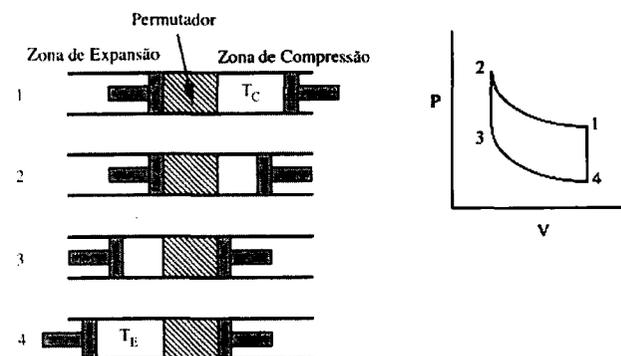


Fig. 1 — Princípio de funcionamento de um refrigerador Stirling.

Tubo Pulsado

Outro sistema mecânico de refrigeração muito em voga nos últimos tempos é o Tubo Pulsado, uma variante do Stirling.

³ Infrared Space Observatory.

Como muitas vezes acontece em ciência, o Tubo Pulsado nasceu de um acaso acidental. Estávamos no início dos anos 1960 quando Grifford, da Universidade de Syracuse nos EUA, notou que um pequeno compressor em série com um longo tubo fechado aquecia a extremidade deste. Concluindo que existia um processo de transferência de calor do compressor para a extremidade do tubo, Grifford colocou um permutador entre o pistão e o tubo de modo a acumular o efeito. O resultado foi que a base do permutador arrefeceu (c.f. Figura 2).

Longsworth, um dos seus estudantes, estudou sistematicamente o sistema mas devido à muito baixa eficiência da máquina então produzida o projecto foi abandonado pouco depois, sendo apenas recordado como mais uma curiosidade académica.

Em 1984 porém, um grupo de cientistas russos da Escola Técnica Superior de Moscovo (Mikulin, 1984) propôs a introdução de um reservatório a pressão constante ligado ao topo do tubo através de um orifício, uma configuração que ficou conhecida pelo nome de Tubo Pulsado com Orifício. A primeira máquina construída com esta nova configuração (Radebaugh, 1986) revelou-se muito mais eficiente e pela primeira vez desafiou o domínio dos refrigeradores Stirling.

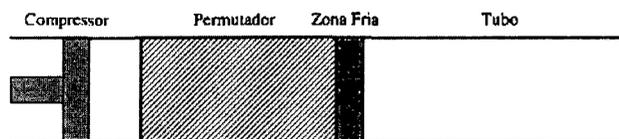


Fig. 2 — Diagrama do Tubo Pulsado.

O princípio de funcionamento é relativamente simples e está ilustrado na Figura 3. Durante a primeira fase do ciclo, uma dada porção elementar de gás sofre uma compressão adiabática e a sua temperatura aumenta para T_Q . Como a pressão no tubo é agora superior à pressão dentro do reservatório, o elemento de gás desloca-se no sentido do reservatório. Este é um processo isotérmico. Entretanto, entramos na segunda fase do ciclo que consiste na expansão adiabática. A porção elementar de gás arrefece mas, devido ao deslocamento de X_2 para X_1 , atinge agora uma temperatura, T_F , mais baixa do que a temperatura original. O resultado é o arrefecimento da base do tubo, um arrefecimento que se vai acumular de ciclo para ciclo até que se atinge uma temperatura mínima em que o processo de refrigeração é compensado pelas diversas fontes secundárias de calor, como por exemplo a condução ao longo do tubo ou do permutador.

A grande vantagem do Tubo Pulsado relativamente aos Stirling é o facto de apenas ter um pistão (embora existam configurações onde o orifício e o reservatório são substituídos por um segundo pistão) e portanto ter, potencialmente, um tempo de vida muito mais longo.

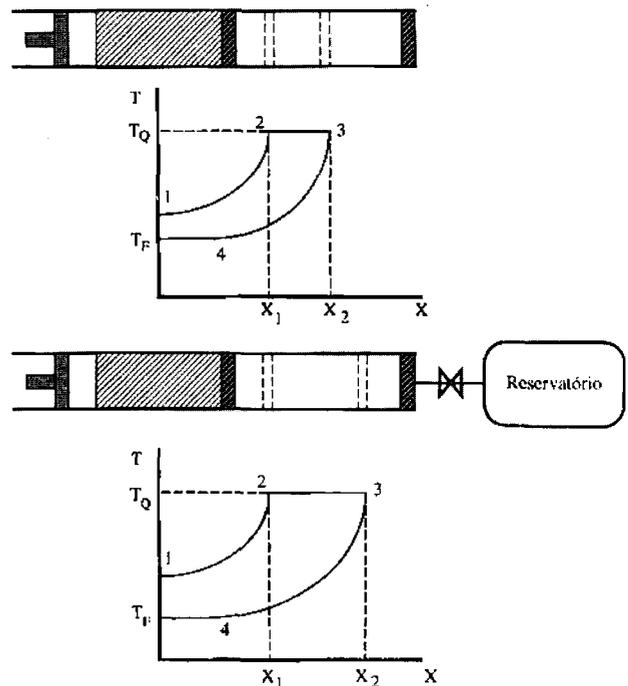


Fig. 3 — Princípio de funcionamento do Tubo Pulsado com Orifício.

A tecnologia dos Tubos Pulsados para aplicações espaciais ainda está a dar os primeiros passos mas os resultados são bastante promissores. A Tabela 2 compara a *performance* de diversos refrigeradores mecânicos.

Tabela 2 — Sistemas de refrigeração mecânicos

Fabricante	Data	Temperatura	Potência	Comentário
Malaker, USA	1970	100 K	1.7 W	Stirling, baseado em Refrigeradores Mecânicos militares
	1970	80 K	1 W	versão modificada, SKYLAB
Phillips, USA	1978	60-80 K	0.1-2 W	Stirling, STP 78-1 (espectrometro de raios γ)
	1983	65 K	5 W	Stirling de rolamentos magnéticos
British Aerospace, UK	1989	50-80 K	0.8 W/50 W	baseado no Stirling para o ISAMS
Lockheed, USA	1995	80 K	0.8 W/34 W	baseado no Stirling para o ISAMS
Hughes, USA	1995	80 K	0.15 W/8 W	Stirling miniatura (0.5 Kg)
Ball, USA	1995	55 K	1.5 W/65 W	Stirling para o AXAF
MITI, Japão	1995	70 K	1.2 W/44 W	Stirling para o ASTER
Hitachi, Japão	1995	70 K	5.2 W/200 W	Rolamentos magnéticos
Moscovo, URSS	1984	105 K	10 W	Tubo Pulsado com orifício, 15 Hz
NIST, USA	1986	60 K	—	Tubo Pulsado a 9.0 Hz
CEA, França	1990	85K	4 W	Tubo Pulsado a 3.2 Hz
Academia Sinica, China	1990	49 K	6 W	Tubo Pulsado a 8.3 Hz
TRW, USA	1992	80 K	0.5 W/18 W	Tubo Pulsado Miniatura
	1994	35 K	1 W	Tubo Pulsado
	1996	65 K	5 W	Tubo Pulsado (space qualified)

Conclusão

Para resumir o que ficou dito até aqui, pode-se dizer que a observação do Espaço e da Terra na região do infravermelho revolucionou a nossa visão da Física e do mundo, mas tratou-se de um processo lento e doloroso que só foi possível graças a um progresso, também em si revolucionário, das técnicas e tecnologias associadas a detectores e aos seus sistemas de refrigeração.

O futuro reservar-nos-á certamente inúmeras descobertas e avanços, num meio que fervilha de actividade

Miguel C. Brito é licenciado em Engenharia Física Tecnológica, pelo Instituto Superior Técnico em Lisboa, estando presentemente a realizar o seu doutoramento em Física do Espaço na Universidade de Oxford, Reino Unido.

como por exemplo o recente anúncio de refrigeração laser para aplicações espaciais (New Scientist, 18 Janeiro 1997).

Bibliografia

JAMIESON, J. *et al* — *Infrared Physics and Engineering*, McGraw Hill, 1963.

MIKULIN, E. *et al* — *Low Temperature Expansion Pulse Tubes*, Adv. Cryog. Eng. **29**, 629-637 (1984).

RADEBAUGH, R. *et al* — *Comparison of 3 types of Pulse Tube Refrigerators: new methods for reaching 60 K*, Adv. Cryog. Eng. **31**, 779-789 (1986).

WALKER, G. — *Low Capacity Cryogenic Refrigeration*, Oxford Science Publications, 1994.

MESTRADO

FÍSICA PARA O ENSINO

Departamento de Física, Faculdade de Ciências do Porto

Pós-graduação dirigida aos professores que ensinam Física no Básico e Secundário. A *reintrodução de trabalho experimental* e o advento das *novas tecnologias*, são a razão de ser da forte componente laboratorial e da ênfase na familiarização com o computador.

A parte escolar ocupa 3 trimestres, de 10 semanas, com um horário pós-laboral de 8 horas semanais; à sua conclusão corresponde um diploma. O curso de Mestrado inclui ainda a elaboração duma dissertação, nos 6 a 12 meses seguintes.

Prazos

Candidaturas 06 - 24 Out. 98

Matriculas 16 - 28 Nov. 98

Numerus clausus: 16

+3 para candidatos de outros Países da CPLP

Programas

Tópicos Complementares de Física I + II

Temas de Física das Ondas, Óptica, Mecânica Quântica, Termodinâmica, Física dos Materiais (aulas teóricas e teórico-práticas)

Metodologia e Invest. no Ensino da Física

Metod. e técnicas de investigação-acção na sala de aula.

Física Laboratorial I e II

Experiências ilustrativas; trabalhos laboratoriais; projectos. (procurar-se-á atender à experiência pessoal e interesses dos mestrandos, tendo presente os equipamentos existentes nas escolas e no departamento).

O computador no Ensino da Física

Preparação básica para a utilização do computador no Ensino.

Seminários

Tópicos de: Ciências da Educação; divulgação da Ciência; temas actuais.

Acesso

- Licenciados em Física (ou Química), ramo educacional.
- Licenciados em Ensino de Física (ou Física e Química).
- Licenciados com estágio profissional como docentes de Física.
- Outros licenciados com curriculum que o Conselho Científico considere adequado.

Plano de Estudos

Trimestre 1 (4/1 - 13/3/99)

- Tópicos Complementares de Física I
 - Física Laboratorial I
- (5+3 horas semanais)

Trimestre 2 (26/4 - 3/7/99)

- O computador no Ensino da Física
 - Metodologia e Investigação do Ensino da Física
 - Seminários
- (4+3+1 horas semanais)

Trimestre 3 (27/9 - 4/12/99)

- Tópicos Complementares de Física II
 - Física Laboratorial II
- (5+3 horas semanais)

Informações/Contactos:

Departamento de Física
Faculdade de Ciências do Porto
Rua do Campo Alegre, 687
4150 Porto
Tel. (02) 6082703
Fax: (02) 6082679

FRANCISCO DE FARIA E ARAGÃO E A ELECTRICIDADE NO SÉC. XVIII

LUÍS MIGUEL BERNARDO

Centro de Ciências e Tecnologias Ópticas, Departamento de Física
Faculdade de Ciências, Universidade do Porto
Rua do Campo Alegre, 687, 4150 Porto, Portugal

A propósito e na sequência de uma análise do livro de Francisco de Faria e Aragão "*Breve Compendio ou Tratado sobre a Electricidade*" (1800) faz-se uma breve incursão no estado de desenvolvimento da Electricidade verificado em Portugal e no estrangeiro, no séc. XVIII. Apesar de alguma falta de actualização científica à data da sua publicação, o livro do Pe. Aragão, talvez o primeiro tratado de um autor português sobre a Electricidade, mostra que houve, nesse século, em Portugal bastante interesse pela nova ciência e pelas suas aplicações.

1. Introdução

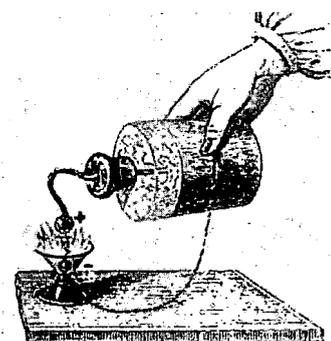
O estudo da Electricidade teve um grande desenvolvimento no séc. XVIII com a construção das máquinas de atrito (Von Guericke, 1672) e de indução (Le Roy, 1772) e com a caracterização dos efeitos da Electricidade Estática e a sua relação com fenómenos naturais já conhecidos, como os relâmpagos e raios. A descoberta da garrafa de Leiden por Von Kleist em 1745 e posteriormente aperfeiçoada por Bevis (1695-1771), a qual permitia armazenar as cargas eléctricas produzidas pelas máquinas, e, mais tarde, as pilhas metálicas de Volta (1800), geradoras de electricidade, abriram o caminho para o desenvolvimento da *Electricidade Dinâmica*. Começaram a ser estabelecidas as leis físicas quantitativas, que fundamentaram a construção das máquinas de corrente contínua e alternada, e a teoria electromagnética estabelecida por Maxwelll no fim do séc. XIX. O trabalho pioneiro dos homens do séc. XVIII foi fundamentalmente um trabalho exploratório, mas de uma grande importância para os progressos notáveis do século seguinte.

A Física Experimental despertou também no Portugal de setecentos um grande interesse de homens cuja cultura científica era, porém, limitada pela inexis-

tência de estudos de Física Experimental nas universidades e colégios portugueses. Só a partir da Reforma Pombalina (1772) é que essa disciplina começou a fazer parte dos *programas* dessas escolas. Os portugueses pioneiros no estudo da física experimental eram sobretudo eclesiásticos ou nobres que tinham tido a oportunidade de viajar ou de viver no estrangeiro e que, ao regressar, com eles traziam conhecimentos e máquinas. Um desses homens foi o jesuíta Francisco de Faria e Aragão, que, depois de regressar da Alemanha e quando já residia definitivamente em Portugal há 17 anos, publicou, em 1800, um tratado de formato nº4 com 127 páginas sobre a Electricidade, que intitulou "*Breve Compendio ou Tratado sobre a Electricidade*".

2. Dados biográficos e históricos

Os elementos biográficos do Pe. Francisco de Faria e Aragão são escassos e, em alguns aspectos, contraditórios. Nasceu na vila de Castelo de Ferreira de Aves em 1726 [1], falecendo em Lisboa em 1806. Entrou para a Companhia de Jesus e foi professor de Teologia no Colégio da Lapa em Lamego. Durante o período da perseguição aos jesuítas teria



Experiência com a garrafa de Leiden: inflamação do álcool (séc. XVIII)

Electricidade no séc. XVIII

Primeiras teorias sobre a electricidade

Primeiras aplicações da electricidade

Físicos portugueses do séc. XVIII

sido encarcerado e posteriormente embarcado para Itália, em consequência da ordem de expulsão dada pelo Marquês de Pombal em 1759. Aí teria recebido ordens sacras, passando depois à Alemanha. Dedicou-se então ao ensino particular e ao estudo das ciências naturais e exactas. Em 1783 regressa a Portugal trazendo consigo um conjunto de instrumentos que constituíam um pequeno Gabinete de Física. Criou um jardim botânico com plantas exóticas e mandou construir uma estrutura envidraçada, protegida com painéis, onde colocou enxames de abelhas. No *"Tratado Historico, e Fysico das Abelhas"* (1800) descreveu as técnicas de apicultura que praticara em Viena. Publicou ainda, um ano antes da sua morte, *"Horografia ou Gnomónica Portuguesa, a qual contém a teoria e juntamente a prática de fazer relógios solares pelos métodos mais fáceis para os curiosos desta matéria"* (1805).

Durante as suas estadias na Alemanha e em Viena, o Pe. Aragão teve contacto com as actividades que na sua época ocupavam muitos físicos europeus: o estudo da Electricidade que naquele tempo se resumia à Electrostatica. Contactou pessoalmente com alguns homens que contribuíram para a melhor compreensão dos fenómenos eléctricos dos quais ele próprio refere: o jesuíta Joseph Edler von Herbert (1725-1794) autor do livro *"Dissertatio de Igne..."* (1773) *"Professor publico de Fysica na Universidade de Vienna e meu particular amigo..."* e, *"o Barão Kiamair [Kienmayr] filho, companheiro meu muitas vezes neste trabalho..."* Estes homens faziam parte de um grupo numeroso de cientistas amadores e profissionais que se dedicavam a construir e a aperfeiçoar instrumentos de Electrostatica e a realizar experiências eléctricas, com as quais pretendiam descobrir a natureza da Electricidade e os seus efeitos.

Além do Pe. Aragão, outros portugueses se dedicaram, nessa mesma época, ao estudo e observação dos fenómenos eléctricos, como o confirma a existência de várias máquinas e instrumentos eléctricos em Gabinetes de Física Experimental. Além de Gabinetes particulares, outros foram sendo criados durante o séc. XVIII em Portugal: na Casa do Oratório de Lisboa (1752?), na Casa Real (1766), no Colégio dos Nobres (1768) (transferido em 1772 para a Universidade de Coimbra), no Real Colégio de Mafra (1790?) e na Academia de Ciências de Lisboa (1794) [2].

No entanto, quarenta anos antes do aparecimento do *Tratado* (nome abreviado do *Breve Compendio ou Tratado sobre a Electricidade* que utilizaremos doravante) e numa altura em que já era conhecida a teoria eléctrica de Franklin de 1759, o Pe. Teodoro de Almeida, um dos experimentalistas da Electricidade, na 1ª edição da sua *Recreação Filosófica* (tom. VI, 1762), antes portanto do seu exílio forçado de 1768 a 1778, refere-se desta forma à Electricidade (págs. 479-80):

"Não é tanta a utilidade, que tenho tirado desta applicação, no que sei, como no que conheso que não sei; que é muito mais sem comparação: por este motivo não vos tratei da Magnete, nem da Maquina Electrica, oje taõ celebre entre os

Filozofos: eu tenho uma e outra, e varios amigos se tem recreado com vosco em minha caza, vendo os seus admiraveis efeitos; mas eu não tenho genio de enganar. Disto (quanto a mim) não se sabe nada; conhecem-se certas leis ou regras que observão os seus efeitos; mas a quereremos dar a razão deles, topa logo o juizo com dificuldades insuperaveis. Eu considero estas maquinas como um tormento dos entendimentos, quando outros as olhaõ como divertimento dos sentidos."

Depreende-se destas palavras de Teodoro de Almeida que, pelo menos nos anos 60 do séc. XVIII, os efeitos produzidos pelas máquinas eléctricas serviam mais a actividade lúdica do que o esclarecimento intelectual!... O texto acima transcrito aparece ainda na 5ª edição da *"Recreação Filosófica"* de 1799, com a diferença de que em vez de *"não se sabe nada"* escreve *"pouco se sabe"*. Apesar de toda esta confessada ignorância, neste mesmo ano de 1799 publica no vol. III das suas *"Cartas Fysico-Mathematicas"* (1784-1799), um longo texto de 87 páginas sobre a Electricidade! Justifica aí o atraso da publicação, nestes termos:

" Não sei, amigo Eugenio, se vós estareis algum tanto admirado, e queixoso de eu ter omitido esta famosa materia [a Electricidade] nas instruções que vos tenho dado: duas razões me fizeram guardar até agora este silencio: a primeira foi, que no principio esta materia era para mim nova, e não a tinha tratado com experiencias proprias; e por outra parte os efeitos erão tão caprichosos, e extravagantes, que era imprudente então dar doutrina que merecesse attenção. Ora depois que me vi em termos de dar lições nesta materia com experiencias feitas pela minha mão, que já passarão dezanove anos, occurerão taes embarços, que me não foi possivel escrever-vos devagar nesta materia, da qual como curioso já tereis bastante noticia; e agora a quereis saber como Fysico."

Teodoro de Almeida teria iniciado, nas suas próprias palavras, as experiências com a Electricidade em 1780. De facto, quando é obrigado a refugiar-se em Baiona, devido às perseguições que lhe manda mover o Marquês de Pombal, Teodoro de Almeida dedica-se ao estudo da Electricidade, chegando mesmo a utilizá-la na cura de vários doentes, conforme relata no referido 3.º vol. das *"Cartas Fysico-Mathematicas"*.

Nos anos posteriores à 1.ª edição da *"Recreação Filosófica"* de 1762, é provável que o estudo científico da Electricidade não tivesse tido um ambiente muito propício em Portugal. De facto, uma tentativa para o ensino, no Colégio dos Nobres, da novíssima disciplina de Física Experimental, onde a Electricidade se integrava, falhou e só na Reforma Pombalina de 1772 é que a Electricidade passou a fazer parte do programa da Física Experimental do 3.º ano do Curso Filosófico da Universidade. O número de alunos que escolhiam voluntariamente este curso era porém muito reduzido. De 1772 a 1777 tinham sido apenas quatro!... Os outros que a frequentavam obrigatoriamente eram de outras Faculdades tendo compreensivelmente pouco interesse por esta matéria [3]. No entanto a actividade educativa nos Colégios equipados com Gabinetes de Física Experimental foi-se tornando mais importante. Nesses Colégios, a juventude começava já a familiarizar-se com os efeitos eléctricos e as máqui-

nas que os produziam. Na última década do séc. XVIII, Teodoro de Almeida utilizava o Gabinete da sua Congregação do Oratório, onde podiam ser realizadas experiências eléctricas, para apoio das suas lições de Física Experimental.

Vários estrangeiros estiveram também em Portugal ensinando e fazendo demonstrações públicas de Física Experimental, e construindo os respectivos instrumentos. Contam-se entre eles: Guilherme Dugood (de 1750 a 1767), Pineti (1791) e Joan Joseph Solner (de 1774 a 1794?) [3].

Toda esta actividade justificaria a publicação de um livro sobre a Electricidade, para informação do público e satisfação dos curiosos. Após a sua leitura poderiam mais facilmente entender os fundamentos, fenómenos, equipamentos e aplicações desta nova e promissora ciência. A esta necessidade respondeu o Pe. Aragão com o seu livro "*Breve Compendio ou Tratado sobre a Electricidade*" (1800).

3. Objectivos e estrutura do Tratado

No *Tratado*, o Pe. Francisco de Faria e Aragão pretende, segundo afirma, dar apenas a conhecer o novo ramo da Física, dando-lhe a forma de uma obra de divulgação. Nas primeiras páginas, na "*Advertencia ao Publico*", o autor escreve o seguinte:

"Aqui offereço aos curiosos este compendio de huma Sciencia, a qual, além de estar hoje em moda, he em si mesmo summamente delectavel para a vista, maravilhosa nos seus phenomenos, e o que não deve ser-nos menos interessante, não inutil para a saude. [...] O meu intento neste Tratado não foi outro, que o dar ao meu Leitor hum justo conhecimento nesta parte Fysica, e polo com isso em estado de por si mesmo julgar os effeitos do fluido electrico, ou ao menos entender, o que se diz, quando se falla delle; parece-me que o fiz sem prolixidade, repetindo, e detendo-me sómente no que era mais preciso para fixar na mente do Leitor as idéas necessarias a perceberello.

Não é portanto sua intenção principal divulgar a sua contribuição pessoal, embora ao longo do texto se refira, de quando em vez, às suas teorias ou às suas inovações tecnológicas mais baratas ou mais eficazes. O *Tratado* é uma obra de divulgação, que terá tido alguma utilidade para os "*curiosos*", mas que, como veremos, já estava, na altura da sua publicação, um pouco desactualizada.

O *Tratado* está dividido em *Artigos*:

Artigo I: Da Electricidade em geral, e das maquinas que nella se usão; Artigo II: Descrição das maquinas em particular; Artigo III: Outros instrumentos usados nas experiencias Electricas; Artigo IV: Experiencias ordinarias que se fazem na maquina Electrica, e Conclusões, que dellas resultão ácerca da Electricidade (16 Experiências); Artigo V: Continua-se a examinar a natureza do fluido Electrico (12 Experiências); Artigo VI: Atmosfera Electrica, e seus effeitos (10 Experiências); Artigo VII: Experiencias mais curiosas que se costumão fazer (4 Experiências); Artigo VIII: Do Electroforo, e outros modos de excitar a Electricidade; Artigo IX: Electricidade da Atmosphaera, grandes conductores, ou guarda-raios (4 Experiências); Artigo X: Effeitos da Electricidade no corpo humano (4 Experiências).

No fim da descrição de algumas experiências o Pe. Aragão introduz algumas *Conclusões*, *Appendices* ou *Notas*, explicativas dos resultados obtidos.

4. Discussão das teorias sobre a Electricidade

Como aliás afirma na já referida "*Advertencia ao Publico*", Francisco de Faria e Aragão não tem a preocupação de fazer uma revisão histórica geral da Electricidade, porque a acha desnecessária para a compreensão dos assuntos que se propõe tratar. Não deixa

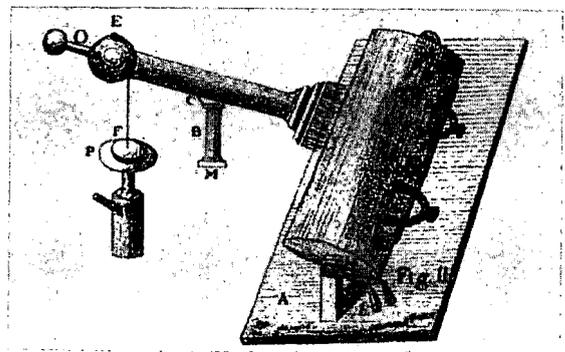


Fig. 1 — Gravura do *Tratado* onde se representa uma máquina eléctrica cilíndrica

no entanto de referir as teorias que circulavam no seu tempo sobre a natureza da electricidade, algumas das quais vinham do princípio do século. Aceitava-se "*ser fluido Electrico hum fluido elastico, cujas partes mutuamente repellindo-se entre si, são porém atrahidas dos mais corpos, aonde se acha*". Escreve ele na pág. 46 o seguinte:

"Varias tem sido as opiniões dos Fysicos á cerca desta diversidade; o celebre Nollet contente com hum só fluido Electrico lhe dava duas direcções contrarias: suppunha que com o atrito da maquina [de indução] huns poros se apertavão, espremendo, e fazendo sahir o fluido, que no corpo da maquina se achava; outros poros se alargavão, e o fluido nelles se recolhia, o encontro pois destes dous movimentos devia produzir vortices, que erão então moda em França, estes vortices lhe serviam a Nollet para explicar a atracção, e repulsão dos corpos leves, e mesmo hum novo atrito da mesma materia Electrica, com a qual se accendesse chamma, fizesse luz, etc. e obrasse em fim tudo o mais, que preciso fosse a completar o seu systema. Outros a quem estes vortices, aindaque Francezes, já dezagradavão por velhos, se resolverão com Mr Fay, a admitir dois fluidos Electricos diversos por natureza, vitreo hum, e rezinoso outro; quando estes obravão nos corpos, que carecião de Electricidade fazião effeitos grandes, mas maiores os fazião quando obravão entre si; e finalmente era nenhum o effeito se obravão sobre corpo homogeneo, o qual tivesse tambem Electricidade. Symerio outro Fylosofo, não lhe parecendo bastantes nem as duas torrentes de Nollet, nem os dois fluidos de Fay, ajuntava tudo, admittia hum fluido atrahente, e outro que repellisse; hum acumulava-se no corpo Electrico com o atrito, outro com o mesmo atrito fugia, e se escapava; quando era

necessario hum pelejava com o outro, e se accendião; outras vezes ambos juntos fazião pazes e não mostrvão effeitos, nem entre si, nem com os demais corpos."

Estas teorias apresentadas por Aragão eram de facto teorias alternativas à teoria que Franklin propôs cerca de 1750 e que veio a provar-se ser a teoria correcta para explicar os fenómenos eléctricos. A teoria de Franklin sobre a natureza da Electricidade não recebeu, na altura em que foi proposta, o consenso dos seus contemporâneos. No entanto, no fim do século XVIII, conforme escreve Teodoro de Almeida, a "*doutrina de Franklin era moda*" e Aragão defendia-a com entusiasmo. Entre os opositores contavam-se o próprio Teodoro de Almeida, mais inclinado para as teorias de Nollet.

Robert Symmer (1707-1763) foi o proponente da teoria dos dois fluidos em 1759 (*Phil. Trans.*, vol. LI, p.340), sendo desenvolvida também por Torbern Olaf Bergman (1735-1784) em 1765. Particularmente, o Pe. Jean Antoine, mais conhecido como Abade Nollet (1700-1770) foi um severo crítico da teoria de Franklin [4] para a qual, como se lê no texto de Aragão, tinha uma teoria alter-

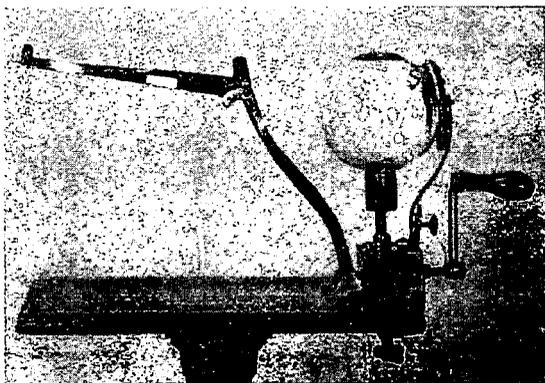


Fig. 2 — Máquina eléctrica de Nairne [7].

nativa. A teoria proposta por Franklin, e que Aragão descreve, considera a electricidade como um único fluido que, quando presente, corresponde a um tipo de electricidade, a que ele chama *positiva* (ao contrário da convenção actual), e que, quando está ausente, origina electricidade *negativa*. Aragão baseia as explicações dos fenómenos que observa na teoria que Franklin propôs em 1750 e que foi sendo aperfeiçoada e aplicada à explicação dos vários efeitos que iam sendo descobertos. Sobre esta teoria, escreveu o seguinte (pág. 55):

"Este systema da Electricidade attribuido ao Doutor Francklin Fylosofo Americano, depois do que temos dito, não deve parecer pura hypothese: tudo aqui he claro, tudo analogo ao mais que passa na natureza"

Os mecanismos pelos quais se gerava e separava o fluido eléctrico por "*esfregação*" não eram conhecidos no tempo de Aragão. Na sequência do texto anterior, escreve o seguinte sobre este assunto:

"Mas como o atrito excite a electricidade, não he tão facil de explicar? Como o fluido que he natural a hum corpo sahia delle, e quazi se arranque para se hir juntar ao que ao outro corpo já tem? As experiencias referidas mostrão bem fazer-se isto por esfregação, e atrito, mas o como, ou por qual mecanismo isso succeda? Como o mesmo atrito faça nos dois corpos esfregados estes contrarios effeitos, de sorte que de huma sahia, e no outro entre esta Electrica materia? Isto he o que até o dia de hoje se procura."

Faz em seguida um resumo das explicações para este fenómeno, da autoria de dois homens famosos do seu tempo, o já referido Abade Nollet (1700-1770) e Pe. Giovanni Beccaria (1716-1781):

"Nollet pretendia que o mesmo atrito abrisse, e fechasse poros, mas isso era suppôr o que lhe convinha; o famoso P. Becharia tão celebre pelas suas Experiencias nesta materia contentou-se com dizer que a parte da maquina esfregada se fazia com o atrito do coxim mais capaz de receber em si a Electricidade delle; mas isto não se explica a dificuldade: a explicação que eu darei não só me parece ser provavel, mas já de alguma sorte provada.

O papel do atrito, segundo Aragão, era fazer diminuir essa atracção e libertar o fluido, que se deslocaria para regiões onde essa adesão fosse maior. Só no fim do século XIX com o estabelecimento da teoria electrónica da Electricidade é que o mecanismo de produção de cargas eléctricas por "*esfregação*" ficou devidamente explicado!...

Sobre a velocidade do fluido eléctrico escreve o seguinte (pág. 84):

"A velocidade da matéria Electrica he incrível; e ainda que, como é bem certo, ella se mova com successivo movimeto, pois que vemos distintamente a parte, donde o raio se despega, e a parte aonde acaba, ou se occulta [...] com tudo devemos confessar que he tanta a sua velocidade, e pressa, que apenas se pôde notar em grandes distancias, e nas menores parece ser instantanea"

Refere-se também ao efeito da Electricidade sobre o Magnetismo nos seguintes termos (pág. 85):

"Ainda que a Electricidade fraca não mostra ter influencia alguma sobre o magnetismo; com tudo huma bem forte electricidade tem já destruido a virtude magnetica, mudado os polos, e mesmo dado esta virtude á corpos, que a não tinham dantes: não he pois maravilha que isto fação tambem os raios, nos quaes sempre a Electricidade he fortissima, como adiante veremos."

A interacção electromagnética é aqui referida sob uma forma muito limitada: a alteração do magnetismo de um magnete, pela Electricidade. Ainda estávamos longe das experiências de indução electromagnética que viriam a ser realizadas no século XIX e das teorias e novas realizações práticas subsequentes, da responsabilidade de homens como Hans Christian Oersted (1777-1851), André-Marie Ampère (1775-1836), Siméon-Denis Poisson (1781-1840), Michael Faraday (1791-1867), Joseph Henry (1797-1878), Wilhelm Weber (1804-1891), Lord Kelvin (1824-1901) e outros.

5. Descrição das máquinas e dos instrumentos eléctricos

As máquinas eléctricas dedica Aragão o *Artigo II* de 10 páginas. Começa com a descrição da máquina de Hausen (1743) de globo, "por ser a primeira máquina". Refere-se às máquinas em que o globo é substituído por um cilindro, assim como à substituição da mão pelo "coxim, ou almofadinha" com couro e "Amalgama", para fazer atrito sobre a superfície do globo ou do cilindro de vidro. Descreve a "Amalgama" como uma "liga de azougue com outro metal qualque". No *Artigo III*, refere-se à "máquina inventada por Ingenhaus Medico Inglez" e independentemente inventada por Ramsden em 1766, da qual apresenta uma gravura, afirmando "...hoje em lugar de globo, ou cylindro usão muitos da maquina [de Ingenhaus]". Refere mais tarde que "o insigne Experimentador Ingen-Housz tinha uma destas maquinas composta de duas rodas de vidro". Suponho que Aragão, embora utilize diferentes grafias e adjectivações, se refere nos dois casos ao mesmo personagem, Jan Ingenhousz (1730-1799) nascido na Holanda e radicado em Londres!...

Depois das máquinas de Otto von Guericke (1660) e de Hauksbee (1706), muitos melhoramentos foram introduzidas nas máquinas electrostáticas. Quando significativos, tais máquinas adoptaram o nome dos seus autores: Hausen (1743), Bose (1744), Winkler (1744, 1745), Gordon (1745), Watson, Wilson, Read, Winter, Wimshurst, Ramsden (1766), Priestley, Le Roy (1771), Nairne (1772), Marum (1776), Cuthbertson (1785) e outros.

Ao referir-se às Garrafas de Leiden e aos cuidados a ter para se não quebrarem e maneiras de as concertar refere o seguinte:

"Nas garrafas de vidro não deixa de ter remedio a quebra-dura, e eu acho ser muito preciso o sabello nestas miseraveis terras, aonde se não podem logo comprar outras, sem as fazer vir de longe."

À "*Alampada Electrica*" dedica Aragão 4 páginas, referindo-se a ela nos seguintes termos: "... a celebre Alampada Electrica, famosa máquina, que já vi vender-se em Praga por 6 moedas, sendo que as minhas chamadas pelo Barão Kiemair as *infalliveis*, não me custarão mais que huma."

Segundo a descrição de Aragão, consistia esta lâmpada de uma garrafa em que uma solução de ácido sulfúrico ("*vitriolo*"), onde era mergulhada limalha de ferro ou zinco, produzia hidrogénio a que o autor chama "*ar inflammavel produzido pela porção do flogisto do ferro, solto naquella dissolução violenta, que obra o dito acido vitriolico...*". O hidrogénio à saída de um tubo era incendiado por uma fásca produzida por um "*electroforo*". Esta "*alampada electrica*" (percursora dos actuais isqueiros!...) produzia assim uma chama que permitia acender velas ou pavios!...

6. Os Meteoros

Quando se começaram a observar os efeitos das descargas eléctricas acompanhados de fâscas e ruído,

reconheceram-se nestes, de imediato, semelhanças com o relâmpago e o trovão. A atribuição de causas eléctricas a outros "*meteoros*" (fenómenos atmosféricos) popularizou-se em todo o séc. XVIII. O Pe. Aragão refere-se ao assunto nos seguintes termos (p.101):

"A elle [o fluido Electrico] atribuem hoje não só as fulgurações nocturnas, e vespertinas, as auroras boreaes, os fogos fatuos, as nuvens brancas de noute, as Trombas marinas, os furacões, os Terramotos, mas até os mesmos ventos, e se os Tuffoens, e como costuma acontecer em tudo, veio o tempo, e a moda que a Electricidade fosse para os Fysicos hum armazem commum para explicar por ella tudo o que succede na natureza."



Fig. 3 — Experiência para demonstrar a condutividade eléctrica do corpo humano.

Exprime a sua própria opinião sobre a origem física de alguns meteoros:

"Quanto ás estrellas cadentes, e fogos fatuos, he bem provavel, que ellas sejam o effeito do ar inflammavel aceso, ou de combinações fosforicas, que no ar se ajuntão. Que a Aurora Boreal seja hum puro effeito da reflexão seja preciso condensar-se mais o ar em tanta altura he bem claro, e que isso succeda por meio dos abundantes vapores, que as fermentações fosseis da terra ali mandão, provão-no os movimentos da agulha magnetica nesses dias; se porém com tudo concorra também a Electricidade não he tão claro, aindaque não he impossivel."

Sobre a origem eléctrica dos relâmpagos e trovões, Aragão, seguidor das ideias de Franklin, não tem quaisquer dúvidas.

A relação entre a aurora e a electricidade foi reconhecida por muitos cientistas a partir de meados do séc. XVIII: Benjamin Franklin (1749), William Watson (1752), John Canton (1753). As perturbações causadas na agulha magnética terão sido observadas pela primeira vez em 1741 por Olav Peter Hjorter (1696-1750) [4].

7. Aplicações da Electricidade na Medicina

Sobre as aplicações da electricidade em Medicina Aragão era cuidadoso. Manifestava-se contra os "*impos-*

tores" que (pág. 117): "cuidavão, ou fingião, que tirando o doente as syntillas dos vidros, que continhão os remédios, a virtude destes ultimos se communicava aos doentes por meio da Electricidade", "...neste caso tenho por certo que as Damas mais delicadas tomarião sem nojo a quina, e os purgantes..."

Acreditava no entanto nos beneficios do tratamento eléctrico, pois afirmava: "a Electricidade favorece as secreções da natureza, augmenta a circulação dos humores, e deve impedir não sómente, mas desfazer as obstruções, e ajudar admiravelmente as evacuações necessarias para o bem da saude".

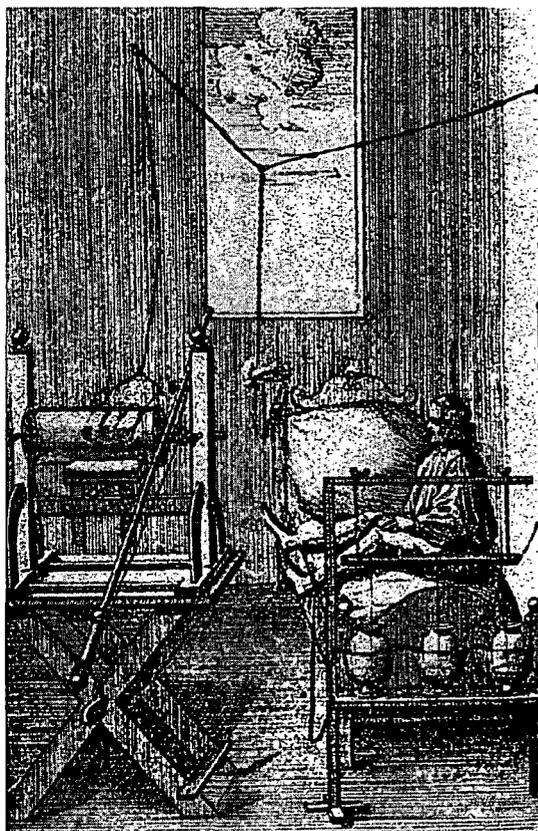


Fig. 4 — Primeiras aplicações da Electricidade em Medicina: tentativa de cura de paralíticos com choques eléctricos.

Achava também que tais tratamentos poderiam ser prejudiciais: "... he bem verdade porém, que quando os vasos, ou canaes obstruidos forem muito delicados, e as comoções, ou golpes Electricos muito fortes, estes poderiam laceralos, e em vez de sómente dezembrasar, poderiam destruir a sua textura, e organização."

Por isso, segundo a opinião de Aragão, as aplicações eléctricas nos pacientes deveriam ser progressivas nas doses, variáveis de pessoa para pessoa, evitando sempre os choques ("comoções" ou "golpes") dolorosos. Com estes cuidados, não fazia mal nenhum tentar a sua aplicação (pág. 125):

"Do resto tratando-se da saude humana he bem que se fação todas as tentativas para a conseguir: dando-nos Deos mais este meio tão facil em hum seculo, no qual a malicia

humana tem inventado tantos outros para a destruir: devemos porém usar d'elle com prudencia, e circunspeção, para que nunca seja de damno, o que Deos nos concedeo para proveito."

Sobre a possibilidade de os dois tipos de electricidade causarem diferentes efeitos nos pacientes, escrevia o seguinte (pág. 126):

"Se a Electricidade positiva e negativa tenham diversas virtudes, assim como são diversas em si mesmas, ainda se não fixou: as Experiencias até agora parece que não achão differença alguma; mas considerando eu a sua natureza, muito me inclinaria a que a devem ter..."

As aplicações médicas da Electricidade tornaram-se muito populares em toda a Europa e também em Portugal durante o séc. XVIII. Os mais prestigiados cientistas que estudavam a Electricidade, como o Abade Nollet, Benjamin Franklin e Louis Jallabert, realizaram com as suas próprias mãos terapias eléctricas. Só o último parece ter tido um caso de afamado sucesso [5]. Muitos charlatães, censurados por Aragão, as realizaram por essa Europa fora.

Em Portugal houve homens que também tentaram utilizar a electricidade como meio terapêutico. Segundo Vasquez y Morales, autor da tradução de uma das obras de Nollet, "*Ensayo sobre la Electricidade de los Corpos*" (1747), o "celebre" médico português João Mendes Saccheti Barbosa (1714-1779?), membro da Academia Real de Londres e da Real Academia Médica de Madrid, realizou com sucesso experiências terapêuticas eléctricas, em Elvas. Como já referimos, Teodoro de Almeida realizou-as também durante o seu exílio, em Baiona. Além de demonstrações de Física, Solner, que possuía um *Gabinete* em Lisboa, fazia tratamentos médicos com descargas electrostáticas aplicadas a doentes de "gota, paralisia, estupor, surdez e achaques de olhos" [2]. Também em Lisboa, um professor de Electricidade Médica, João Jaques Bas, fazia no fim do séc. XVIII curativos eléctricos [5].

8. Enquadramento do Tratado na sua época

Foi grande o número de livros sobre a Electricidade publicados na Europa durante o séc. XVIII [6]. Se, como tudo indica, o *Tratado* do Pe. Aragão foi de facto o primeiro livro português dedicado exclusivamente à Electricidade, teremos que concluir que, no que diz respeito a publicações sobre a Electricidade, os *filósofos naturais* portugueses eram muito menos prolíficos do que os seus colegas que trabalhavam nos países cientificamente mais desenvolvidos da Europa.

Tanto quanto é possível deduzir-se do que escreve no *Tratado*, o Pe. Aragão, enquanto permaneceu no estrangeiro, até 1783, estava bastante bem informado sobre as novidades científicas e tecnológicas referentes à Electricidade. Na altura em que é publicado o *Tratado*, é patente alguma desactualização. As teorias e equipamentos desenvolvidos nas últimas duas décadas do séc. XVIII [7] não são aí discutidas nem sequer referenciadas.

9. Conclusão

Foi feita uma breve incursão na história da Electricidade do século XVIII através de um livro publicado em Lisboa pelo Pe. Francisco de Faria e Aragão, intitulado "*Breve Compendio ou Tratado sobre Electricidade*" (1800). Embora não esteja entre os filósofos ou cientistas portugueses mais conhecidos desse século, o Pe. Aragão, pelo menos enquanto residiu no estrangeiro, dedicou-se com espírito científico ao estudo da Electricidade. Da leitura deste Tratado concluímos, porém, que as contribuições de Aragão para o desenvolvimento da nova e popular ciência, ter-se-ia limitado a um ou outro melhoramento tecnológico das máquinas e instrumentos eléctricos. Este livro de divulgação do Pe. Aragão é comparável aos livros que o seu contemporâneo Diogo de Carvalho e Sampaio (1750-1807) escreveu sobre a cor [8, 9], mas é, cientificamente, mais moderno e evoluído.

Referências:

- [1] A Grande Enciclopédia Portuguesa Brasileira com base no Dicionário Bibliográfico Português – Estudos de Innocencio Francisco da Silva (vol. IX, p.287) indica 1726 como o ano de nascimento; A Enciclopédia Luso-Brasileira de Cultura (Verbo) (vol. 2, pp.928-929) com base em referências aí citadas, indica a data de nascimento como sendo 25.10.1732.
- [2] CARVALHO, Rómulo de — *A Física Experimental em Portugal no séc. XVIII*, Biblioteca Breve, Instituto de Cultura e Língua Portuguesa, 1982.
- [3] CARVALHO, Rómulo de — *A Física na Reforma Pombalina, História e Desenvolvimento da Ciência em Portugal*, 1 vol, Lisboa, 1986.
- [4] WOLF, A. — *A History of Science, Technology and Philosophy in the 18th Century*, Harper Torchbooks, The Science Library, Harper & Brothers, New York, 1961.
- [5] CARVALHO, Rómulo de — *A História da Electricidade Estática*, Atlântica Editora, Coimbra, 1973.
- [6] Vários tratados sobre a electricidade e suas aplicações, alguns dos quais com várias edições e traduções, apareceram publicados na Europa durante o séc. XVIII: G. M. Bose (1738, 1743, 1744, 1745, 1746), W. Watson (1745), J. B. Seconda (1746, 1748), Nollet (1747, 1749 (1754), 1953), Winckler (1748), Jallabert (1748), G. B. Beccaria (1753, 1769, 1772, 1775), Aepinus (1759), Wesley (1760), Priestley (1769), J. Ferguson (1770), T. Cavallo (1777, 1795), J. Lyon (1780), C. Stanhope (Lord Mahon) (1779), Sigaud-de-la Fond (1781, 1803), J. P. Marat (1782), Bertholon (1787) e A. P. Troastseyz (1788).
- [7] *O Engenho e a Arte*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1997.
- [8] LENCASTRE, Marina; ALCÂNTARA, Fernanda — *Diogo de Carvalho e Sampaio, um teórico experimentador da cor no século XVIII*, Revista Museu, IV série, n.º 2, pp. 55-61 (1994).
- [9] BERNARDO, L. M. — *Notas Históricas sobre o desenvolvimento e ensino da óptica em Portugal até final do século XIX*, Gazeta de Física, vol. 19, Fasc. 3, pp. 11-17 (1996).

Luís Miguel Bernardo é Professor Associado do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e investigador no Centro de Ciências e Tecnologias Ópticas (CETO). Interessa-se pela História das Ciências.

Homenagem nacional ao Professor José Pinto Peixoto

Um grupo de amigos, colaboradores e discípulos está a organizar as Comemorações Nacionais em Homenagem ao Professor Doutor José Pinto Peixoto, a decorrerem por ocasião do aniversário do seu nascimento, a 9 de Novembro.

Entre um conjunto de acções que têm vindo a ser planeadas, conta-se o *Symposium "Professor Doutor José Pinto Peixoto"*, a ter lugar em Lisboa, num grande auditório (a anunciar oportunamente, com o programa detalhado das Comemorações).

Para participar nesse *Symposium* conta-se com a presença de eminentes cientistas:

– Prof. Barry Saltzman, que proferirá uma palestra subordinada ao tema "*Toward a Dynamical Theory of Climate*"

– Dr. Robert White que desenvolverá o tema "*The Politics of Climate Change*"

– Dr. David Salstein (tema a anunciar)

– Dr. Abraham H. Oort, que apresentará uma palestra subordinada ao tema "*A New Understanding of the Earth's Climate System – José Pinto Peixoto's Legacy*"

– Dr. Pedro S. Viterbo, que versará o tema "*The Impact of Land Surface on the Climate System*"

– Dr. Richard D. Rosen (tema a anunciar).

A "Comissão para as Comemorações Nacionais em Homenagem ao Prof. Doutor José Pinto Peixoto" está também a desenvolver esforços no sentido de conseguir que seja erigido um Monumento em Lisboa (eventualmente junto à Academia das Ciências de Lisboa) que homenageie um dos cientistas portugueses mais eminentes deste século. Nesse sentido dirigiu-se já aos Físicos Portugueses (sócios da Sociedade Portuguesa de Física) solicitando o seu contributo financeiro, em reconhecimento do legado por ele deixado à Física em Portugal.

"A Comissão para as Comemorações Nacionais em Homenagem ao Professor José Pinto Peixoto", presidida pelo Prof. Doutor Fernando Carvalho Rodrigues, divulgará em breve o programa detalhado das Comemorações e agradece a todos aqueles que se quiserem associar a esta Homenagem.

A Comissão agradece também a colaboração que tem vindo a ser prestada pela Sociedade Portuguesa de Física.

Pela Comissão para as Comemorações Nacionais em Homenagem ao Prof. José Pinto Peixoto,

Maria Solange Mendonça Leite
Professora Associada com Agregação

EDUCAÇÃO EM FÍSICA

“Educação em Física” é uma nova secção da Gazeta de Física, criada em colaboração com a Divisão de Educação (DTE), sendo coordenada por Adriano Sampaio e Sousa. O contacto poderá ser feito para: Dr. Adriano Sampaio e Sousa, Delegação Regional Norte da Sociedade Portuguesa de Física, Departamento de Física, Rua do Campo Alegre, 687 — 4150 Porto — Tel. 02-6082729.

2.º Fórum Ciência Viva



Realizou-se nos dias 5 e 6 de Junho, no Forum Picoas, em Lisboa, o 2º Fórum Ciência Viva. O Senhor Ministro da Ciência e da Tecnologia, Prof. Mariano Gago, deu as boas vindas aos participantes; intervieram em seguida o Senhor Ministro da Educação e o Senhor Presidente da República, que presidiu à sessão de abertura.

Na sua intervenção, o Ministro da Educação, Prof. Marçal Grilo, anunciou que o ensino experimental pas-

sará a ser obrigatório, em todos os níveis de ensino, a partir do ano lectivo de 1999/2000.

O programa incluiu um debate sobre “O Ensino Experimental das Ciências nas Escolas”, uma conferência pela Prof.^a Joan Solomon (Open University, Faculty of Science) sobre “Avaliação do Trabalho Experimental dos Alunos no Ensino das Ciências”, e dois painéis com diversos especialistas.

A parte mais motivadora terá sido, contudo, a visita aos Posters e Quiosques.

De realçar o extraordinário aumento de participação relativamente ao Ciência Viva I, bem como a manifesta melhoria de qualidade na apresentação dos projectos.

Estes cobriram um vasto leque de actividades científicas, com algum destaque para a Física, representada em cerca de 130 projectos.

A Sociedade Portuguesa de Física promoveu e apresentou três projectos:

- Física em Acção 1998

Este projecto, de âmbito nacional, que já contemplava 10 escolas, foi alargado a mais 9. Tem como objec-

tivo principal estimular o ensino experimental da Física nas escolas secundárias, com base em novas tecnologias, nomeadamente o uso de sensores e interfaces para aquisição de dados laboratoriais.



Ministro da Ciência e Tecnologia motivado...

- **Óptica Experimental - uma introdução motivadora ao estudo da Física**

Abrangendo 10 escolas secundárias com 3º ciclo, este projecto pretende aproveitar o potencial de motivação do estudo experimental da Óptica. Foram distribuídos 4 conjuntos didácticos completos a cada escola, de modo a permitir que o trabalho seja realizado pelos próprios alunos, em pequenos grupos.

- **Ciência a Brincar**

Destina-se a crianças dos 4 aos 8 anos, pretendendo despertar o espírito de observação e a curiosidade pela Ciência, estando envolvidas cerca de 20 escolas primárias

e pré-primárias. Para tal, foi preparado um "kit" com material didáctico para 10 experiências, a distribuir pelas escolas.

O Fórum decorreu em ambiente de grande entusiasmo, traduzindo o magnífico trabalho de centenas de professores e milhares de alunos em mais de 1500 estabelecimentos dos ensinos básico e secundário, bem como a participação de um conjunto alargado de entidades, como associações e sociedades científicas, instituições dos ensinos superior e politécnico, centros de investigação, laboratórios do estado, clubes de Ciência, autarquias e empresas.

Estão de parabéns todos estes "militantes do Ciência Viva", nas palavras do Senhor Presidente da República.

O Programa Ciência Viva tem representado um importante esforço para a melhoria da educação científica nas escolas portuguesas, designadamente através do reforço do ensino experimental. É necessário, contudo, que este esforço seja alargado a todas as escolas, de modo a criar as condições necessárias para que a importante medida anunciada pelo Senhor Ministro da Educação possa ser implementada com o sucesso que todos desejamos.



Sessão de encerramento

O Ciência Viva vai continuar, com o mesmo lema: "Mais Ciência, Mais Viva !"

OLIMPIADAS DE FÍSICA

OLIMPIADAS REGIONAIS E NACIONAIS

Decorreram no passado dia 9 de Maio, nos Departamentos de Física das Universidades de Lisboa, do Porto e de Coimbra, as provas da fase regional das Olimpíadas de Física 1997/98. Notícia desenvolvida destas Olimpíadas será publicada no próximo número da Gazeta de Física bem como os enunciados das provas.

OLIMPIADAS INTERNACIONAIS

Decorreu em Coimbra no passado dia 22 de Maio a prova de apuramento para as Olimpíadas Internacionais de Física (ver enunciado das provas noutra local), que tem lugar em Requejavique de 2 a 10 de Julho. Estiveram presentes os alunos pré-seleccionados acompanhados dos respectivos professores.

Ficaram apurados:

1. António Miguel Simões, da Escola Sec. Avelar Brotero, Coimbra
2. Bruno Flávio Soares, da Escola Sec. Camilo Castelo Branco, V. N. Famalicão
3. Gonçalo Parente Mendes, da Escola Sec. Prof. Herculano de Carvalho, Lisboa
4. Marta Isabel Garrido, da Escola Sec. Prof. Herculano de Carvalho, Lisboa
5. José Carlos Barreto, da Escola Sec. José Falcão, Coimbra.



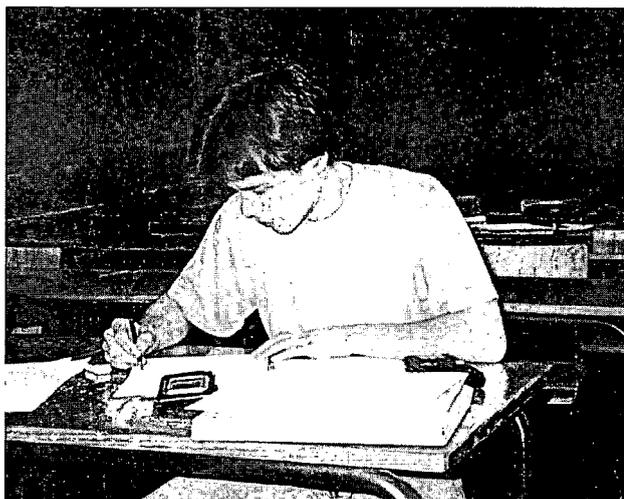
A Marta medindo temperaturas e diferenças de potencial na prova experimental I.



Miguel e José Carlos trabalhando na prova experimental II.

Para a correcção das provas a Comissão Nacional das Olimpíadas de Física contou com a colaboração, que se agradece, do Prof. Dr. Décio Martins. Na tarde do dia 22, e enquanto decorriam as provas, os professores-orientadores (Dra. Maria Celeste Marques Santos e Dra. Maria Regina Santos, da Esc. Sec. Prof. Herculano de Carvalho, de Lisboa; Dr. António Ramiro Couto Ferreira, da Esc. Sec. Dr. Manuel Fernandes, Abrantes; Dra. Maria Eugénia de Carvalho Campos Costa, da Esc. Sec. Camilo Castelo Branco, Vila Nova de Famalicão; Dr. Mário Malcata da Esc. Sec. José Falcão; Dra. Marília Telo da Esc. Sec. Francisco Franco, Funchal; Dra. Maria Margarida Costa, da Esc. Sec. Avelar Brotero) tiveram uma reunião de trabalho com os "team-leaders" para discussão e avaliação do trabalho realizado ao longo do ano

A Secção "Olimpíadas de Física" é coordenada por Manuel Fiolhais e José António Paixão. O contacto com os coordenadores poderá ser feito para: Departamento de Física, Universidade de Coimbra, 3000 Coimbra; ou pelo telefone 039-410615, fax 039-29158 ou e-mail tmanuel@hydra.ci.uc.pt.



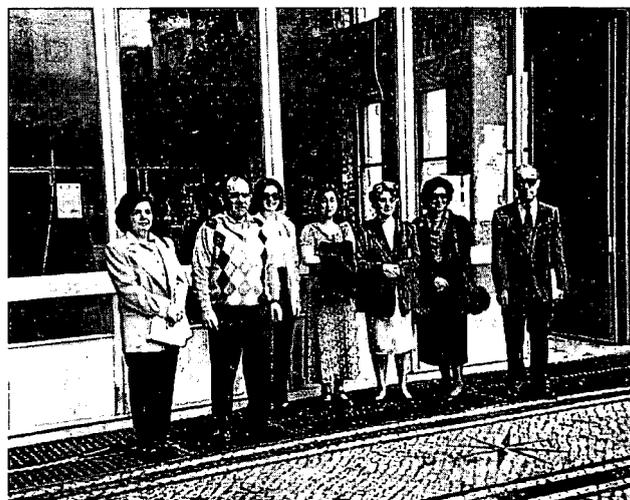
Gonçalo durante a prova teórica.

lectivo, numa perspectiva da sua melhoria em anos futuros. Assistiram depois à Conferência "Questões questionáveis (Memórias de um Físico)", pelo Prof. Dr. António Manuel Baptista, integrada no ciclo "Palestras SPF" promovido pela Delegação Regional do Centro da SPF.

A sessão de encerramento teve lugar na manhã do dia 23 e contou com a presença do Prof. Dr. Carlos Matos Ferreira, Secretário-Geral da SPF, e da Prof.^a Dr.^a Ana Eiró, membro da Comissão Nacional das Olimpíadas de Física. Seguiu-se um almoço de confraternização de todos os participantes.

Nos passados dias 27 e 28 de Março os alunos antes referidos e ainda Nelson Faria Gonçalves da Silva, da Escola Sec. Francisco Franco, Funchal, e Miguel Ferrão Ferreira Valente, da Escola Sec. Dr. Manuel Fernandes, Abrantes, acompanhados dos seus professores orientadores, estiveram presentes em Coimbra numa

segunda reunião de trabalho com vista à sua preparação para a IPhO'98. Os temas então abordados foram: Ondas, Óptica Aplicada, Electromagnetismo, Mecânica e Física Experimental. As sessões foram coordenadas pelos "team-leaders" e ainda pelos Profs. Drs. Lucília Brito (Electromagnetismo), Margarida Fraga (Óptica Aplicada) e Francisco Gil (Experiências de Óptica). A Comissão Nacional das Olimpíadas de Física agradece a colaboração destes professores do Departamento de Física da Universidade de Coimbra.



Professores orientadores dos alunos candidatos à IPhO'98. Da esquerda para a direita: Dra. Celeste Marques Santos (Lisboa), Dr. António Ferreira (Abrantes), Dra. Maria Regina Santos (Lisboa), Dra. Maria Eugénia Campos Costa (Famalicão), Dra. Maria Margarida Costa (Coimbra), Dra. Marília Telo (Funchal) e Dr. Mário Malcata (Coimbra).

* ————— *



Prof. Matos Ferreira entrega prémio de presença ao Nelson.

A PARTICIPAÇÃO de Portugal nas Olimpíadas Internacionais de Física tem o apoio do Ministério da Ciência e da Tecnologia, através da Unidade Ciência Viva.



Ministério da Ciência e da Tecnologia

PROVAS DE SELECÇÃO PARA AS OLIMPIADAS INTERNACIONAIS DE FÍSICA

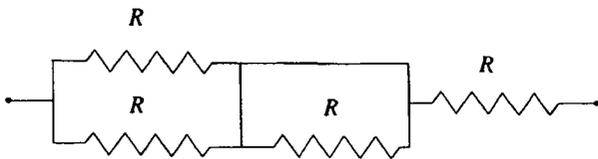
— Prova Teórica —

Duração da prova: 3h30

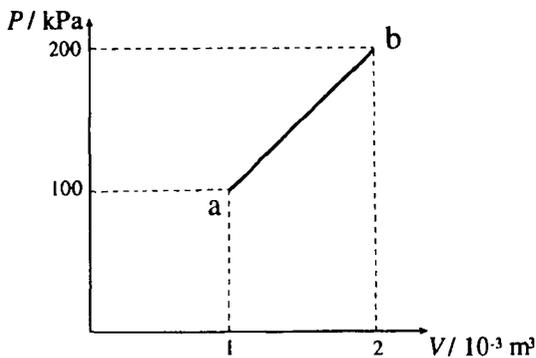
I. Vários tópicos

Este problema é constituído por várias alíneas sem qualquer ligação entre si.

- a) Determina a resistência equivalente ao seguinte conjunto de resistências:



- b) Um fóton de frequência ν "cai" num poço de altura l (que se pode considerar pequena). Calcula a sua energia quando atinge a base do poço (exprime o resultado em função de ν , l , da constante de Planck, da velocidade da luz e da aceleração da gravidade, g).
- c) Um gás perfeito realiza o processo representado na figura. No processo ab o fluxo de calor para o sistema é 600 J. Determina, em joules, o trabalho no processo ab e a variação de energia interna. Mostra que se trata de um gás monoatômico. Determina, em função da constante (molar) dos gases perfeitos, R , a capacidade térmica molar média no processo ab.



- d) Uma partícula relativista, x , de massa em repouso m_0 e momento linear $p \hat{e}_x$ colide frontalmente com outra partícula idêntica que está inicialmente em repouso. Em resultado da colisão

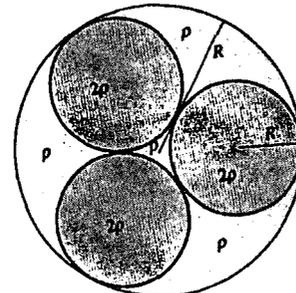
forma-se uma nova partícula X , de acordo com a reacção $x + x \rightarrow X$. Determina o momento linear e a massa em repouso da nova partícula X .

II. Electromagnetismo

1. Considera a distribuição de carga eléctrica representada na figura formada por três esferas pequenas e outra maior. A densidade de carga eléctrica nas várias regiões do espaço está indicada na figura, sendo r uma constante. O raio da esfera maior é R e o de cada uma das esferas menores é R' .

- a) Determina a relação entre R e R' .
- b) Calcula a carga total da distribuição.
- c) Calcula o campo eléctrico no centro da esfera maior e no centro de uma das esferas menores.

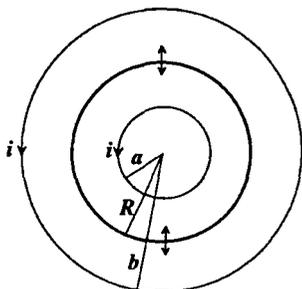
Nota: os resultados das alíneas b) e c) devem ser expressos em função de R e de ρ . No caso de não teres resolvido a alínea a) exprime-os também em função de R' .



2. O campo de indução magnética, B , produzido por um solenóide muito longo é nulo no seu exterior e igual a $\mu_0 n i$ no interior (n é o número de espiras por unidade de comprimento e i é a corrente no solenóide), apontando na direcção do seu eixo. Considera dois solenóides coaxiais muito longos de raios a e b , respectivamente ($a < b$), percorridos pela mesma corrente constante i , fluindo no mesmo sentido.

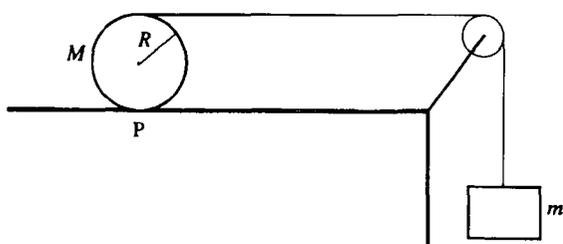
- a) Obtém o campo de indução magnética criado pelos dois solenóides em todo o espaço.
- b) Uma partícula de massa m e carga eléctrica Q é lançada de um ponto do eixo com velocidade de grandeza v e perpendicularmente a esse eixo. Determina a mínima corrente (comum a cada um dos solenóides) que permite manter a partícula dentro do solenóide interior sem colidir com a sua parede.

- c) Considera uma espira condutora de raio R ($a < R < b$) a executar oscilações no plano vertical com certa frequência, para cima e para baixo, como mostra a figura, sem nunca tocar as paredes dos solenóides. Mostra que, nestas condições, não há força electromotriz induzida na espira.



III. Disco rolante

Um disco de massa $M = 4$ kg e raio $R = 0,5$ m (momento de inércia $\frac{1}{2}MR^2$) tem enrolado à sua volta (sem escorregar) um fio inextensível e de massa desprezável. O disco está assente sobre uma mesa e a extremidade livre do fio está ligada a um bloco de massa $m = 3$ kg. Como mostra a figura, o fio passa por uma roldana que tem massa desprezável. Quando o bloco é largado o disco roda sem escorregar sobre a superfície horizontal. Nota: o momento de inércia em relação ao eixo instantâneo de rotação P é, de acordo com o teorema dos eixos paralelos, $\frac{3}{2}MR^2$.



- Desenha todas as forças aplicadas ao disco e ao bloco.
- Calcula a aceleração do bloco ($g = 10 \text{ m/s}^2$).
- Obtém o coeficiente de atrito mínimo entre o bloco e a mesa para que o disco possa rolar sem escorregar.
- Determina a velocidade angular do disco em relação ao centro de massa, 1 s após se ter iniciado o movimento.
- Verifica que a energia mecânica do sistema nesse instante é igual à energia mecânica no instante inicial.

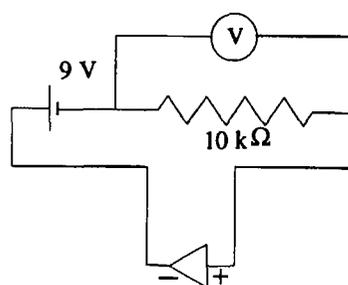
Prova Experimental I

Duração da prova: 1h30

Termómetro de germânio

Um díodo de germânio é um condutor não-ohmico que pode ser utilizado para construir um termómetro de elevada sensibilidade. Quando polarizado inversamente por uma tensão constante, a intensidade da corrente que atravessa o díodo aumenta com a temperatura.

Tens à tua disposição um termómetro baseado num díodo de germânio construído de acordo com o esquema da figura.



- Efectua a calibração do termómetro, procedendo do seguinte modo. Insere o díodo num tubo de ensaio com óleo. Aquece o tubo de ensaio em banho-maria e regista, simultaneamente, a temperatura do óleo, medida com um termómetro de mercúrio, e a diferença de potencial, U , nos terminais da resistência, para temperaturas compreendidas entre a temperatura ambiente e 50°C .

- Representa num gráfico os pares de valores (U, T) que mediste. O termómetro é linear no intervalo de temperatura utilizado? Estima a diferença de potencial que o termómetro de germânio deverá indicar nos pontos de fusão e de ebulição da água.

- Vais agora utilizar o termómetro de germânio para determinar a capacidade térmica de um óleo lubrificante. Para o efeito dispões do seguinte material:

- Calorímetro; b) Termómetro de germânio; c) Bloco de alumínio atado a um fio; d) Óleo lubrificante; e) Água destilada; f) Placa de aquecimento; g) Vareta de vidro; h) Balança;

Para o efeito procede do seguinte modo. Coloca 100 ml de óleo no calorímetro e regista a sua temperatura. Aquece o bloco de alumínio em água em ebulição. Retira-o rapidamente da água, puxando pelo fio, e coloca-o no calorímetro. Agita com a vareta de vidro para homogeneizar a temperatura e regista o aumento de temperatura. Tem cuidado para que nem a vareta nem o bloco de alumínio entrem em contacto com o termómetro. Determina a capacidade térmica mássica do óleo. Estima a precisão da tua medida e discute as fontes de erro mais prováveis no valor que obtiveste.

Dados:

- massa atómica relativa do alumínio: 26,98
- capacidade térmica molar do alumínio: $24,9 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

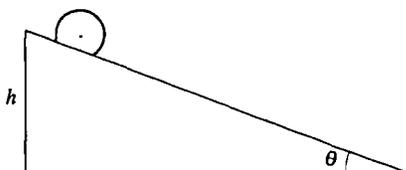
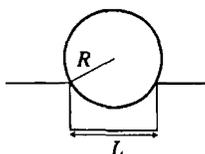
Prova Experimental II

Duração da prova: 1h30

Esferas a rolar

Material: calha montada em plano inclinado, duas esferas de aço de raios diferentes, cronómetro, régua e craveira.

Dispões de uma calha onde podem ser postas a rolar duas esferas metálicas, maciças e homogéneas de diferentes raios.



1. Larga as esferas do início da calha e mede, com o cronómetro, o tempo que as esferas levam a descer.
2. Desenha, num esquema, as forças que actuam sobre uma esfera quando ela está a rolar sobre a calha.
3. Escreve as equações do movimento e, supondo que a esfera desce a calha sem deslizar, mostra que a aceleração do seu centro é

$$a = \frac{g \sin \theta}{1 + \frac{2}{5} \frac{1}{1 - \frac{1}{4} \varepsilon^2}}$$

onde g é a aceleração da gravidade $\varepsilon = L/R$. (Nota: o momento de inércia da esfera é $\frac{2}{5}MR^2$.)

4. Verifica se a razão entre os tempos de descida das duas esferas está de acordo com a equação anterior.
5. Determina a velocidade das esferas no fim da calha em função da altura h , da aceleração da gravidade g e do parâmetro ε .
6. Determina, o coeficiente de atrito mínimo para que as esferas rolem na calha sem deslizar, em função da inclinação da calha e do parâmetro ε .

DELEGAÇÃO CENTRO

1 — Ciclo de Palestras 97/98

Continuou-se o ciclo de palestras da SPF na Sala de Conferências do Departamento de Física da Universidade de Coimbra. Realizaram-se desde Fevereiro as seguintes:

- “Vídeo no ensino das Ciências”, Dr. Alexandre Ramires, Imagoteca, Casa da Cultura de Coimbra, em 27/02/98.
- “O papel dos museus de ciência na cultura científica”, Prof. Doutor Bragança Gil, Museu da Ciência, Universidade de Lisboa, em 20/03/98.
- “Jornalismo Científico”, Dr. José Vítor Malheiros, Jornal Público, em 24/04/98.
- “Questões questionáveis — memórias de um Físico”, Prof. Doutor António Manuel Baptista, Academia Militar, em 22/05/98.
- O ensino das ciências Físico-Matemáticas nos séculos XVIII e XIX, Prof. Doutor Décio Martins, FCTUC, em 19/06/98.

Iniciou-se um ciclo de palestras da SPF na Universidade de Aveiro. Realizaram-se as seguintes:

- “A radiação e a estrutura da matéria — perspectiva de um Químico”, Prof. Doutor Vítor Gil, FCTUC, em 7/05/98.
- “A atmosfera e as previsões meteorológicas”, Prof. Doutor Alfredo Rocha, Universidade de Aveiro, em 4/06/98.

Estão previstas ainda as seguintes (ver endereço na Internet: <http://www.ua.pt/event/fisica/pal/>)

- “Os computadores no ensino das Ciências”, Prof. Doutor Carlos Fiolhais, FCTUC, em 1/10/98.
- “Laboratório de Ensino de Física”, Prof. Doutora Marília Thomaz, Universidade de Aveiro, em 5/11/98.
- “Supercondutividade para todos”, Drs. Florinda Costa, Ricardo Dias e Fernão Abreu, Universidade de Aveiro, em 3/12/98.

Agradece-se a todos os conferencistas a colaboração prestada.

2 — Acções de Divulgação

Realizaram-se as várias acções de divulgação para alunos nas escolas secundárias da região centro e algumas acções de formação de professores. A lista detalhada das acções realizadas durante este ano lectivo será publicada no próximo número da Gazeta.

3 — Workshop “Física em Acção”

Sexta-feira, 3 de Abril de 1998

14h15 — Boas Vindas.

14h30 — Os computadores no ensino da Física.

Prof. Dr. Carlos Fiolhais

14h45 — Apresentação do programa “Física em Acção”, metodologias e objectivos.

Prof. Dr. José António Paixão

15h30 — Apresentação do material a distribuir pelas escolas (*kit* de Física da Pasco). Eng.^a Leonor Mendes, J. Roma Lda., representante da Pasco em Portugal. Visualização de um vídeo.

16h00 — Pausa para café.

16h30 — Sensores e computadores; exemplos simples de exploração. Profs. Drs. José António Paixão e Francisco Gil.

18h00 — A “Física em Acção” na minha escola. Dr. João Paulo Pinto, Esc. Sec. Afonso de Albuquerque, Guarda.

18h30 — Encerramento da sessão.

Sábado, 4 de Abril

9h30 — Exemplos de aplicação ao nível do ensino secundário

Profs. Drs. José António Paixão e Francisco Gil.

10h45 — Pausa para café.

11h15 — Apresentação de *software* educacional: “Projecto SoftCiências”.

Dr. João Paiva.

12h30 — Almoço no Instituto Justiça e Paz.

14h00 — Discussão.

16h00 — Encerramento do Workshop.

4 — SoftCiências

O projecto Softciências (<http://www.fis.uc.pt/~softc/>) lançou e distribuiu por 1500 escolas do país o CD-ROM Omniciência 98 (<http://www.fis.uc.pt/~softc/omni98/Welcome.html>). O disco Omniciência, contendo todos os

programas Softciências), esteve disponível no Encontro da Feira Internacional de Lisboa sobre Internet.

Foi criado para apoio às escolas o Centro de Competência Nónio/Softciências, que colabora com a Acção Comum para a Produção e Difusão de *software* com o mesmo nome (ver na Web <http://softciencias.ccg.uc.pt/>). Esse Centro de Competência criou já um serviço de apontadores intitulado “Mocho” (<http://softciencias.ccg.uc.pt/mocho/>) que descreve e aponta para páginas Web de Física, Química e Matemática. Elaborou também um projecto para o “Netdays” que foi escolhido a nível europeu.

5 — Outras notícias

A Delegação Regional do Centro apoiou os 4.^{os} Encontros de Física e Engenharia Física, organizados por estudantes em Abril de 1998.

A Delegação está a apoiar ainda o 1.^o Colóquio de Física do Instituto Politécnico de Tomar subordinado ao tema “A Física no Ensino, na Arte e na Engenharia”, a realizar em Tomar nos dias 25 e 26 de Novembro. Contacto: António Pires da Silva, Área de Física da Escola Superior de Tecnologia de Tomar, Instituto Politécnico de Tomar, E-mail: piressilva@ipt.pt, tel. 049-328137, fax 049-328135.

DELEGAÇÃO NORTE

A Delegação Norte da SPF passou a dispôr de um site na WWW, onde poderão ser encontradas informações actualizadas acerca das suas actividades: Formação de Professores, Física 98, Olimpíadas Regionais, Palestras e Projectos.

Para além de conter todos os contactos da Delegação, este site inclui um formulário que automatiza a requisição de palestras pelas escolas, de entre um menu oferecido.

O seu endereço é:

<http://www.fc.up.pt/fis/spf-norte/>

Pode também ser acedido através da página do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, e deverá em breve ter acesso através da página central da SPF.



Soft Ciências

SPF - Departamento de Física da Universidade de Coimbra
 3000 COIMBRA PORTUGAL
 Telef: 039 - 410113 ou 410600 (ext. 524) Fax: 039 - 829158
 E-mail: softc@nautilus.fis.uc.pt
 Internet: http://www.fis.uc.pt/~softc

Ação Comum das:
 Sociedade Portuguesa de Física
 Sociedade Portuguesa de Química
 Sociedade Portuguesa de Matemática
 para produção de software educativo
 Apoios: Ministério da Ciência e Tecnologia
 Ministério da Educação

PROGRAMAS DE COMPUTADOR PARA O ENSINO DAS CIÊNCIAS



Alguns programas estão ainda disponíveis em disquete com o respectivo manual:

- | | |
|---|---|
| 6. FQ - FOLHA DE CÁLCULO
Programas em "Excel" | 15. ZERO 2.0
Concepção e correcção de testes (multidisciplinar) |
| 8. FRACTAIS
Um mundo de imagens matemáticas | 16. TESTA FQ 8/9
800 perguntas de Físico-Químicas (8º e 9º anos) para testes |
| 9. ELECTRÃO
Meça a carga do electrão | 17. ÂNGULOS
Trigonometria no computador |
| 11. TABELA PERIÓDICA
Tudo sobre elementos | 18. RLC
Circuitos de corrente alternada |
| 13. JOGO DAS COISAS
Jogos de fazer pensar (multidisciplinar) | 19. Testa FQ 10/11
600 perguntas de Físico-Químicas (10º e 11º anos) |
| 14. EUROCHEM
Elementos químicos na Europa | 20. TESTA Q 12
450 perguntas de Químicas (12º ano) |

Próximos lançamentos:

TESTA F 12;
 ROTSOFT (Roteiros para software educativo)
 TABELA PERIÓDICA 3.0 (edição Português - Inglês)

Novidades:

21. LECHAT 2.1
 22. JOGO DAS COISAS 2.0

Para solicitar o CD-ROM ou algum destes programas preencha o destacável e envie para:
 Sociedade Portuguesa de Física, Softciências, Departamento de Física, Universidade de Coimbra, 3000 COIMBRA

Colocar uma cruz nos programas pretendidos

Nome do Programa	Preço	Preço*
<input type="radio"/> OMNICIÊNCIA 98	3500	3000
<input type="radio"/> OMNICIÊNCIA 97	1500	1000
<input type="radio"/> 6. FQ - Folha de cálculo	1500	1000
<input type="radio"/> 8. Fractais	1500	1000
<input type="radio"/> 9. Milikan	1500	1000
<input type="radio"/> 11. Tabela Periódica	1500	1000
<input type="radio"/> 13. Jogo das coisas	1500	1000

Nome do Programa	Preço	Preço*
<input type="radio"/> 14. Eurochem	1500	1000
<input type="radio"/> 15. Zero 2.0	1500	1000
<input type="radio"/> 16. Testa FQ / 8-9**	2000	1500
<input type="radio"/> 17. Ângulos	1500	1000
<input type="radio"/> 18. RLC	1500	1000
<input type="radio"/> 19. Testa FQ / 10-11 **	2000	1500
<input type="radio"/> 20. Testa Q 12**	2000	1500
<input type="radio"/> 21. LeChat 2.1	1500	1000
<input type="radio"/> 22. Jogo das Coisas 2.0	1500	1000

* Sócios SPF, SPQ e SPM.

** Inclui testes que podem ser policopiados.

Junto envio cheque / vale de correio / requisição nº _____, relativo ao pagamento de _____ programas e _____ CD-ROM, conforme o quadro.

Remeter para SOFTCIÊNCIAS, SPF, Departamento de Física da Universidade de Coimbra, 3000 Coimbra.