

# GAZETA DE FÍSICA

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

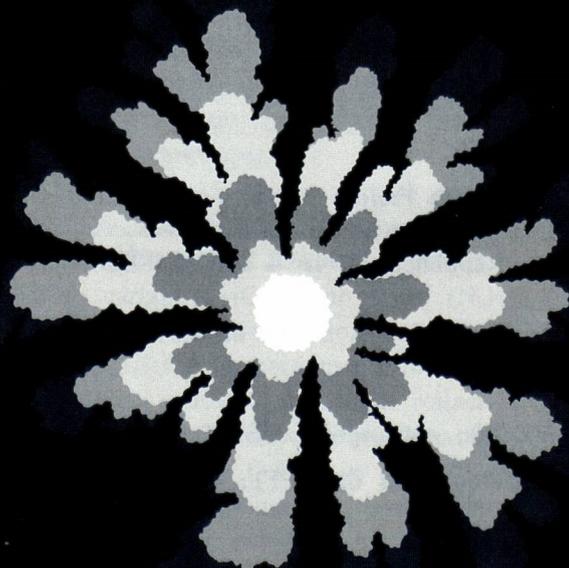
## FÍSICA '92

8ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE FÍSICA E 2º ENCONTRO IBÉRICO PARA O ENSINO DA FÍSICA

VOL. 14, FASC. 4

Publicação Trimestral

Outubro a Dezembro 1991



SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

15/18 DE SETEMBRO DE 1992  
UTAD, VILA REAL, PORTUGAL

INFORMAÇÕES: COMISSÃO ORGANIZADORA DA FÍSICA 92 LABORATÓRIO DE FÍSICA / FACULDADE DE CIÊNCIAS TELF. (02) 2026620/310290 FAX (02) 319267 4000 PORTO PORTUGAL

APOIO  
EDIÇÕES ASA

# GAZETA DE FÍSICA

Fundada em 1946 por A. Gibert

Propriedade e Edição: Sociedade Portuguesa de Física

*Directores:* Filipe Duarte Santos  
João Bessa Sousa

*Comissão de Redacção e Administração:* Manuel F. Thomaz, Carlos Matos Ferreira, Armando J. P. L. Policarpo, Ana Maria Eiró, Margarida C. Martins da Cruz, Maria Fernanda Cristóvão da Silva, Adriano Pedroso de Lima, José Manuel Monteiro Moreira.

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

---

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

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

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

Toda a correspondência deverá ser enviada para

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

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

**Preço de assinatura: país 1500\$00; estrangeiro US\$25.**

**Preço do fascículo avulso (sede e delegações da SPF): 400\$00.**

---

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

Publicação periódica n.º 107 280 (Min. Com. Social) • Depósito Legal n.º 51 419/91

Tiragem: 2400 exemplares

Composição, Impressão e Acabamento — *Imprensa Portuguesa* — Porto

## A experiência de Joule-Thomson

JOSÉ FRANCISCO DE MARTINS DE AZEVEDO E SILVA

Departamento de Física da Faculdade de Ciências de Lisboa

*Descreve-se uma montagem simples para determinar o coeficiente de Joule-Thomson. Embora os resultados obtidos para os três gases estudados não sejam muito exactos, esta experiência permite clarificar alguns aspectos práticos da Termodinâmica em geral pouco referidos nas aulas desta disciplina.*

### Introdução

O efeito de Joule-Thomson é uma consequência do desvio do comportamento dos gases reais em relação aos gases ideais. As primeiras medições deste efeito foram realizadas por Joule e Thomson (Lord Kelvin) em 1853 [1] e mais tarde retomadas com grande detalhe por Roebuck e Osterberg [2, 3] que o estudaram para vários gases em diferentes gamas de pressões e temperaturas.

Este artigo pretende descrever uma experiência relativamente simples em que o coeficiente de Joule-Thomson é detectado e medido no anidrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), no azoto ( $\text{N}_2$ ) e no hélio (He), (neste último caso sem conclusões) para pressões e temperaturas ambientes.

A experiência começou agora a ser rotineiramente efectuada pelos alunos do Departamento de Física da F.C.U.L. e os resultados apresentados são os primeiros com algum significado.

### Teoria

Um gás ideal pode ser definido, basicamente, por obedecer às seguintes duas condições:

a) A sua energia interna,  $U$ , é função exclusiva da temperatura,  $T$ :

$$U = U(T) \quad (1)$$

b) Satisfaz à lei de Boyle, ou seja, o produto da sua pressão,  $p$ , pelo volume molar,  $V$ , é também função exclusiva da temperatura:

$$pV = RT = f(T) \quad (2)$$

em que  $R$  é a constante dos gases ideais.

Pode demonstrar-se que, para um gás ideal (ou semiperfeito), os calores específicos só dependem da temperatura; e se, num determinado intervalo de temperaturas, esses calores específicos se puderem considerar constantes, costuma designar-se o gás, nesse intervalo de temperaturas, por gás perfeito.

A entalpia,  $H$ , de um gás ideal é portanto, por definição, também função exclusiva da temperatura:

$$H = U + pV = H(T) \quad (4)$$

Por outro lado a equação do Primeiro Princípio da Termodinâmica para um processo de fluxo estacionário pode escrever-se, despre-

zando as variações de energias cinética e potencial do fluido em escoamento:

$$dH = H_2 - H_1 = W + Q \quad (4)$$

em que  $W$  e  $Q$  são, respectivamente, o trabalho de veio e o calor trocados com o exterior através da superfície de controlo (que se supõe rígida), e  $H_2 - H_1$  é a diferença de entalpias do fluido entre a saída e a entrada do volume de controlo.

Aplicando esta equação ao escoamento de um gás através de um tubo munido de um tampão poroso, que é esquematicamente a experiência de Joule-Thomson, (Fig. 1), veri-

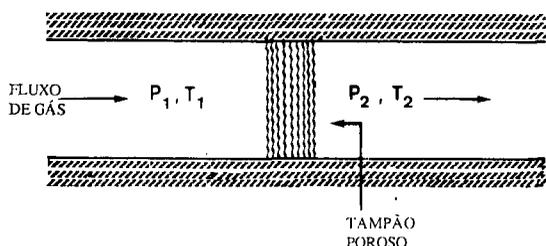


Fig. 1 — Esquema da experiência de Joule-Thomson;  
 $P_2 < P_1$ .

fica-se imediatamente que, se esse escoamento for adiabático, se tem:

$$dH = H_2 - H_1 = 0 \quad (5)$$

ou seja o escoamento para qualquer gás é também a entalpia constante, ou isentálpico, e, no caso particular de um gás ideal, terá de ser, consequentemente, isotérmico.

Resumindo, no escoamento adiabático de um gás ideal através de um tampão poroso ou, de um modo geral, através de qualquer estrangulamento que faça baixar a sua pressão, não há variação de temperatura.

Na caso geral, podemos escrever para  $dH$ :

$$dH = (\partial H / \partial p)_T dp + (\partial H / \partial T)_p dT \quad (6)$$

Igualando (6) a zero pode definir-se o chamado coeficiente de Joule-Thomson,  $\mu$ :

$$\mu = (\partial T / \partial p)_H = - [(\partial H / \partial p)_T] / [(\partial H / \partial T)_p] \quad (7)$$

Nesta equação, o denominador do 2.º membro é o calor específico a pressão constante,  $C_p$ . O numerador é zero para um gás ideal e portanto, neste caso, o coeficiente de Joule-Thomson é também zero. O valor não nulo deste coeficiente para um gás real, bem como o seu sinal, fornecem, pois, informação acerca do desvio desse gás em relação a um gás ideal, o que pode ser muito útil em certas aplicações práticas da Termodinâmica.

Recorrendo à seguinte relação geral da Termodinâmica:

$$(\partial H / \partial p)_T = - T(\partial V / \partial T)_p + V \quad (8)$$

e usando a equação (7), é fácil provar que:

$$\mu = [T(\partial V / \partial T)_p - V] / C_p \quad (9)$$

É importante acentuar aqui que o aparecimento de um valor de  $\mu$  diferente de zero é uma consequência directa de, num gás real, a entalpia, tal como a energia interna, dependerem, não só de  $T$ , como também de  $p$  e  $V$  e, consequentemente, se ter  $(\partial H / \partial p)_T \neq 0$ , sendo o valor desta derivada uma medida do desvio em relação ao gás ideal.

No caso de um gás real, uma das equações mais simples que procura traduzir essa dependência, entrando portanto em conta com as interações entre as moléculas que o constituem e com o seu volume, é a conhecida equação de van der Waals:

$$(p + a/V^2)(V - b) = RT \quad (10)$$

em que  $a$  e  $b$  são parâmetros que dependem de cada gás. O parâmetro  $a$  está relacionado com as atracções entre as moléculas e o parâmetro  $b$  com o seu volume.

Calculando  $(\partial V / \partial T)_p$  a partir da equação de van der Waals, desprezando os termos de 2.ª ordem, e substituindo em (9), obtemos:

$$\mu = [(2a/RT) - b] / C_p \quad (11)$$

A dependência de  $C_p$  com a temperatura pode desprezar-se para pequenas variações de  $T$ , tal como a sua dependência de  $p$  e  $V$ .

A equação (11) permite portanto fazer previsões, ainda que grosseiras, sobre o valor de  $\mu$ .

Para a grande maioria dos gases reais verifica-se que, em condições normais,  $2a/RT > b$ , o que traduz o facto da atracção entre as moléculas predominar sobre a sua repulsão mútua. Isto significa que, normalmente, os gases reais arrefecem ao expandirem-se adiabaticamente, ou seja o coeficiente de Joule-Thomson,  $\mu$ , é positivo. No entanto, para temperaturas suficientemente elevadas, a desigualdade é invertida e os gases passam a aquecer na expansão. A temperatura à qual se verifica a inversão ( $\mu = 0$  na equação (11)), denomina-se temperatura de inversão,  $T_i$ , e pode escrever-se, para um gás de van der Waals:

$$T_i = 2a/Rb \quad (12)$$

A temperatura de inversão é, normalmente, da ordem das várias centenas de graus acima da temperatura ambiente. As excepções mais importantes são o hélio e o hidrogénio, cujas temperaturas de inversão se situam muito abaixo da temperatura ambiente. Isto é uma consequência das fracas forças atractivas existentes entre as suas moléculas, e constitui um factor importante a ter em conta quando se pretende liquefazer estes gases.

A Tabela I dá os valores de  $a$  e  $b$  para os gases aqui estudados, os valores de  $C_p$  e os valores das suas temperaturas de inversão.

A análise do efeito de Joule-Thomson e a determinação das temperaturas de inversão podem ser feitas recorrendo a equações de estado semi-empíricas mais rigorosas que a equação de van der Waals, como, por exemplo, as equações de Beattie-Bridgeman ou a do virial, mas essa análise, embora mais interessante, exige um esforço de cálculo que não conduz a melhoramentos sensíveis nas presentes condições experimentais. A Ref. [6] é um excelente artigo sobre a discussão do efeito de Joule-Thomson utilizando a equação do virial e recorrendo a uma interpretação molecular.

TABELA I — Valores de  $a$  e  $b$  da equação de van der Waals, dos calores específicos a pressão constante e das temperaturas de inversão do  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{He}$ . Os valores de  $a$ ,  $b$  e  $C_p$  são retirados da Ref.<sup>a</sup> [4]. Os valores de  $C_p$  são para  $p = 1 \text{ atm}$  e  $T = 298 \text{ K}$ . Os valores de  $T_i$  marcados com um asterisco são calculados usando a equação (12) e os valores de  $a$  e  $b$  tabelados; os restantes são retirados da Ref.<sup>a</sup> [5] onde foram obtidos a partir de determinações experimentais.

	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{He}$
$a \times 10^6$ ( $\text{m}^6 \cdot \text{bar} \cdot \text{mole}^{-2}$ )	3.63	1.41	0.0345
$b \times 10^3$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{mole}^{-1}$ )	0.0427	0.0391	0.0237
$C_p \times 10^3$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{bar} \cdot \text{mole}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0.371	0.288	0.208
$T_i$ (K)	2045*	868*	35*
	1500	620	40

### Parte experimental

O dispositivo experimental baseia-se fundamentalmente, com alterações de pormenor, no desenho de Shoemaker & Garland [7], e é constituído basicamente pelos seguintes componentes:

a) Tubos de gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  e  $\text{He}$ ) munidos dos respectivos manoredutores.

b) Célula de Joule-Thomson, que consiste num tubo de vidro Pyrex de aproximadamente 3 cm de diâmetro, no interior do qual se encontra soldado um tampão poroso de vidro de filtragem (porosidade 5: diâmetro médio dos poros,  $\phi \approx 2 \mu\text{m}$ ). Este tubo está envolvido por um outro, mais largo, de cerca de 15 cm de diâmetro, de modo a que o espaço entre esses dois tubos possa ser termicamente isolado da atmosfera exterior. O isolamento pode ser feito utilizando esferovite ou outro material

adequado. Esta célula está representada esquematicamente na Fig. 2.

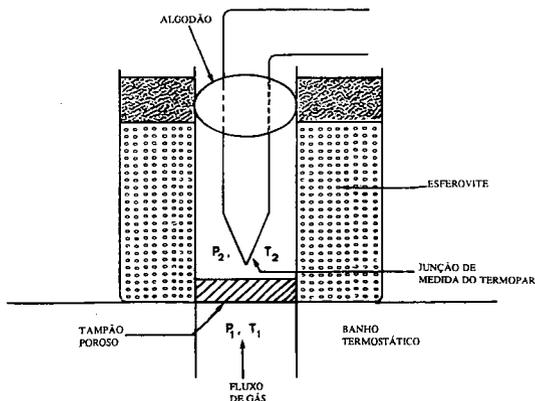


Fig. 2 — Esquema da célula de Joule-Thomson;  $P_2 < P_1$  e  $\Delta P_{\text{máx}} \approx 1$  bar.

c) Tina de água de Perspex com aproximadamente 160 litros de capacidade, na qual se encontra mergulhada uma serpentina de cobre de 30 m de comprimento e cerca de 0.4 cm de diâmetro interior. A uma das extremidades da serpentina encontram-se ligados os tubos dos diferentes gases, através de uma válvula comutável, e à outra estão ligados o manómetro de medida da pressão, à entrada do tampão poroso, e a célula de Joule-Thomson.

d) Manómetro Bourdon metálico, até 2 bar, que permite ler a pressão do gás imediatamente antes de atravessar o tampão poroso. Depois de atravessar esse tampão o gás fica à pressão atmosférica, visto que o tubo interior da célula de Joule-Thomson está aberto para o ar, embora termicamente isolado por meio de um pouco de algodão.

e) Termopar diferencial de cobre-constantan, acoplado a um amplificador de ganho  $100 \text{ mV.K}^{-1}$ . Uma das junções deste termopar está mergulhada na tina cuja água, presumivelmente, se encontra à temperatura dos gases antes de atravessarem o tampão poroso, e a outra está a cerca de 1 cm da superfície do tampão poroso, a jusante do fluxo de gás que o atravessa. Os fios do termopar devem ser tão

finos quanto possível a fim de minimizar a condução do calor através deles.

O dispositivo experimental descrito está representado esquematicamente na Fig. 3.

A experiência inicia-se abrindo lentamente o manoreductor do tubo de gás que se pretende estudar, canalizando-o para a serpentina de cobre através da válvula comutável, e controlando a sua pressão no manómetro de Bourdon à entrada do tampão poroso. O aumento de pressão no interior da serpentina tem de ser suficientemente lento para permitir que o fluxo de gás que a atravessa fique em equilíbrio térmico com a água da tina. Com efeito, verificam-se nesta experiência dois efeitos de Joule-Thomson: aquele que se pretende estudar, e o causado pela expansão do gás ao sair do tubo que o contém, cuja pressão interior é da ordem de 200 bar se o tubo estiver completamente cheio. Temos portanto, ao abrir os manoredutores dos tubos de gás para iniciar o fluxo através da serpentina, diferenciais de pressão entre esta e os tubos que podem atingir 200 bar.

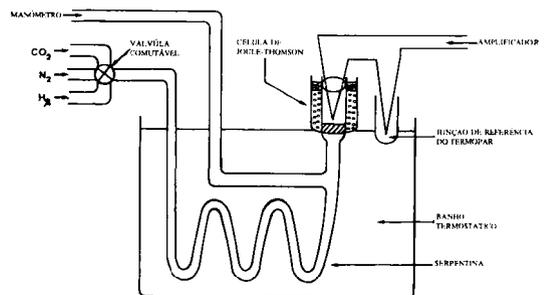


Fig. 3 — Esquema da montagem experimental.

Este fenómeno é particularmente notável no caso do  $\text{CO}_2$ , em que tem de se utilizar um secador de cabelo para derreter o gelo formado no manoreductor, proveniente da condensação do vapor de água atmosférico. Verifica-se que, em geral, basta um aumento de pressão de cerca de  $0.03 \text{ bar.min}^{-1}$  para haver equilíbrio térmico permanente entre o gás e a água da tina o que permite chegar à pressão do manómetro de 1 bar em pouco mais de meia hora.

## Resultados

De acordo com os valores de  $\mu$ , deve verificar-se à temperatura ambiente,  $T_{amb}$ , um arrefecimento, na expansão, do  $CO_2$  e do  $N_2$ , ( $\mu > 0$ ), e um aquecimento para o He, ( $\mu < 0$ ). Deve também notar-se que, para o  $CO_2$  e  $N_2$ , se tem  $T_i > T_{amb}$  e que para o He é  $T_i < T_{amb}$ .

A Fig. 4 representa as variações da diferença de temperatura em função do aumento da pressão para o  $CO_2$  e  $N_2$ . Verifica-se que, nestes dois casos, o comportamento dos gases

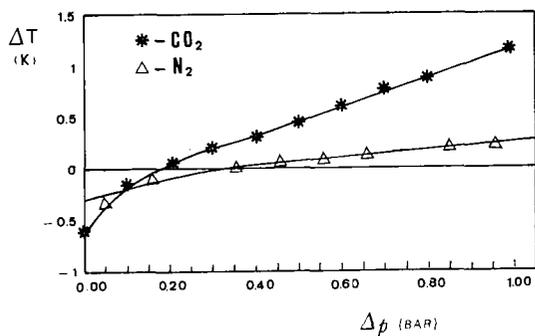


Fig. 4 — Variação de  $\Delta T$  com  $\Delta p$  para o  $CO_2$  e  $N_2$ .

no escoamento é, em linhas gerais, o que seria de esperar, isto é, à medida que aumenta o diferencial de pressão entre os dois lados do tampão poroso, assim aumenta também o diferencial de temperatura. Como, em princípio, a temperatura do gás antes do tampão é constante e igual à temperatura da água da tina, e visto que, de acordo com (11),  $\mu$  é positivo, segue-se que temos efectivamente um arrefecimento. Há, no entanto, observações a fazer acerca destes gráficos, das quais as mais importantes são: *a*) não haver variação linear para os pontos iniciais dos gráficos, ao contrário do que se passa para os pontos mais afastados da origem, e *b*) as melhores rectas não passarem pela origem, como seria de esperar.

Estas discrepâncias estão aparentemente relacionadas com duas imperfeições do dispositivo experimental utilizado, e que são a existência de um pequeno gradiente de temperatura ( $\approx 0.3$  K) na água da tina, entre o fundo e a superfície e o facto de a zona de baixa pressão imediatamente acima do tampão poroso,

(Fig. 2), estar sempre sistematicamente mais quente que a água da tina.

Qualquer destas imperfeições é solucionável: a primeira, pela montagem de um homogeneizador (uma ventoinha, por exemplo) no interior da tina; a segunda, por um melhor isolamento térmico da célula de Joule-Thomson, visto que se supõe que o ligeiro aquecimento do seu interior é devido à radiação térmica ambiente. Por essa razão, e também a fim de garantir o fluxo adiabático do gás, é importante conseguir um bom isolamento térmico da célula. Para o caso do hélio, estes dois aspectos são particularmente relevantes, como se pode ver observando o gráfico da Fig. 5.

Os coeficientes de Joule-Thomson para o  $CO_2$ ,  $N_2$  e He obtidos a partir das melhores rectas (portanto sem os pontos iniciais) estão representados na Tabela II em conjunto com os valores dados pela equação (11), e pelas várias referências nela apresentadas.

TABELA II — Valores de  $\mu$  para o  $CO_2$ ,  $N_2$  e He. A letra e os números entre parêntesis indicam o modo como foi obtido o valor de  $\mu$ : (a), utilizando a equação (11) e os valores da Tabela I; [2], [8] e [10], das referências respectivas.

	$CO_2$	$N_2$	He
$\mu$ (K.bar <sup>-1</sup> ) (Neste artigo)	1.37	0.341	0 (?)
$\mu$ (K.bar <sup>-1</sup> )	0.68 (a)	0.26 (a)	-0.10 (a)
	1.11 [8]	0.28 [8]	-0.06 [2]
	1.10 [10]	0.23 [10]	—

## Comentários

As maiores fontes de erro nesta experiência provêm da existência de um gradiente de temperatura no banho termostático e do isolamento deficiente da célula de Joule-Thomson. Este último factor faz com que o surto inicial de gás que atravessa o tampão encontre uma

região ligeiramente mais quente, e portanto os primeiros pontos dos gráficos não reflectem o efeito de Joule-Thomson, mas sim esse fenómeno. Se a primeira fonte de erro é fácil de remediar, a segunda já se torna um pouco mais difícil.

Existem, evidentemente, outras fontes de erro, menos importantes, tanto instrumentais (calibração do amplificador do termopar diferencial, manómetro, etc.), como experimentais. Entre estas últimas, a mais significativa é a eventualidade de poder não existir equilíbrio térmico entre a água do banho e o gás. De facto, se a velocidade de escoamento do gás for muito elevada, pode não haver tempo para se estabelecer esse equilíbrio, depois do arrefecimento da serpentina em consequência da expansão de Joule-Thomson que se dá à saída dos tubos, sendo impossível detectar qualquer variação posterior de temperatura quando os gases atravessam o tampão.

Deve notar-se também que, na aplicação da equação (4) ao escoamento, se desprezam as variações de energia cinética do fluido, aproximação que deixa de ser válida se as variações de velocidade de escoamento forem importantes.

Para que tal não aconteça o caudal de escoamento não deve ultrapassar aproximadamente  $7 \text{ litro}\cdot\text{min}^{-1}$  [9]. No caso desta experiência, no entanto, o caudal máximo de escoamento é de cerca de  $3.6 \text{ litro}\cdot\text{min}^{-1}$  e, portanto, pode presumir-se que os gases estão à temperatura do banho antes de atravessarem o tampão, e também que a equação (4) pode ser aplicada.

Uma concepção alternativa da célula de Joule-Thomson [10] que atenua os efeitos de todas estas fontes de erro, e que traduz uma modificação óbvia, é colocar a junção de referência do termopar diferencial imediatamente antes do gás atravessar o tampão, em vez de a ter mergulhada na água da tina. Uma tal célula é de mais difícil construção, mas existe já neste Departamento, aguardando montagem.

Todas estas fontes de erro são particularmente importantes no caso do He. Para este gás, o valor de  $\mu$  dado na literatura é de cerca

de  $-0.06 \text{ K}\cdot\text{bar}^{-1}$  [2] para aproximadamente as mesmas condições experimentais, com a diferença de que os diferenciais de pressão variam de 0 a 200 bar, sendo o coeficiente angular determinado a partir da recta total. Isso levou a que, no caso da presente experiência, se aumentasse a pressão do He um pouco além do limite de tolerância do tampão ( $\approx 1 \text{ bar}$ ) na tentativa de obter algum resultado significativo. No entanto, a única constatação a fazer é a de que, na realidade, se observa uma tendência para a constância de  $\mu$ , (Fig. 5), a qual não parece ser relevante do

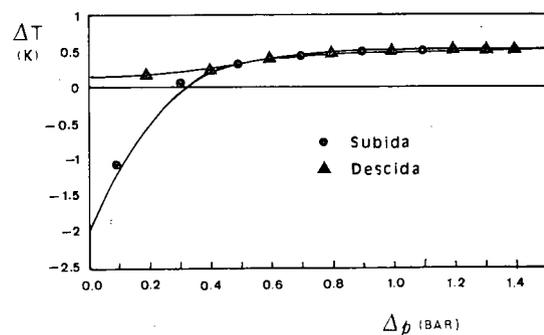


Fig. 5 — Variação de  $\Delta T$  com  $\Delta p$  para o He.

ponto de vista experimental. Isto significa que os erros previamente mencionados mascaram completamente qualquer efeito de aquecimento susceptível de ser observável a estas pressões.

Como comentário final, resta referir que os valores de  $\mu$  aqui obtidos são mais elevados do que os referidos na literatura. Isto deve-se à influência que os erros acima referidos têm nas determinações experimentais. Espera-se que a correcção desses erros sistemáticos se traduza, nas próximas experiências, em valores mais correctos de  $\mu$ .

## Conclusões

Descreveu-se uma experiência de realização relativamente simples que põe em evidência um fenómeno em geral pouco estudado nas aulas de Termodinâmica, mas que tem muita importância em certas aplicações práticas,

nomeadamente na liquefacção de gases, frigoríficos, etc.

Apesar de serem ainda necessários alguns melhoramentos do dispositivo experimental, é possível tirar algumas conclusões acerca do comportamento dos gases reais em comparação com o dos gases ideais cujas equações se utilizam quase sempre na maioria das resoluções dos problemas de Termodinâmica, não só porque permitem a solução analítica dos mesmos, como também porque simplificam extraordinariamente os cálculos. Mas não deve perder-se de vista que, nas aplicações práticas, não existem gases ideais e, portanto, pode acontecer que as aproximações feitas não se apliquem.

Com base nos resultados da experiência torna-se óbvio que o He é o gás que mais se aproxima do comportamento ideal, sendo o CO<sub>2</sub> o que mais se afasta.

Pode portanto admitir-se que, na maioria dos casos, o He é um gás ideal, mas tanto em relação ao CO<sub>2</sub> como em relação a muitos outros gases de uso corrente, há que ser mais cuidadoso e empregar equações mais apropriadas quando sejam exigidos resultados mais exactos para um determinado problema. No caso do CO<sub>2</sub>, por exemplo, a Tabela II mostra que, para a estimativa de  $\mu$ , a equação de van der Waals não é a mais indicada, o mesmo se passando em relação à estimativa de T (Tabela I). Pelo contrário, para o He, essa mesma equação já fornece uma boa estimativa em ambos os casos.

A experiência permite discutir muitos outros aspectos práticos da Termodinâmica como, por exemplo, a aplicação da equação dos processos de fluxo estacionário e as suas aproximações, a recolha de dados em tabelas e diagramas, que muitas vezes apresenta dificuldades inesperadas para os alunos, a criteriosa utilização desses dados em face das condições experimentais existentes, etc.

Um dos aspectos práticos mais importantes que não pode deixar de se referir é o que decorre da elevada irreversibilidade da expansão de Joule-Thomson. Com efeito, a expansão irreversível de Joule-Thomson produz um

decrécimo de temperatura, para a mesma variação da pressão, muito menor que uma expansão reversível em que seja produzido trabalho.

Assim, no caso de um ciclo frigorífico, por exemplo, a inclusão no ciclo de um dispositivo de expansão reversível, e portanto isentrópica, em vez de uma expansão de Joule-Thomson, aumenta muito o seu coeficiente de eficiência visto que, além de tornar possível atingir uma temperatura muito mais baixa, o trabalho produzido pode ser aproveitado para alimentar parcialmente o compressor. O que acontece é que, em geral, esse processo não é economicamente viável, e por isso a solução adoptada continua a ser a simples válvula de expansão irreversível, a qual não envolve componentes mecânicos e pode ser facilmente isolada para evitar perdas de calor.

Convém notar ainda que, a um dispositivo de expansão reversível do tipo mencionado atrás deixa de ser aplicável a equação (5), uma vez que passa a haver trabalho de veio envolvido.

Esta experiência constitui, pois, um valioso complemento didáctico no que se refere ao ensino das disciplinas de Termodinâmica.

## REFERÊNCIAS

- [1] JOULE, J. P. *et al.* — *Phil. Trans.*, **143**, 357, (1853); **144**, 321, (1854).
- [2] ROEBUCK, J. R. *et al.* — *Phys. Rev.*, **43**, 60, (1933).
- [3] ROEBUCK, J. R. *et al.* — *Phys. Rev.*, **48**, 450, (1935).
- [4] «Janaf Thermochemical Data», 2nd Edition, NRDS-NBS 37, U.S. GPO, Washington DC, (1971).
- [5] GOSNEY, W. B. — «Principles of Refrigeration», Cambridge University Press, (1982).
- [6] MCCLURE, D. W. — *Am. J. Phys.*, **39**, 288, (1971).
- [7] SHOEMAKER, D. P. and GARLAND, C. W. — «Experiments in Physical Chemistry», McGraw-Hill, (1967).
- [8] «International Critical Tables», Vol. V, McGraw-Hill, (1929).
- [9] DAWE, R. A. *et al.* — *J. Chem. Thermodynamics*, **6**, 65, (1974).
- [10] HECHT, C. E. — *J. Chem. Educ.*, **31**, 530, (1954).

# Aspectos operacionais do funcionamento do Tokamak IST-TOK <sup>(1)</sup>

C. A. F. VARANDAS, J. T. MENDONÇA, J. A. C. CABRAL, B. B. CARVALHO, H. FERNANDES,  
C. J. FREITAS, A. MATEUS, S. MAGALHÃES, V. PREGO e A. SOARES

Associação EURATOM/IST, Centro de Fusão Nuclear  
Instituto Superior Técnico, 1096 Lisboa Codex, Portugal

## 1. Introdução

O IST-TOK é um pequeno «tokamak» [1] (Fig. 1) projectado a partir da estrutura do antigo «tokamak» TORTUR [2]: câmara de vácuo, carapaça de cobre («copper shell»), transformador, bobines do campo magnético toroidal, bancos de condensadores e sistema de limpeza da câmara. As restantes componentes do «tokamak» (sistema de vácuo, fonte de alimentação para o campo magnético toroidal, sistemas de injeção e de «puffing» do gás, fonte de rádio-frequência para a pré-ioni-

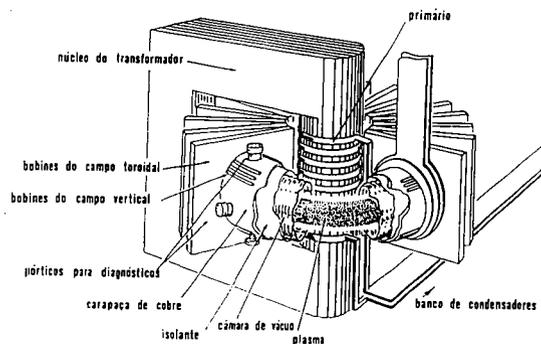


Fig. 1 — Desenho esquemático do IST-TOK.

zação do gás e sistema de controle e aquisição de dados) e os seus diagnósticos (Fig. 2) — sondas magnéticas (Bobine de Rogowski, «loop», bobines seno-coseno, bobine diamagnética e bobines magnetohidrodinâmicas), interferómetro de micro-ondas [3], reflectómetro de frequência fixa [3], sistema de difusão Thomson [4], diagnósticos de raios-X e analisador da deflexão de um feixe iónico [5] — estão a ser projectados e construídos por investiga-

dores, engenheiros e técnicos do Centro de Fusão Nuclear.

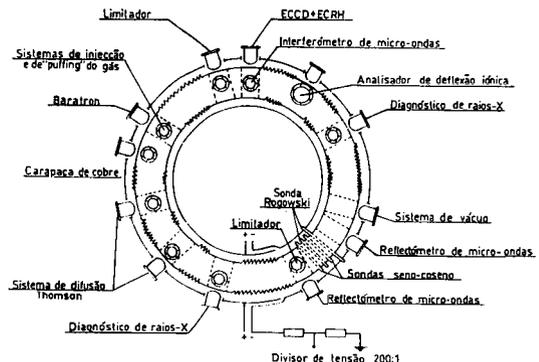


Fig. 2 — Implementação dos diagnósticos do IST-TOK.

## 2. Descrição das componentes principais do IST-TOK

A Fig. 3 apresenta um desenho esquemático das ligações entre as várias componentes do IST-TOK.

A câmara de vácuo, feita em «inconel» com alternância de secções rígidas e finos «bellows» (ligadores elásticos; espessura de 0.15 mm), consiste em dois meios torus (raio maior de 46 cm e raio menor 8.5 cm) separados por um isolante eléctrico.

A câmara de vácuo está rodeada por uma carapaça de cobre com 2 cm de espessura, com a finalidade de suportar a câmara e de estabilizar a posição da coluna de plasma, suprimindo as flutuações com tempos caracte-

<sup>(1)</sup> Comunicação apresentada na «7.ª Conferência Nacional de Física — Física 90».

rísticos menores que o tempo pelicular da carapaça de cobre (2 ms). O invólucro de cobre («copper shell») pode ainda ser usado para aplicar sinais eléctricos ao plasma e para conter um circuito de arrefecimento a água da câmara

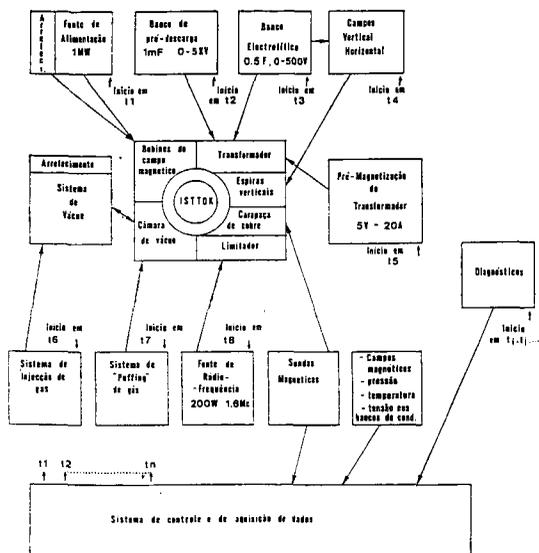


Fig. 3 — Desenho esquemático das ligações entre os vários componentes do IST-TOK.

de vácuo. O «copper shell» está dividido em oito partes por fendas isolantes, nas direcções poloidal e toroidal, de modo a evitar o estabelecimento de correntes originadas pela variação no tempo do campo magnético.

A Fig. 4 representa um desenho esquemático dos sistemas de vácuo e de injeção e de «puffing» do gás (\*). O sistema de vácuo principal é constituído por uma bomba rotativa e por uma bomba turbomolecular, de levitação magnética, com a velocidade de bombeamento de 500 l/s e que possibilita um vácuo final da ordem de  $10^{-8}$  torr. A medição da pressão e o controle do sistema de vácuo são feitos por um manómetro de ionização, que possui um microprocessador e um sistema operativo próprio, compatível com o MS-DOS. A calibração deste sistema é feita com um manómetro de capacidade. A análise dos gases residuais e a detecção de fugas é feita com um terceiro manómetro equipado com um espectrómetro de massa. O sistema de injeção de gás (normalmente hidrogénio, à pressão de trabalho de  $10^{-3}$  torr) é composto por uma válvula pneumática de «on-off» e por uma válvula electro-magnética de controle de fluxo. O «puffing» do gás é feito com uma válvula piezoeléctrica, com tempos mínimos de abertura da ordem do milissegundo.

O transformador possui um núcleo rectangular de ferro, pré-magnetizado com o auxílio

(\*) Permite a emissão isolada de gás, por «sopros» muito curtos.

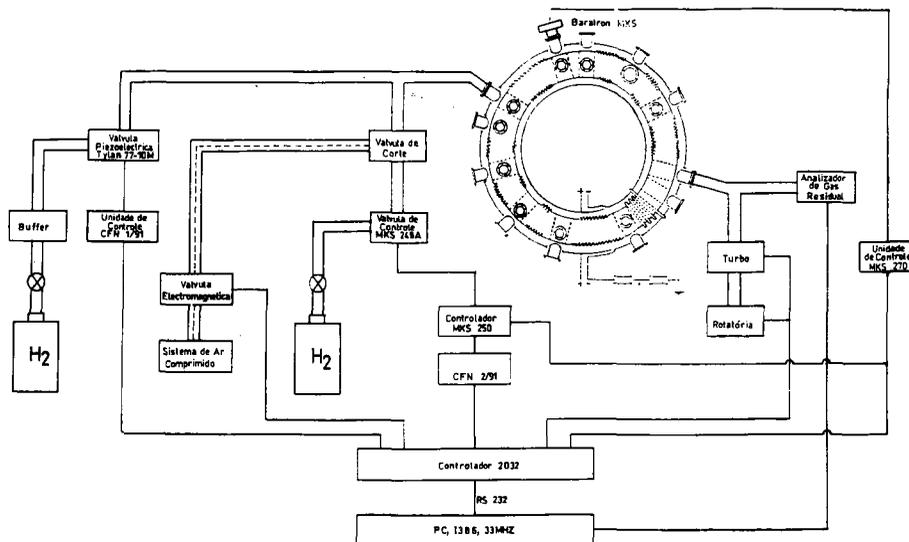


Fig. 4—Desenho esquemático dos sistemas de vácuo e de injeção e de «puffing» do gás.

de uma fonte de alimentação (10 V, 20 A) e de uma grande indutância em série. O primário é constituído por  $2 \times 20$  espiras enroladas no troço central do núcleo. O plasma criado na câmara de vácuo constitui o secundário do transformador.

O campo magnético toroidal é criado por 24 bobinas ( $R=10 \text{ m}\Omega$ ,  $L=1.88 \text{ mH}$ ) arrefecidas a água. Nas condições limites de operação,  $I_t \approx 40 \text{ KA}$ , obtemos um campo da ordem de 3 T. O campo toroidal do IST-TOK é criado pela corrente contínua fornecida por uma fonte, alimentada por uma linha trifásica de 10 kV, 1 MW, constituída por sistemas de transformação dodecafásica e de rectificação por tirístores. Esta fonte fornece correntes com intensidades entre 0 e 8000 A.

ração foi escolhida de modo a evitar a interferência entre a fonte de alimentação e o oscilador e a permitir o uso da mesma fonte de alimentação com várias fontes de rádio-frequência, para variação quer da frequência do oscilador quer da sua potência de saída.

O IST-TOK possui dois bancos de condensadores: um banco de pré-descarga (1 mF, 5 kV) para a criação do plasma e um banco electrolítico (0.5 F, 500 V) para o controle da duração da descarga.

A Fig. 5 apresenta o circuito eléctrico equivalente do IST-TOK.

O sistema de limpeza da câmara, usado para remover as impurezas da parede interior, consiste na injeção de gás durante 2 minutos e no seu bombeamento em 30 segundos, na

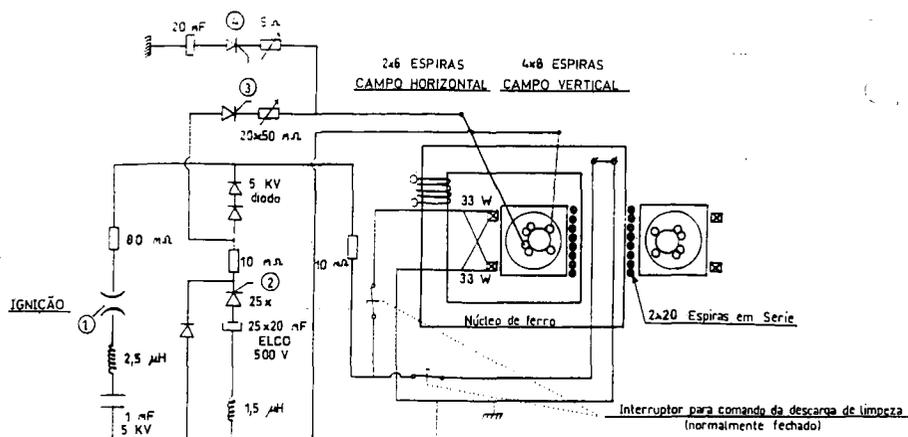


Fig. 5 — Circuito eléctrico equivalente do IST-TOK.

O campo magnético poloidal externo é criado por  $2 \times 6$  espiras (campo horizontal) e por  $4 \times 8$  espiras (campo vertical) localizadas no exterior das bobinas toroidais. Estas espiras estão ligadas a uma secção do banco de condensadores electrolíticos, com um conjunto de resistências em série para controle das intensidades das correntes.

O gerador de rádio-frequência ( $f=1.7 \text{ MHz}$ , 200 W), usado na pré-ionização do gás, é composto por duas unidades de estado sólido, fisicamente separadas: a fonte de alimentação e a fonte de rádio-frequência. Esta configuração

criação de um plasma ténue ( $B_t \approx 0.0375 \text{ T}$ ,  $I_p=100 \text{ A}$ ) e no aquecimento óhmico dos «bellows» e das secções rígidas da câmara. O campo magnético necessário ao funcionamento do sistema de limpeza da câmara é criado por uma fonte de alimentação auxiliar de 500 A, 5 V.

### 3. Operação do IST-TOK

De acordo com o programa científico do «Projecto IST-TOK» [6, 7], este «tokamak»

será operado numa primeira fase em regime indutivo e, numa segunda fase, em regime não indutivo, com geração de correntes por ondas electro-ciclotrónicas.

Em ambos os casos na operação do IST-TOK, controlada automaticamente pelo sistema de controle e de aquisição de dados [8], podemos considerar os seguintes estados:

(i) — Estado de repouso, em que todos os componentes da montagem estão desligados, com excepção dos sistemas de vácuo.

(ii) — Estado de limpeza da câmara, que ocorre durante dois a cinco dias depois de cada abertura da câmara, e uma a duas horas antes de cada sessão de descargas.

(iii) — Estado entre-descargas, onde é verificada a existência do vácuo necessário à descarga ( $p < 10^{-7}$  torr) e em que são inicializados os vários componentes do «tokamak».

(iv) — Estado de pré-descarga, onde os vários componentes são configurados e onde se procede à leitura dos valores eventuais de «off-set» dos conversores analógico-digitais.

(v) — Estado pronto-a-funcionar, em que é verificada a operacionalidade de todos os componentes, confirmadas as condições de segurança (nomeadamente, a não presença de pessoas na área restrita da experiência) e emitidos os sinais sonoros e luminosos indicativos do início de uma descarga.

(vi) — Estado de descarga, onde é realizada a descarga através de um sinal único de «trigger», que dá início à sequência automática de temporização dos vários componentes do «tokamak». Esta operação apenas pode ser efectuada com a confirmação activa de um operador humano, de modo a aumentar o factor de segurança.

(vii) — Estado de pós-descarga, em que é recolhida e compilada toda a informação digitalizada durante a descarga e confirmado o seu aproveitamento através da visualização na consola dos parâmetros mais relevantes da descarga. Esta informação e os dados em bruto são armazenados em dois ficheiros criados em disco, classificados pelo número de ordem, data e hora da descarga.

(viii) — Estado de interrupção, onde, se algo de anormal acontecer durante os estados de pré-descarga, pronto-a-funcionar e de descargas, o sistema de temporização é suspenso e toda a actividade é reconduzida ao estado entre-descargas após a normalização das circunstâncias que produziram a interrupção anormal da descarga.

#### REFERÊNCIAS

- [1] J. WESSON (1987) — «Tokamaks», Clarendon Press, Oxford.
- [2] B. DE GROOT (1988) — «Technical notes of TORTUR», Relatório interno do FOM-Rijnhuizen, Nieuwegein, Holanda.
- [3] A. SILVA, *et al.* (1990) — «Diagnósticos de micro-ondas para o tokamak IST-TOK», Comunicação apresentada à Física-90.
- [4] R. A. VIGÁRIO, *et al.* (1990) — «Thomson scattering no tokamak IST-TOK», Comunicação apresentada à Física-90.
- [5] J. A. MENDANHA DIAS, *et al.* (1990) — «Colisões feixe-plasma/Diagnóstico IST-TOK», Comunicação apresentada à Física-90.
- [6] J. A. C. CABRAL, *et al.* (1989) — «The IST-TOK Project», Relatório Interno do CFN.
- [7] C. A. F. VARANDAS, *et al.* (1990) — «A instalação em Portugal da primeira experiência de fusão nuclear: o tokamak IST-TOK», Comunicação apresentada à Física-90.
- [8] H. FERNANDES, *et al.* (1990) — «Controle de operação e aquisição de dados do tokamak IST-TOK», Comunicação apresentada à Física-90.

# Cosmologia Quântica. I — Uma Introdução Básica (\*)

P. V. MONIZ (1)

Departamento de Física, Faculdade de Ciências de Lisboa  
Universidade de Lisboa, Ed. C1, piso 4, Campo Grande, 1700 Lisboa, Portugal

*Neste trabalho são descritas motivações e algum conteúdo da investigação actual em Cosmologia Quântica. Começando por recordar o formalismo Lagrangiano e Hamiltoniano da mecânica clássica e a correspondente quantificação canónica, aplicamos estes conceitos à teoria da Relatividade Geral. Descrevemos então a quantificação canónica da gravitação de onde resulta a equação de Wheeler-De Witt. De seguida debatemos o problema das condições iniciais e por fim apresentamos algumas considerações sobre a função de onda do (nosso) Universo.*

## 1. Introdução

Este artigo tem como objectivo transmitir ao leitor o que pretende a investigação em Cosmologia Quântica, procurando elucidá-lo e, simultaneamente, motivá-lo a reflectir sobre este importante tema. Se se pretender uma apreciação mais ampla sobre Cosmologia Quântica, as referências [1] e [2] descrevem o formalismo da teoria. Para bons artigos de revisão, pode-se consultar as ref. [3, 4, 5], enquanto que a ref. [6] constitui uma excelente colecção de artigos cruciais no desenvolvimento da Cosmologia Quântica. As ref. [7]-[13] contêm alguns exemplos de aplicação e a ref. [14] é um inventário bibliográfico sobre trabalhos recentes em Cosmologia Quântica.

Começemos por referir que apesar do modelo standard do Big-Bang esclarecer muitas das características e propriedades do Universo que observamos (um Universo *muito aproximadamente* homogéneo e isotrópico), existem muitas outras que não conseguem ser explicadas de uma forma adequada. Entre estas últimas podemos salientar a isotropia do Universo, o facto do Universo ser, *muito aproximadamente*, espacialmente plano e a origem de flutuações na densidade de matéria, necessárias para a origem e formação de galáxias, estrelas e ... de nós próprios!

Os modelos inflacionários (cf. ref. [7, 15, 16]) poderão explicar de uma forma apropriada as propriedades atrás indicadas. Segundo estes modelos, o Universo teve um período de evo-

lução durante o qual se expandiu exponencialmente, aumentando enormemente de tamanho num intervalo de tempo muito pequeno. Desse modo, o *Universo que hoje observamos* representaria apenas uma pequena parte de todo o Universo, na qual as suas propriedades e características (como isotropia e homogeneidade em grandes escalas, planaridade, etc.) seriam consistentes com as fornecidas pela observação. As irregularidades ou perturbações dessas propriedades só existiriam a uma escala maior que a do Universo observável. Esse período inflacionário é causado por um campo escalar  $\Phi$  que transita de um extremo para um mínimo (i.e., um estado de vácuo estável) de um potencial efectivo  $v(\Phi)$ , dando origem a uma transição de fase. É importante referir que na generalidade dos modelos inflacionários os campos de matéria podem estar quantificados mas são definidos num cenário onde o espaço-tempo é ainda encarado de um ponto de vista clássico; por outras palavras, a matéria pode ser quantificada mas a interacção gravitacional é sempre descrita pelas equações de Einstein da Relatividade Geral.

(\*) Investigação parcialmente subsidiada pelo D.F.F.C.U.L.—J.N.I.C.T./C.E.R.N. (Projecto FAE/13-90). Palestra apresentada no curso «Uma Introdução às Cosmologias Modernas», Departamento de Física da F.C.L., Lisboa — Maio-Julho/1991.

(1) Parcialmente subsidiado pela bolsa BD/138/90-RM da J.N.I.C.T.

E-MAIL: FVPMONIZ@PTEARN.BITNET ou FVPMONIZ@FCVAX1.FCL.RCCN.PT

A capacidade explicativa dos modelos inflacionários não é, contudo, inteiramente satisfatória. De facto, nem todas as condições iniciais para os modelos cosmológicos e classes de campos materiais permitem que um período inflacionário ocorra e, mesmo que este ocorra, conduza à necessária isotropização, homogeneização, produção de entropia, etc. Por outras palavras, se por um lado existem condições iniciais que conduzem a uma fase inflacionária (e assim obter um universo homogéneo e isotrópico como o nosso), por outro, existem também condições iniciais que dão origem a modelos do universo totalmente *diferentes* daquele onde vivemos! A questão das condições iniciais surge assim em Cosmologia de um modo natural, como algo importante para entendermos melhor a evolução do nosso Universo. Essa questão constitui também o motivo principal para a investigação actual em Cosmologia Quântica

De facto, ao recuarmos no tempo em direcção à *criação* ou *início* do Universo, percorremos várias épocas onde as diferentes interacções existentes na natureza vão sendo sucessivamente unificadas no contexto de uma teoria quântica: a unificação da interacção electromagnética com a interacção fraca (o modelo de Glashow-Weinberg-Salam), a unificação da interacção forte nuclear com as interacções electro-fracas (as Teorias de Grande Unificação), e por fim (espera-se...) a unificação de todas as interacções não gravitacionais com a gravitação. Isso poderá ocorrer no contexto de uma teoria quântica da gravitação, que não está ainda formulada de uma forma completa e consistente. Por sua vez, a aplicação da gravitação quântica a modelos cosmológicos traduz-se na *Cosmologia Quântica*. A Cosmologia Quântica é pois a estrutura adequada para se estudar a questão das condições iniciais e da *criação* do Universo, permitindo simultaneamente testar as várias propostas de teorias de quantificação da gravitação, uma vez que estas têm que ser consistentes com o Universo observado actualmente.

O trabalho aqui exposto está organizado do seguinte modo. Na secção 2 começamos por apresentar um breve resumo sobre o que é a

quantificação canónica de um sistema físico (cf. ref. [17, 18]), tendo como objectivo a sua aplicação à teoria da Relatividade Geral. Nesse sentido, introduz-se o formalismo de *ADM* (Arnowitt-Deser-Misner) a partir do qual é possível construir uma formulação hamiltoniana da Relatividade Geral (cf. ref. [15, 19, 20]). Em seguida, e de forma semelhante à quantificação canónica de sistemas físicos mais simples, descrevemos a quantificação canónica da gravitação na qual a equação de Wheeler-De Witt desempenha um papel análogo à equação de Schrödinger da mecânica quântica. Esta parte é tecnicamente muito ingrata pelo que se optou por descrever apenas o essencial. Para mais detalhe devem-se consultar as referências indicadas na bibliografia final. Na secção 3 apresentamos a formulação do problema das condições iniciais e a proposta de Hartle-Hawking (cf. ref. [3]-[10]) para a função de onda do Universo. Também são mencionados alguns pormenores respeitantes à resolução da equação de Wheeler-De Witt e análise das suas soluções. Na secção 4 são apresentadas algumas considerações finais sobre este trabalho.

É importante referir que este trabalho não constitui um inventário enciclopédico nem contém nada de original que não esteja referido na bibliografia final. É um trabalho de divulgação sobre um aspecto particular da investigação científica actual. Usa-se dimensões em que  $c = \hbar = 8\pi G = 1$ , sendo  $c$  a velocidade da luz,  $\hbar = h/2\pi$  ( $h$  é a constante de Planck), e  $G$  é a constante gravitacional. Este procedimento é usual em trabalhos sobre Relatividade Geral e Teoria Quântica de Campos (ver ref. [19] para uma melhor compreensão).

## 2. Quantificação Canónica da Gravitação:

### 2.1. Formalismo Usual de Mecânica Quântica

Como quantificar a Gravitação? Apesar de esta ser uma pergunta ainda sem uma resposta definitiva, existem já algumas tentativas para a obter de um modo consistente. Talvez a maneira mais directa (e mais acessível para se compreender as dificuldades existentes) seja a quantificação canónica.

Para melhor entender em que consiste e como é feita a quantificação canónica da gravitação (no contexto da teoria da Relatividade Geral), é conveniente recordar, muito resumidamente, como se obtém a quantificação canónica de um sistema físico simples no contexto usual da Mecânica Quântica. Começamos por determinar os graus de liberdade de um sistema descrito classicamente, identificando-os como coordenadas generalizadas,  $q^j$ , ( $j=1,2,\dots$ ). Com as coordenadas generalizadas e as suas derivadas em relação à variável temporal construímos um objecto que designamos por Lagrangiano e que representamos formalmente por

$$L \left( q^j, \frac{dq^j}{dt}, t \right) \equiv \tau \left( \frac{dq^j}{dt}, t \right) - \nu(q^j, t),$$

onde  $\tau$  e  $\nu$  são, respectivamente, a energia cinética e potencial do sistema. A importância deste formalismo reside no facto de que as equações que determinam a dinâmica do sistema físico coincidem com as equações para os extremos do integral no tempo do Lagrangiano, usualmente designado de *Accção*:

$$\int_{t_{in}}^{t_f} dt L \left( q^j, \frac{dq^j}{dt}, t \right).$$

Analogamente ao formalismo Lagrangiano, a dinâmica do sistema pode também ser analisada através de outro formalismo, designado de formalismo Hamiltoniano. Neste formalismo a dinâmica é descrita, não pelas variáveis  $q^j, \frac{dq^j}{dt}$ , mas sim em termos das variáveis  $q^j$  e  $\pi_j$ , onde as variáveis  $\pi_j$  são designadas de momentos canonicamente conjugados das variáveis  $q^j$  e são definidos por

$$\pi_j \equiv \frac{\partial L \left( q^j, \frac{dq^j}{dt}, t \right)}{\partial (dq^j/dt)}. \quad (1)$$

Neste novo formalismo define-se um objecto designado por Hamiltoniano através da relação:

$$H[q^j, \pi_j, t] = \sum_k \pi_k \frac{dq^k}{dt} - L \left( q^j, \frac{dq^j}{dt}, t \right), \quad (2)$$

sendo as equações dinâmicas obtidas no formalismo Hamiltoniano equivalentes às que são

obtidas através do formalismo Lagrangiano.

O processo de quantificação canónica requere então a introdução dos seguintes postulados:

- O estado de um sistema físico é descrito por uma função  $\Psi$  (usualmente chamada de *função de onda*), que depende das coordenadas generalizadas do sistema e do tempo.
- Toda a grandeza física mensurável é descrita por um operador *hermítico* (cf. ref. [17]) que actua em  $\Psi$ .
- A evolução no tempo da função de onda é dada pela equação de Schrödinger

$$\widehat{H}(t) \Psi(q^j, t) = i \frac{\partial \Psi(q^j, t)}{\partial t} \quad (3)$$

onde  $\widehat{H}(t)$  representa o *operador* Hamiltoniano e  $i \equiv \sqrt{-1}$ .

Em termos axiomáticos, procedemos à identificação

observáveis físicos  $\longleftrightarrow$  operadores

$$\begin{aligned} q^j &\longleftrightarrow \hat{\pi}_j = -i \frac{\partial}{\partial q^j} \\ \pi_j &\longleftrightarrow \hat{q}^j = q^j \end{aligned} \quad (4)$$

Ao substituírmos as grandezas físicas pelos respectivos operadores, o Hamiltoniano do sistema transforma-se no operador Hamiltoniano  $\widehat{H}$ . Aplicando este operador Hamiltoniano à função de estado  $\Psi$  e igualando a expressão obtida a  $i\partial\Psi/\partial t$  obtemos a equação de Schrödinger (3). As soluções da equação de Schrödinger são funções que descrevem a evolução do estado físico do sistema.

## 2.2. Geometria do Espaço-Tempo e o Tensor da Métrica

Consideremos o sistema físico que descreve a interacção gravitacional. Do ponto de vista clássico, a teoria que melhor descreve e explica a gravitação é a teoria da Relatividade Geral, formulada por Albert Einstein e que consiste numa formulação geométrica da interacção gravitacional. Essa geometria é respeitante não ao espaço tridimensional de que nos apercebemos no dia a dia mas ao contínuo quadri-

dimensional do espaço  $e$  de tempo em que vivemos. O objecto que descreve, basicamente, essa geometria é o *tensor da métrica*, o qual caracteriza as «distâncias» no espaço-tempo.

Estas noções podem ser facilmente introduzidas por meio do espaço Euclidiano a duas dimensões. A distância espacial  $ds$  entre dois pontos  $P_1$  e  $P_2$  de coordenadas, respectivamente,  $[x(1), y(1)]$  e  $[x(2), y(2)]$ , é dada por

$$(ds)^2 = (dx)^2 + (dy)^2,$$

onde  $dx = x(2) - x(1)$  e  $dy = y(2) - y(1)$ . Ora isto não é mais que o teorema de Pitágoras no espaço plano bidimensional. A expressão anterior também pode ser reescrita como

$$(ds)^2 = \sum_{j, k=1}^2 h_{jk} dx^j dx^k \equiv h_{jk} dx^j dx^k$$

onde se definiu que  $h_{11} = h_{22} = 1$ ,  $h_{12} = h_{21} = 0$  e  $dx \equiv dx^1$  e  $dy \equiv dx^2$ . O termo  $h_{jk}$  é designado de *tensor da métrica* e descreve a geometria do espaço Euclidiano a duas dimensões. Note-se que a partir daqui adopta-se a *convenção de Einstein*, segundo a qual a repetição de um índice no mesmo monómio subentende uma soma de parcelas, em que esse índice varia de 1 a  $n$ , sendo  $n$  a dimensão do espaço. A convenção exige assim que o índice repetido apareça em cada monómio apenas duas vezes. A geometria do espaço-tempo é descrita em termos semelhantes mas não iguais. Em particular, a distância (também designada por intervalo entre dois pontos do espaço-tempo) pode ser positiva, negativa ou nula, e o espaço-tempo pode possuir *curvatura*. Para grande parte dos modelos

$$(ds)^2 = - (dt)^2 + h_{jk}(x^m, t) dx^j dx^k, \\ (j, k, m = 1, 2, 3),$$

e no caso mais geral escrevemos

$$(ds)^2 \equiv g_{\mu\nu}(x^\alpha) dx^\mu dx^\nu, \quad (\alpha, \mu, \nu = 0, 1, 2, 3).$$

Aqui  $h_{ij}(x^m)$  representa o tensor da métrica espacial,  $g_{\mu\nu}(x^\alpha)$  é o tensor da métrica do espaço-tempo quadridimensional e  $dt \equiv dx^0$ .

### 2.3. Formalismo de ADM

A seguir ao que foi exposto, avancemos para a quantificação canónica da gravitação, a qual pressupõe uma formulação Hamiltoniana da teoria da Relatividade Geral. No entanto, esta formulação levanta algumas questões importantes. Noutras teorias da física clássica, o objectivo do formalismo Hamiltoniano (ou Lagrangiano) consiste em determinar a evolução no tempo de variáveis que caracterizam o sistema físico, a partir dos seus valores iniciais. Contudo, em Relatividade Geral o nosso sistema físico é o próprio espaço-tempo, isto é, inclui o próprio tempo! Quais devem então ser as variáveis que permitirão, num formalismo Hamiltoniano da Relatividade Geral, determinar a *estrutura* do espaço-tempo? O formalismo de ADM fornece uma resposta.

O formalismo de ADM corresponde a uma decomposição da geometria do espaço-tempo que permite determinar os graus de liberdade referentes à interacção gravitacional. Consideremos a figura 1. As duas *hipersuperfícies* espaciais  $\Sigma_{t_0}$  e  $\Sigma_{t_0+dt}$ , que consideramos muito próximas uma da outra, permitem formar uma «sandwich» de geometria quadridimensional; isto é, temos uma geometria tridimensional em cada uma das duas faces de um pedaço de espaço-tempo quadridimensional. As linhas  $(t, x_0^i)$  e  $(t, x_0^i + dx^i)$  representam as trajectórias no espaço-tempo de dois observadores em

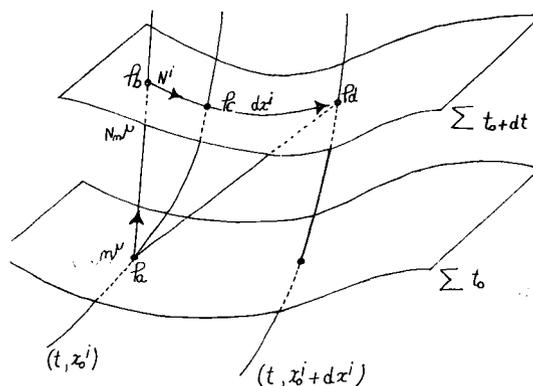


Fig. 1—Representação da geometria do espaço-tempo através do formalismo de ADM. Uma dimensão espacial não está representada.

repouso relativo (isto é, as suas separações espaciais relativas  $dx^i$  não se alteram). Mas como caracterizar o intervalo de espaço-tempo invariante entre os pontos  $P_a(t_0, x^i)$  e  $P_a(t_0 + dt, x^i + dx^i)$  no contexto atrás descrito? Um modo de o fazer é explicado a seguir. Considere-se o ponto  $P_a(t_0; x^i)$  pertencente a  $\Sigma_{t_0}$  e defina-se um quadrivector,  $n^\mu$ , ortonormal a  $\Sigma_{t_0}$  e  $P_a(t_0, x^i)$ . Existe então um valor  $N$  tal que o quadrivector  $N n^\mu dt$  intersecta  $\Sigma_{t_0+dt}$ . Seja  $P_b(t_0 + dt, x')$  o ponto de intersecção. Então  $N$  dá-nos uma medida da separação entre  $P_a(t_0, x^i)$  e  $P_b(t_0 + dt, x')$ . A função  $N$  designa-se de *função de lapso*. Mas em geral, o ponto  $P_b(t_0 + dt, x')$  possui coordenadas espaciais diferentes das de  $P_a(t_0, x^i)$ . Seja  $P_c(t_0 + dt, x^i)$  o ponto de  $\Sigma_{t_0+dt}$  com as mesmas coordenadas espaciais que o ponto  $P_a(t_0, x^i)$  em  $\Sigma_{t_0}$ . Então o vector que liga  $P_b(t_0 + dt, x')$  a  $P_c(t_0 + dt, x^i)$  define o *vector de deslocamento*  $N^i$ . Fisicamente,  $N^i$  pode ser interpretado como o desvio ou distorção das linhas  $x^i = \text{constante}$  relativamente à normal  $n^\mu$ .

Após o parágrafo anterior, a interpretação da figura 1 deve estar mais clara. Vemos assim que a geometria quadridimensional pode ser expressa em termos da *função de lapso*,  $N$ , do *vector de deslocamento*,  $N^i$ , e da *geometria tridimensional*, através da métrica espacial,  $h_{jk}$ . Ou dito de outro modo, a geometria do espaço-tempo quadridimensional pode ser vista como representando uma *evolução* das geometrias das hipersuperfícies tridimensionais. Isso significa que as métricas espaciais,  $h_{ij}$ , podem ser usadas como *graus de liberdade* (ou *variáveis dinâmicas*) do sistema. Em consequência, a função de lapso,  $N$ , e o vector de deslocamento,  $N^i$ , constituirão *apenas* um modo de descrever a evolução no tempo e não devem ser vistos como variáveis dinâmicas. São portanto funções arbitrárias. Assim, o intervalo de espaço-tempo invariante entre os pontos  $P_a(t_0, x^i)$  e  $P_a(t_0 + dt, x^i + dx^i)$  que pertencem a duas hipersuperfícies muito próximas, é dada por

$$(ds)^2 = \left( \begin{array}{c} \text{distância} \\ \text{espacial} \\ \text{na geometria} \\ \text{tridimensional} \end{array} \right)^2 - \left( \begin{array}{c} \text{intervalo de} \\ \text{tempo entre as} \\ \text{duas geometrias} \\ \text{tridimensionais} \end{array} \right)^2,$$

que em termos mais formais se escreve

$$ds^2 = - (N dt)^2 + h_{jk}(dx^j + N^j dt) \times (dx^k + N^k dt). \quad (5)$$

Comparando com a expressão geral  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ , podemos obter

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -(N^2 - N_k N_l h^{kl}) & N_j \\ N_j & h_{jk} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

#### 2.4. Formalismo Hamiltoniano da Relatividade Geral

O formalismo *ADM* indica então que as variáveis dinâmicas em Relatividade Geral que permitirão, num formalismo Hamiltoniano, determinar a *estrutura* do espaço-tempo são o tensor da métrica espacial,  $h_{ij}$ . Para melhor compreendermos como o formalismo *ADM* nos permite estabelecer uma estrutura adequada, é preciso salientar que as equações de Einstein na ausência de matéria (equações com derivadas parciais de segunda ordem não lineares e acopladas) podem ser obtidas de uma *densidade Lagrangiana*, dada por

$$L_{gr}(g_{\mu\nu}) = \frac{\sqrt{-g}}{2} R, \quad (7)$$

onde  $R$  é a curvatura escalar de Ricci. A expressão *densidade Lagrangiana* significa que os graus de liberdade já não formam um conjunto discreto e em número finito mas que são descritas por funções, o que é equivalente a dizer que se tem um conjunto com um número infinito de graus de liberdade. A curvatura escalar de Ricci é uma grandeza escalar matemática que permite avaliar a curvatura de um espaço. Sucede que  $R$  possui derivadas de *segunda ordem* do tensor da métrica. Contudo, se usarmos a expressão (6) para o tensor da métrica  $g_{\mu\nu}$  podemos reescrever a expressão (7) na forma equivalente

$$L_{gr}(N, N^i, h_{jk}) = \frac{\sqrt{hN}}{2} [K^2 - K_{jk} K^{jk} - {}^{(3)}R], \quad (8)$$

onde  $g = \sqrt{hN}$  é o determinante de  $g_{\mu\nu}$ , com  $\sqrt{h} = \det(h_{jk})$ ,  ${}^{(3)}R$  é a curvatura das hipersuperfícies espaciais tridimensionais  $\Sigma_t$ , calculada

a partir de  $h_{jk}$ , à semelhança de  $R$ , e  $K_{jk}$  é designada de curvatura *extrínseca* (mede a curvatura das hipersuperfícies espaciais  $\Sigma_t$ , relativamente à geometria quadridimensional onde estão imersas). Sobre o cálculo de (8) consulte-se as ref. [2, 19, 20]. O importante a referir aqui é que a expressão (8) só depende de  $N$ ,  $N^i$ ,  $h_{ij}$  e primeiras derivadas destas quantidades. Isso é fundamental para se passar sem problemas ao formalismo Hamiltoniano.

Os momentos canonicamente conjugados de  $N$ ,  $N^i$ ,  $h_{jk}$  são, respectivamente,

$$\pi \equiv \frac{\partial L}{\partial \dot{N}} = 0, \quad (9)$$

$$\pi_j \equiv \frac{\partial L}{\partial \dot{N}^j} = 0, \quad (10)$$

$$\pi^{jk} \equiv \frac{\partial L}{\partial \dot{h}_{jk}} = \frac{\sqrt{\hbar}}{2} (h^{jk} K - K^{jk}), \quad (11)$$

onde o ponto «  $\cdot$  » sobre as variáveis representa a derivação destas relativamente ao tempo. Uma vez que  $\pi = \pi^j = 0$ , concluímos que  $N$  e  $N^j$  não são variáveis dinâmicas e as equações (9), (10) constituem assim ligações — designadas de ligações primárias — a que devem satisfazer as variáveis do nosso sistema. No caso da Relatividade Geral, a utilização do formalismo *ADM* permite escrever como Hamiltoniano para o campo gravitacional

$$H_{gr} = \int d^3x (\pi^{jk} \dot{h}_{jk} + \pi^j \dot{N}_j + \pi \dot{N} - L_{gr}(N, N^i, h_{jk})) \\ - \int d^3x (N H_G + N_j H^j), \quad (12)$$

onde  $H_G$  é dado por

$$H_G = G_{ijkl} \pi^{ij} \pi^{kl} - \frac{^{(3)}R \sqrt{\hbar}}{2}, \quad (13)$$

e  $G_{ijkl}$  é definido por

$$G_{ijkl} = \frac{1}{\sqrt{\hbar}} (h_{ik} h_{jl} + h_{il} h_{jk} - h_{ij} h_{kl}). \quad (14)$$

A forma particular do termo  $H^j$  não é importante no contexto deste trabalho. Adiante, apenas referiremos quais as consequências físicas da presença do termo  $H^j$ . Uma vez que  $\dot{\pi} = \dot{\pi}^i = 0$  constituem condições que

devem ser sempre satisfeitas para qualquer instante de tempo, devemos também escrever que  $\dot{\pi} = \dot{\pi}^i = 0$ . Por outro lado, das equações dinâmicas do formalismo Hamiltoniano, obtemos que

$$\dot{\pi}^j = - \frac{\delta H_{gr}}{\delta N} = 0, \quad (15)$$

$$\dot{\pi}^i = - \frac{\delta H_{gr}}{\delta N^i} = 0, \quad (16)$$

pelo que é então possível concluir da expressão (12) que

$$H_G = H^j = 0. \quad (17)$$

Os resultados (17) constituem condições ou ligações *secundárias*. A condição  $H^j = 0$  representa, em termos simples, a invariância do formalismo *ADM* da Relatividade Geral relativamente a transformações gerais de coordenadas nas hipersuperfícies  $\Sigma_t$ . Por outras palavras, a formulação assim construída depende apenas da geometria tridimensional e não de uma escolha particular do tensor  $h_{jk}$  ou da escolha de coordenadas; a teoria é a mesma para a classe de variáveis  $\{h_{jk}\}$  relacionadas por transformações gerais de coordenadas definidas nas hipersuperfícies espaciais tridimensionais. Por seu lado, a ligação  $H_G = 0$  está relacionada com a invariância relativamente a reparametizações no tempo que a teoria assim formulada possui. Se incluirmos campos materiais, a ligação  $H_G = 0$  é generalizada por

$$H[h_{jk}, \pi_{jk}, \Phi, \pi_\Phi] = H_G[h_{jk}, \pi_{jk}] + \\ + H_{matéria}[\Phi, \pi_\Phi] = 0, \quad (18)$$

onde  $\pi_\Phi$  são os momentos canonicamente conjugados dos campos materiais  $\Phi$ .

## 2.5. Equação de Wheeler-De Witt

A partir das equações (13), (14) e (18) prossigamos na direcção da quantificação canónica da gravitação. Recordemos que o estado quântico de um sistema físico é representado por uma função  $\Phi$  que depende das variáveis que descrevem os graus de liberdade desse

sistema físico. Aqui, no caso da gravitação descrita pela teoria da Relatividade Geral, fazemos algo semelhante. Contudo, é importante salientar o seguinte aspecto. Na descrição Hamiltoniana a Relatividade Geral é uma teoria com constrangimentos (ou ligações). Ao pretender-se quantificar a gravitação de uma forma canónica, há que respeitar essas ligações. Isto quer dizer que aos constrangimentos clássicos têm que corresponder equações quânticas. Concretamente, e de acordo com o processo de quantificação canónica, procedemos à identificação

$$\pi^{jk} \leftrightarrow -i \frac{\delta}{\delta h_{jk}}, \quad (19)$$

$$\pi_{\Phi} \leftrightarrow -i \frac{\delta}{\delta \Phi}. \quad (20)$$

Substituindo (19) e (20) na equação (18) obtemos então

$$\widehat{H}\Psi[h_{ij}, \Phi] = 0. \quad (21)$$

A equação (21) é uma equação diferencial funcional de segunda ordem designada de equação de Wheeler-De Witt. A função de onda do Universo,  $\Psi[h_{ij}, \Phi]$ , é definida num espaço designado de *Super-Espaço*: o conjunto de todas as geometrias espaciais tridimensionais e dos campos materiais definidos nas hiper-superfícies espaciais tridimensionais. A equação de Wheeler-De Witt fornece a informação relativa à dinâmica quântica da função de onda do Universo.

Sucedo contudo que a equação de Wheeler-De Witt é uma equação diferencial funcional de segunda ordem definida no *Super-Espaço*, o qual tem dimensão infinita! A sua resolução torna-se pois impraticável. Uma alternativa consiste em reduzir os graus de liberdade do sistema, isto é, procurar sistemas mais simples e com mais simetrias que possam ser descritos com um número *finito* de graus de liberdade. Este procedimento é designado de *aproximação do Mini-Super-Espaço*, através do qual é possível obter várias soluções da equação de Wheeler-De Witt para esses sistemas, isto é, funções de onda do Universo. Nas referências [3]-[11], [12, 13] pode-se encontrar uma

análise detalhada sobre a aproximação do *Mini-Super-Espaço* e das funções de onda do Universo resultantes dessa aproximação.

Contudo, deve ser salientado que possuir uma equação para a função de onda do Universo dá tanta informação relativamente ao estado quântico do Universo como a equação de *Schrödinger* fornece a evolução quântica de um sistema físico. De facto, a equação de *Schrödinger* admite muitas soluções. Identificar qual delas é a que descreve o nosso sistema físico requer a especificação de um estado inicial do sistema. Para a equação de Wheeler-De Witt a situação é semelhante. O próximo tópico será pois a introdução das «condições iniciais» do formalismo atrás descrito.

### 3. Problema das condições iniciais

A equação de Wheeler-De Witt possui inúmeras soluções. Qualquer função de onda  $\Psi$  que satisfaça a equação de Wheeler-De Witt descreve um *possível* estado quântico do Universo. Em qualquer tentativa de aplicar a mecânica quântica a todo o Universo há que especificar as condições iniciais e testar algumas das suas soluções. Isto é muito importante pois possibilita determinar o comportamento quântico do Universo. Um estado de particular importância em todo este contexto é o estado *fundamental* ou de *excitação mínima*.

O estado fundamental de uma teoria quântica pode ser também construído a partir de um formalismo equivalente à quantificação canónica: o formalismo do *integral de caminho* (do inglês «*path integral*»). A importância desse método consiste em que as condições iniciais impostas às soluções da equação de Wheeler-De Witt são traduzidas em restrições à classe de variáveis que compõe o integral de caminho.

O leitor, contudo, ter-se-á sentido confuso após estes últimos parágrafos: referiu-se a necessidade de resolver a equação de Wheeler-De Witt como um problema de condições iniciais (no quadro da quantificação canónica) mas, ao invés, a função de onda do Universo pode ser obtida através do formalismo de inte-

gral de caminho. Os dois formalismos são, no entanto, equivalentes e a função de onda do Universo obtida através do formalismo de integral de caminho é solução da equação de Wheeler-De Witt (21). O que sucede é que equação de Wheeler-De Witt é muito difícil de resolver de forma exacta, pelo que se recorre ao formalismo do integral de caminho para obter a função de onda do Universo. Em muitos casos práticos os dois métodos (resolução da equação de Wheeler-De Witt e integral de caminho) são utilizados em conjunto, pois só assim se obtém uma informação mais detalhada sobre o comportamento quântico do Universo.

A formulação da Mecânica Quântica através do método de integral de caminho é baseada na noção de *propagador*: se  $\varphi(q_{in}, t_{in})$  é a função de onda de uma partícula na posição  $q_{in}$ , no instante  $t_{in}$ , então a função de onda da partícula na posição  $q_f$ , no instante  $t_f$ , é dada por

$$\varphi(q_f, t_f) = \int G(q_f, t_f; q_{in}, t_{in}) \varphi(q_{in}, t_{in}) dq_{in}.$$

O objecto  $G(q_f, t_f; q_{in}, t_{in})$  é designado de *propagador* e fornece a amplitude de probabilidade de que ocorra uma transição da partícula no estado caracterizado pela posição  $q_{in}$ , no instante  $t_{in}$ , para o estado com posição final  $q_f$ , no instante  $t_f$ .

A informação quântica está contida no propagador  $G(q_f, t_f; q_{in}, t_{in})$ . Na formulação canónica, dada uma função de onda inicial, encontramos a função de onda final resolvendo a equação de *Schrödinger*. Na formulação do integral de caminho, o propagador dá a solução directamente. O passo seguinte (que aqui é apenas mencionado e não descrito pois isso equivaleria a um outro artigo) consiste em escrever o propagador como um integral, calculado ao longo de todas as trajectórias possíveis que liguem o estado inicial ao estado final do sistema: o integral de caminho. Para uma melhor compreensão deste assunto pode-se consultar as ref. [2, 3, 21].

No que diz respeito ao nosso caso (a Cosmologia Quântica) começemos por representar a amplitude de probabilidade de transi-

ção (propagador) de um estado do Universo,  $|h'_{ij}, \Phi'\rangle$ , caracterizado por um tensor da métrica espacial  $h'_{ij}$  e por campos materiais  $\Phi'$ , correspondentes a uma hipersuperfície espacial  $\Sigma_1$ , para outro estado  $|h''_{ij}, \Phi''\rangle$  caracterizado por um tensor da métrica espacial  $h''_{ij}$  e por campos materiais  $\Phi''$ , correspondente a uma outra hipersuperfície  $\Sigma_2$ , como

$$G(h''_{ij}, \Phi''; h'_{ij}, \Phi'). \quad (22)$$

A função de onda do Universo do estado de excitação mínima pode então ser escrita a partir do formalismo de integral de caminho atrás mencionado (ver ref. [3]) como

$$\Psi[h^{(f)}, \Phi^{(f)}] = \int \delta[g_{\mu\nu}] \delta[\Phi] G(g_{\mu\nu}, \Phi). \quad (23)$$

A soma é tomada na classe de trajectórias do *Super-Espaço* que consistem em métricas quadridimensionais  $g_{\mu\nu}$  e campos de matéria  $\Phi$  limitadas pelo argumento da função de onda  $\Psi$ , isto é, as trajectórias são limitadas pelos valores dos respectivos campos nas duas hipersuperfícies, uma inicial  $\Sigma_i$  e uma final  $\Sigma_f$ . Na hipersuperfície inicial  $\Sigma_i$ , os campos  $g_{\mu\nu}$  e  $\Phi$  devem satisfazer certas condições iniciais, designadas de  $C$ , e devem também coincidir com os campos  $h^{(i)}, \Phi^{(i)}$  definidos na hipersuperfície final  $\Sigma_f$ . O termo  $G(g_{\mu\nu}, \Phi)$  representa o propagador, i.e., a amplitude de probabilidade para uma transição até ao estado caracterizado por  $\{h^{(f)}, \Phi^{(f)}\}$ .

#### Função de onda do (nosso) Universo

Especificar os estados cosmológicos que compõem a classe  $C$  corresponde a especificar «condições iniciais» (mais exactamente, condições de fronteira) para a equação de Wheeler-De Witt, a partir da qual se determina uma solução particular. Uma questão que surge naturalmente é a de como especificar a classe  $C$  de modo a  $\Psi[h^{(f)}, \Phi^{(f)}]$  representar o estado fundamental do nosso Universo, descrito por uma solução da equação de Wheeler-De Witt.

Muitas propostas têm sido feitas mas vamos aqui destacar apenas uma, a proposta de

Hartle-Hawking (cf. ref. [3, 8]), uma vez que é a que tem sido mais estudada e (por isso) mais divulgada. Quanto a outras propostas, consulte-se também a ref. [9]. A proposta de Hartle-Hawking refere-se a universos fechados, onde se assume que o estado fundamental (estado de excitação mínima) corresponde à noção clássica de uma geometria de elevada simetria, como é o Universo em que vivemos. Nessa proposta as condições iniciais  $C$  correspondem a assumir que a única fronteira existente é a hipersuperfície  $\Sigma_f$  o que implica que no integral de caminho a soma seja feita sobre todas as geometrias em espaço-tempos quadridimensionais compactos; um exemplo de um espaço compacto é a superfície de uma esfera. Isso significa que o Universo não tem fronteiras no espaço e no tempo. Assim a função de onda do Universo para uma dada geometria tridimensional, identificada com  $h_{ij}^{(f)}$  e campos materiais  $\Phi^{(f)}$ , é fornecida pela expressão (23), sendo a soma efectuada para a classe de todas as métricas quadridimensionais  $g_{\mu\nu}$  compactas e campos materiais  $\Phi$ , cujo limite final corresponde ao estado caracterizado por  $h_{ij}^{(f)}, \Phi^{(f)}$ . Nesse caso a função de onda  $\Psi[h_{ij}^{(f)}, \Phi^{(f)}]$  pode ser interpretada como a amplitude de probabilidade para que o Universo possua uma geometria tridimensional caracterizada por  $h_{ij}^{(f)}$  e por campos materiais  $\Phi^{(f)}$  nela definidos, a partir de uma situação em que a geometria tridimensional e a matéria são inexistentes, isto é, a criação do Universo a partir do *nada*.

Ao finalizar, refira-se algumas consequências importantes (e curiosas) que podemos extrair da Cosmologia Quântica. Em primeiro lugar é importante salientar que as condições iniciais impostas à função de onda do Universo através da equação de Wheeler-De Witt conduzem a condições iniciais para as equações clássicas da Relatividade Geral. Quer dizer que o Universo, como sistema físico, possui uma natureza quântica e o espaço-tempo clássico é um limite especificado pelas propriedades da função de onda do Universo.

Uma consequência muito importante da proposta de Hartle-Hawking é que permite

obter uma dinâmica quântica do Universo até um estado onde o processo inflacionário ocorre satisfatoriamente (cf. ref. [3]-[10], [12]), permitindo também obter um espectro adequado de perturbações da densidade de matéria do Universo que possibilita a formação de galáxias (cf. ref. [11]).

É importante também salientar que a função de onda do Universo  $\Psi[h_{ij}, \Phi]$  não depende do tempo. Basta comparar a equação de Wheeler-De Witt (21) com a equação de *Schrödinger* (3). A não dependência do tempo por parte de  $\Psi[h_{ij}, \Phi]$  é apenas uma consequência da invariância da teoria da Relatividade Geral em relação a transformações gerais de coordenadas, pois o tempo, nesse contexto, é apenas um índice ou uma coordenada. Mas como é que este facto é consistente com o nosso *Universo observável* depender do tempo? O universo como um *todo* não depende do tempo pois se assim fosse teria que existir uma estrutura (*entidade*) imutável exterior ao próprio Universo e relativamente à qual o *Universo* evoluiria: por Universo queremos representar o *todo* que existe. Só quando separamos o Universo em duas partes *Macroscópicas* (um observador e um *Universo observado*) é que faz sentido em falar na evolução do Universo que observamos relativamente aos nossos instrumentos de medida.

#### 4. Considerações Finais

Um dos propósitos deste trabalho é possibilitar uma informação sobre o conteúdo da Cosmologia Quântica a uma classe vasta de pessoas, na qual encontremos desde o(a) aluno(a) dos primeiros anos de Universidade até ao professor(a) Universitário que trabalhe num domínio (aparentemente) diferente da Cosmologia Quântica.

Não é fácil explicar de uma forma breve e concisa toda uma série de conceitos de Física e de Matemática que são imprescindíveis a uma teoria como a Cosmologia Quântica, sobretudo procurando abranger uma classe tão diversificada. É óbvio que alguns desses con-

ceitos são já conhecidos e quase triviais para algumas pessoas enquanto que para outros são uma grande complicação!

Mas esse é um risco que este trabalho incluiu. Optou-se por oferecer uma visão global sobre o tema da Cosmologia Quântica (e por isso mesmo só aproximada), mas também se forneceu, em alguns pontos, uma descrição mais pormenorizada (mas acessível) que permita ao leitor interessado iniciar um estudo mais orientado. Conforme se terá também constatado, a Cosmologia Quântica é uma teoria muito complexa que corresponde a um desenvolvimento da teoria da Relatividade Geral e da teoria Quântica de Campos. É contudo uma teoria ainda em evolução e por isso não completa. Muitos aspectos da investigação recente ficaram por desvendar mas tópicos como a *terceira quantificação*, *wormholes*, o *googolplexus* irão ser objecto de outra publicação [22].

A terminar, gostaria de agradecer ao Dr. Luis Garay (CSIC, Madrid) e aos Professores A. Barroso, O. Bertolami, P. Crawford, A. B. Henriques, J. M. Mourão e F. D. Santos pelos muitos comentários e sugestões que fizeram a este trabalho. Estou particularmente grato ao Professor J. M. Mourão por todo o apoio e empenho que nele sempre manifestou e ao Prof. P. Crawford por me ter convidado a apresentar este trabalho no ciclo de palestras «Introdução às Cosmologias Modernas», que decorreu entre Maio-Julho/1991 no Departamento de Física da F.C.L.

#### REFERENCES

- [1] K. KUCHAR — «*Canonical Methods of Quantization*», *Quantum Gravity 2*, (eds.) C. J. Isham, R. Penrose and D. W. Sciama, Oxford University Press, (Oxford, 1981).
- [2] J. V. NARLIKAR and T. PADMANABHAN — «*Gravity, Gauge Theories and Quantum Cosmology*», D. Reidel Publishing Co. (Dordrecht, 1986).
- [3] J. HARTLE — «*Quantum Cosmology*», Lectures delivered at the Theoretical Advanced Study Institute in Elementary Particle Physics, Yale University, June 10-14, 1985.
- [4] I. MOSS — «*The origin of the Universe*», *The Early Universe*, (eds.) W. G. Unruh and G. W. Semenoff, NATO ASI, series C, Vol. 210, Reidel Publishing Company (Dordrecht, 1988).
- [5] J. J. HALLIWELL — «*Introductory Lectures on Quantum Cosmology*», *Proceedings of the 7th Jerusalem Winter School on Quantum Cosmology and Baby Universes*, (eds.) S. Coleman, J. B. Hartle, T. Piran & S. Weinberg, World Scientific Publishing Co. (Singapore, 1991).
- [6] L. Z. FANG and R. RUFFINI (eds.) — «*Quantum Cosmology*», *Advanced Series in Astrophysics and Cosmology — Vol. 3*, World Scientific Publishing Co. (Singapore, 1987).
- [7] A. LINDE — «*Particle Physics and Inflationary Cosmology*», *Contemporary Concepts in Physics*, Volume 5, Harwood Academic Publishers (Chur, 1990).
- [8] J. HARTLE e S. W. HAWKING — «*Wave function of the Universe*», *Phys. Rev.* **D28** (1983) 2960.
- [9] A. VILENKIN — «*Quantum Creation of Universes*», *Phys. Rev.* **D30** (1984) 509.
- [10] S. W. HAWKING — «*The Quantum State of the Universe*», *Nucl. Phys.* **B329** (1984) 257.
- [11] J. J. HALLIWELL and S. W. HAWKING — «*Origin of the Structure of the Universe*», *Phys. Rev.* **D31** (1985) 1777.
- [12] G. ESPOSITO and G. PLATANIA — «*Inflationary Solutions in Quantum Cosmology*», *Class. Quantum Grav.* **5** (1988) 937.
- [13] S. W. HAWKING and Z. C. WU — «*Numerical Calculations of MiniSuperspace Cosmological Models*», *Phys. Lett.* **151B** (1985) 15.
- [14] J. J. HALLIWELL — «*A Bibliography of papers on Quantum Cosmology*», *Int. J. Mod. Phys.* **A5** (1990) 2473.
- [15] E. KOLB and M. TURNER — «*The Early Universe*», *Lecture Note Series — Frontier in Physics — 69*, Addison-Wesley (Boston, 1990).
- [16] ROSA DOMINGUEZ-TENREIRO and MARIANO QUIRÓS — «*An introduction to Cosmology and Particle Physics*», World Scientific Publishing Co. (Singapore, 1988).
- [17] C. COHEN-TANNOUDJI, B. DIU and F. LALOË — «*Mécanique Quantique, Tome I*», Hermann (Paris, 1977).
- [18] H. GOLDSTEIN — «*Classical Mechanics*», Addison-Wesley (Boston, 1980).
- [19] C. MISNER, K. THORNE and J. A. WHEELER — «*Gravitation*», Freeman (San Francisco, 1973).
- [20] R. WALD — «*General Relativity*», The University of Chicago Press (Chicago, 1984).
- [21] L. H. RYDER — «*Quantum Field Theory*», Cambridge University Press (Cambridge, 1985).
- [22] P. V. MONIZ — Trabalho em preparação.

# Fichas de apoio para o 8.º ano de Física

MARIA MANUELA DE SANTANA MAIA LEONARDO

Escola Secundária de Ponte de Sor

*As fichas de apoio constantes neste caderno baseiam-se em práticas pedagógicas que vêm sendo desenvolvidas na Escola Secundária de Ponte de Sor. Constituem, como tal, um testemunho da minha experiência que os colegas (de Física e Química) do 8.º Ano poderão adoptar e adaptar, na medida dos reais interesses dos seus alunos.*

## OBJECTIVOS

No dia 31 de Julho de 1991, o jornal «O Público», no suplemento «Educação», publicou um artigo intitulado «Escolas dos EUA desajustadas do mundo do trabalho».

No artigo era afirmado que «grande parte das escolas secundárias dos Estados Unidos não conseguem desenvolver as capacidades que o mundo do trabalho irá exigir aos seus alunos (capacidade de gerir recursos, de gerir as relações interpessoais, de avaliar a informação, de dominar sistemas de trabalho e de lidar com novas tecnologias em postos de trabalho em constante evolução)».

Nesse sentido era feito um apelo às escolas públicas do país para modernizarem os seus programas.

Este é também um problema das escolas portuguesas. Mas todos sabemos que as reformas programáticas não bastam para alterar o sistema de ensino em Portugal. Pois, mais do que «o que se ensina» interessa «como se ensina».

A presente estratégia, indo de encontro a estas preocupações, procura desenvolver nos alunos aquelas capacidades.

É embaraçoso, mesmo para o mais descontraido dos professores, que a Física, uma ciência tão provocadoramente misteriosa, possa ser considerada maçadora pela grande maioria dos alunos. Opinião que se traduz nas prefe-

rências dos candidatos ao ensino superior (baixa percentagem em cursos das áreas científico-tecnológicas).

Tornar a Física aliciante e útil para os alunos do 8.º Ano é outro dos objectivos da presente estratégia.

## GUIÃO DO PROFESSOR

A estratégia desenrola-se em quatro fases:

### 1. **Motivação**

Feita através da apresentação de um diaporama elaborado pelo professor, onde se evidencia a importância da Física na explicação de fenómenos naturais, no desenvolvimento tecnológico da Humanidade e na melhoria das suas condições de vida.

### 2. **«Os nossos problemas»**

Tendo por base o diaporama e a vivência dos alunos, faz-se uma inventariação dos problemas — «Os nossos problemas» — compatíveis com o âmbito da Física do 8.º Ano e que os alunos têm interesse em ver resolvidos.

### 3. **Resolução de «Os nossos problemas»**

Os alunos escolhem um dos problemas levantados e comprometem-se a resolvê-lo em grupo (de 2/3 elementos).

O professor elabora fichas para os alunos, orientando as suas pesquisas, indicando a bibliografia a consultar e especificando o tipo de produtos que se espera do trabalho desenvolvido.

O professor deve ainda utilizar nas suas aulas a sequência programática que se revele mais adequada à escolha de problemas feita, tendo o cuidado de não os resolver.

As aulas normais serão interrompidas sempre que os alunos de algum dos grupos o solicitem ou sempre que o professor preveja a necessidade de esclarecer dúvidas inerentes à realização dos trabalhos. Os restantes alunos ocupam esse tempo na resolução de fichas treino — fichas formativas elaboradas pelo professor sobre a matéria anteriormente leccionada.

São reservadas e planeadas com os alunos as aulas destinadas às comunicações orais à turma, conseqüente debate e avaliação.

#### 4. Feedback

Para se conseguir um feedback deste tipo de experiência está prevista a elaboração de um Diário de Parede, afixado na sala da turma, onde os alunos podem, em qualquer momento, escrever o que gostaram de fazer, o que acharam mal, as suas sugestões e o que aprenderam.

★

#### Quotas da SPF

*Prezado sócio: se ainda não pagou as suas quotas para o ano de 1991 e 1992, agradecemos que o faça o mais rapidamente possível junto da respectiva Delegação.*

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

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

#### Problema 1

*As nuvens adensam-se no céu e «rebenta» uma grande trovoadá apanhando desprevenido um pastor que, receando constipar-se procura abrigo debaixo da árvore mais próxima.*

*O procedimento do pastor foi correcto?*

#### Pistas para a resolução do problema

- Identifica os processos de electrização responsáveis pela electrização das nuvens;
- Descreve as descargas eléctricas entre duas nuvens (faíscas) ou entre uma nuvem e a terra (raios) como exemplos de correntes temporárias;
- Distingue o verdadeiro perigo numa trovoadá;
- Explica a utilidade do pára-raios;
- Refere o material de que é feito, o formato e a localização de um pára-raios;
- Por analogia resolve o problema.

#### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

#### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 72-74 e 211-213;
- FARIA, Ana Maria, *et al.* — «FQ8 — Física», Didáctica Editora, 9.<sup>a</sup> Edição, 1991, pág. 70;
- MENDONÇA, Lucinda Santos, *et al.* — «No Mundo em Transformação...», Texto Editora, 1.<sup>a</sup> Edição, 1986, págs. 49-50;
- CARVALHO, Rómulo de — «A Electricidade Estática», Sá da Costa Editora, 1.<sup>a</sup> Edição, 1982, págs. 9-17;
- Verbo Enciclopédia Luso-Brasileira de Cultura, «Relâmpago» e «Trovão».

## Problema 2

*Há quem diga que o gerador eléctrico (considere pilhas) está para o circuito eléctrico assim como o coração está para o ser humano.*

*Pensar assim será aceitável?*

### Pistas para a resolução do problema

- Indica os vários tipos de pilhas existentes no mercado;
- Refere sumariamente a constituição de cada uma delas;
- Enumera vantagens e desvantagens da utilização de cada uma delas;
- Descreve o papel de qualquer destes geradores num circuito eléctrico;
- Descreve o papel do coração no ser humano (entrevista a um médico — vide «Como preparar uma entrevista»);
- Por comparação (papel do gerador/papel do coração), resolve o problema.

### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 26-36;
- FARIA, Ana Maria, *et al.* — «FQ8 — Física», Didáctica Editora, 9.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 58-59;
- MENDONÇA, Lucinda Santos, *et al.* — «No Mundo em Transformação...», Texto Editora, 1.<sup>a</sup> Edição, 1986, págs. 53-54 e 135;
- Enciclopédia da Ciência e de Tecnologia — Tecnirama vol. 3, Grolier, 1963, págs. 82-85;
- Trabalho escrito sobre pilhas facultado pelo professor.

## Problema 3

*O João pratica jogos de computador sempre que tem um momento disponível. O pai do João, alarmado com as contas da «luz» que tem para pagar, acha que o João é o principal responsável pelos gastos energéticos na sua casa.*

*Como argumentar a favor do João?*

### Pistas para a resolução do problema

- Atende às informações que acompanham o computador do João;
- Descodifica essas informações em termos de consumo energético;
- Contabiliza o n.º de horas diárias que, em média, o João gasta a jogar no computador;
- Calcula a energia eléctrica gasta por mês pelo João;
- Compara o valor obtido com os valores pagos mensalmente à EDP pelo pai do João;
- Propõe argumentos a favor do João ou, eventualmente, a favor do pai do João.

### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 130-132 e 246-247;
- FARIA, Ana Maria, *et al.* — «FQ8 — Física», Didáctica Editora, 9.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 115 e 128-138;
- Livro de instruções que acompanha o computador do João.

## Problema 4

*O Manuel foi a Lisboa a casa do tio que o convidou para ir ao cinema. Ficou intrigado quando, após o intervalo, a luz da sala se foi apagando a pouco e pouco, até restar apenas a escuridão.*

*Como foi isso possível?*

### Pistas para a resolução do problema

- Explica o fenómeno em termos de variação contínua da resistência eléctrica introduzida no circuito;
- Escolhe, de entre os factores responsáveis pela variação da resistência eléctrica de um condutor óhmico, o que mais adequadamente pode produzir o efeito referido;
- Descreve o funcionamento de um reóstato;
- Constrói um reóstato de lápis;
- Utiliza esse reóstato para exemplificar o que sucedeu no cinema;
- Apresenta um exemplar de um dos interruptores--reóstato comercializados no mercado.

### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 108-111 e 236-237;
- FARIA, Ana Maria, *et al.* — «FQ8 — Física», Didáctica Editora, 9.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 86-94;
- MENDONÇA, Lucinda Santos, *et al.* — «No Mundo em Transformação...», Texto Editora, 1.<sup>a</sup> Edição, 1986, págs. 105-108.

## Problema 5

*É fatal. Na casa do António não se pode ligar o ferro de engomar enquanto a máquina de lavar a loiça está a trabalhar. O disjuntor «dispara» imediatamente. A mãe do António pragueja contra o disjuntor.*

*Estará certa a mãe do António?*

### Pistas para a resolução do problema

- Identifica o tipo de instalação eléctrica existente nas nossas casas;
- Explica como varia a intensidade da corrente sempre que se liga mais um aparelho eléctrico;
- Utiliza a lei de Joule para explicar o que sucede ao disjuntor;
- Compara com o que sucede nos fusíveis;
- Defende a necessidade de utilização de fusíveis ou disjuntores;
- Critica a reacção da mãe do João.

### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 120-121 e 125-129;
- FARIA, Ana Maria, *et al.* — «FQ8 — Física», Didáctica Editora, 9.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 114 e 153;
- MENDONÇA, Lucinda Santos, *et al.* — «No Mundo em Transformação...», Texto Editora, 1.<sup>a</sup> Edição, 1986, págs. 119-120 e 147-148;
- Artigo do jornal «O Independente» — pág. 37 — de 6 de Setembro de 1991.

## Problema 6

*Nas campanhas de sensibilização para promover a diminuição do consumo de energia fala-se sempre no tipo de iluminação que deve ser preferencialmente usado pelo consumidor — iluminação fluorescente.*

*Quais as vantagens deste tipo de iluminação em relação à iluminação incandescente?*

*Que outras recomendações se poderiam acrescentar?*

### Pistas para a resolução do problema

- Indica a constituição de uma lâmpada de incandescência;
- Indica a constituição de uma lâmpada fluorescente;
- Distingue fluorescente de fosforescente;
- Explica o funcionamento de cada uma daquelas lâmpadas;
- Refere vantagens e desvantagens dos dois tipos de iluminação referidos;
- Propõe outras recomendações, no domínio da iluminação, que promovam a poupança de energia.

### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 121-124 e 241-243;
- MENDONÇA, Lucinda Santos, *et al.* — «No Mundo em Transformação...», Texto Editora, 1.<sup>a</sup> Edição, 1986, págs. 149-151;
- FIALHAIS, Carlos — «Física Divertida», Gradiva, 1.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 131-134;
- Ministério da Indústria e Energia, «Click Clube — A Grande Aventura da Energia», Centro para a Conservação de Energia, págs. 6-7;
- Verbo Enciclopédia Luso-Brasileira de Cultura, «Fosforescência»;
- CARVALHO, Rómulo de — «Física Para o Povo» — vol. 1, Atlântida Editora, 1968, págs. 120-124.

## Problema 7

*A bateria do carro do pai do Francisco está fraca. No domingo em que a família planeou sair para o Algarve, o carro não quis «pegar». A mãe do Francisco, desalentada, começou a tirar a bagagem do carro mas o marido não a deixou continuar.*

*Foi pedir aos vizinhos para empurrarem o carro que, finalmente, «pegou».*

*Terão tido problemas no caminho?*

### Pistas para a resolução do problema

- Indica a constituição de uma bateria de automóvel;
- Demonstra experimentalmente como se faz a carga e a descarga de um acumulador de chumbo;
- Relaciona o que se observou com o que ocorre numa bateria de automóvel;
- Refere as várias utilizações da bateria de um automóvel durante a sua descarga;
- Explica o papel do dínamo na carga da bateria;
- Resolve o problema proposto (entrevista a um mecânico — vide «Como preparar uma entrevista»).

### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 45-48 e 269-270;
- MENDONÇA, Lucinda Santos, *et al.* — «No Mundo em Transformação...», Texto Editora, 1.<sup>a</sup> Edição, 1986, págs. 54-55;
- CARVALHO, Rómulo de — «A Energia», Sá da Costa Editora, 1.<sup>a</sup> Edição, 1980, págs. 13-14;
- «O Grande Livro de Perguntas e Respostas de Charlie Brown — 3», Bertrand Editora, 1.<sup>a</sup> Edição, 1986;
- Enciclopédia de Ciência e de Tecnologia — Tecnorama, vol. 3, Grolier, 1963, pág. 43;
- CARVALHO, Rómulo de — «Física para o Povo», Atlântida Editora, 1968, págs. 108-112.

## Problema 8

Dois amigos discutem o funcionamento da campainha eléctrica. Um deles acha que tudo é explicado fazendo apenas uso da «electricidade». O outro pensa que o «magnetismo» é que é verdadeiramente importante.

Quem terá razão?

### Pistas para a resolução do problema

- Desmonta a campainha eléctrica existente no laboratório;
- Indica a constituição da campainha;
- Identifica o electroímã como constituinte essencial da campainha;
- Explica o funcionamento do electroímã;
- Enumera todas as transformações energéticas que se operam na campainha;
- Propõe argumentos a favor de um dos amigos ou a favor de ambos.

### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 148-153;
- FARIA, Ana Maria, *et al.* — «FQ8 — Física», Didáctica Editora, 9.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 142-143 e 154;
- Enciclopédia de Ciência e de Tecnologia — Tecnorama, vol. 2, Grolier, 1963, pág. 115.

## Problema 9

A irmã do Jaime, aluno do 8.º Ano, tem um conjunto de telefones que lhe foi oferecido no dia em que fez 5 anos. Com a promessa de explicar à irmã como funcionavam, o Jaime foi autorizado a desmontá-los.

Qual terá sido a explicação do Jaime?

### Pistas para a resolução do problema

- Desmonta um telefone;
- Esquematiza as partes constituintes do emissor e do receptor (entrevista a um técnico das telecomunicações — vide «Como preparar uma entrevista»);
- Explica sumariamente o papel do emissor;
- Explica o funcionamento do electroímã existente no receptor;
- Interpreta a impossibilidade de o emissor funcionar como receptor e vice-versa;
- Propõe uma explicação para o funcionamento do telefone que a irmã do Jaime, com 5 anos, possa aceitar e compreender.

### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 148-150 e 154-156;
- FARIA, Ana Maria, *et al.* — «FQ8 — Física», Didáctica Editora, 9.<sup>a</sup> Edição, 1991, págs. 142-143;
- Enciclopédia de Ciência e de Tecnologia — Tecnorama, vol. 2, Grolier, 1963, pág. 219.

## Problema 10

*O Joaquim, aluno do 8.º Ano, tem um irmão na 3.ª classe. A professora do irmão já tinha sido sua professora tendo sempre elogiado as suas qualidades de orador. Este ano pediu ao Joaquim para ir falar um pouco sobre energia eléctrica (produção, transporte e utilização) aos seus alunos da 3.ª classe.*

*Como fazer entender tudo isto a miúdos da 3.ª classe?*

### Pistas para a resolução do problema

- Esquematiza o funcionamento de uma central hidroeléctrica;
- Aceita a semelhança, em termos funcionais, entre o gerador de indução e o dínamo de uma bicicleta;
- Explica o funcionamento de um transformador;
- Descreve como se processa o transporte de energia eléctrica desde a sua produção à sua utilização;
- Demonstra a importância da energia eléctrica (vulgo «luz eléctrica») na sociedade em que vivemos;
- Simplifica as várias fases do processo (produção, transporte e utilização), de modo que sejam facilmente compreendidas por alunos da 3.ª classe.

### Produtos

- Elabore um texto escrito especificando a importância da Física na resolução do problema;
- Divulgue o que aprendeu através de uma comunicação oral à turma (vide ficha «Como preparar uma comunicação oral»);
- Escreva um pequeno artigo para o jornal da Escola apresentando a resolução do problema.

### Bibliografia (vide Ficha de Leitura)

- CRUZ, Maria Natália, *et al.* — «A Descoberta da Física», Porto Editora Lda., 4.ª Edição, 1991, págs. 271-274;
- FARIA, Ana Maria, *et al.* — «FQ8 — Física», Didáctica Editora, 9.ª Edição, 1991, págs. 143-144;
- MENDONÇA, Lucinda Santos, *et al.* — «No Mundo em Transformação...», Texto Editora, 1.ª Edição, 1986, págs. 8-16, 51 e 129-132;
- CARVALHO, Rómulo de — «A Energia», Sá da Costa Editora, 1.ª Edição, 1980, págs. 15-16;
- FIOLHAIS, Carlos — «Física Divertida», Gradiva, 1.ª Edição, 1991, págs. 126-129 e 134-135;
- Enciclopédia Combi-Visual, vol. 4, Editorial Baber S.A., «Electricidade» — págs. 9-12 e 15-16.

---

*Para qualquer esclarecimento contactar:*  
Maria Manuela de Santana Maia Leonardo  
Escola Secundária  
7400 Ponte de Sor  
Telef. 042/22130

## CARTAS DOS LEITORES

### Congresso da Sociedade Francesa de Física

De 2 a 6 de Setembro de 1991 realizou-se em Caen (França) o Congresso da Sociedade Francesa de Física.

Distribuída por sessões plenárias, sessões paralelas e posters, a sua actividade ocupou cerca de 700 participantes, embora, como é habitual, nem todos tivessem apresentado comunicações.

Das sessões plenárias destacou-se Carlo Rubbia que falou sobre «O futuro das partículas elementares na Europa», com a autoridade que lhe confere o facto de ser director do CERN.

Nas actividades culturais complementares da Conferência participou Goldsmidt, que, não obstante a sua avançada idade, prendeu a atenção da numerosa assistência que enchia uma das salas do Memorial para a Paz com uma clara e brilhante exposição sobre o avanço da Física Nuclear no decurso da 2.ª Guerra Mundial.

As sessões paralelas foram constituídas por colóquios.

O colóquio denominado «Enseignement de la Physique. Nouvelles démarches» foi organizado em colaboração com a União dos Físicos (Associação de Professores de Física e Química); mobilizou muitos docentes do ensino secundário e do ensino superior que debateram vivamente os temas abordados.

Como nota curiosa há a salientar a intervenção de abertura, a cargo do Inspector Geral do Ensino Secundário. Dir-se-ia que se tratava de um responsável do ME português, tal a semelhança dos problemas abordados, principalmente no que se refere à deficiente formação de grande parte dos docentes do ensino secundário, por um lado e à desmotivação, por outro, em relação à implementação de experiências realizadas pelos alunos de Físico-Químicas.

A grande diferença residiu, apenas, no que se refere ao equipamento dos laboratórios: nas escolas francesas existe em quantidade suficiente, ao passo que nas escolas portuguesas isso nem sempre acontece.

Contra o ensino da Física e da Química na 6.<sup>me</sup> e 5.<sup>me</sup> classes (correspondem aos nossos 6.º e 7.º ano de escolaridade obrigatória) e contra a intenção de manter um horário de poucas horas, levantou-se a voz de Pierre Bergé, Presidente do Congresso, apoiando as propostas do C.N.P., as quais, entre outras reivindicações reclamam um horário de 5 horas (sendo 2 horas de Trabalhos Práticos) para as classes «Première» e «Terminale» (correspondem aos nossos 11.º e 12.º ano).

Algumas das comunicações relataram experiências pedagógicas sobre maneiras diferentes de apresentar, quer os trabalhos de laboratório, quer temas teóricos do programa; em todos os autores e autoras se notava a preocupação de tornar mais motivador o ensino da Física e Química.

Seguindo também esta óptica realizou-se, durante os dois últimos dias, uma acção denominada «Física na cidade», com o apoio do Palais de la Découverte. Numa vasta sala do Centro de Congresso, o hall, foram montadas experiências nalgumas das quais os visitantes podiam participar. Havia mesmo algumas que foram imaginadas por jovens e apresentadas por eles.

Numa simples notícia é impossível referir tudo o que de interessante se passou em Caen.

Os colegas que desejarem mais pormenores poderão contactar com a Direcção da Gazeta.

No capítulo das informações orais, foi dado a conhecer a existência do GIREP, sendo também feito um apelo para a participação dos docentes franceses nesse grupo.

MARIA AMÉLIA CUTILEIRO ÍNDIAS, *Prof.<sup>a</sup> Associada, Universidade de Évora.*

**A propósito do livro «Goethe contra Newton polemics and the project for a new science of color» de Dennis L. Pepper, Cambridge Univ. Press — 1988**

... Há um equívoco fundamental na abordagem do assunto que constitui o tema fundamental deste livro: o da existência de uma «ciência da cor», *que abrangeria todos os aspectos do fenómeno da cor, tanto os de natureza física, como os de natureza fisiológica e até psicológica.* É este pressuposto, o da existência de uma teoria global da cor, que fornece ao autor um pretexto para tentar contrapor aos trabalhos de Newton as especulações de Goethe.

É evidente, no entanto, que as teorias físicas nunca são teorias globais, no sentido de abarcarem todos os aspectos dos fenómenos, inclusivamente os de carácter sensorial e muito menos os psicológicos. As teorias físicas, de resto como qualquer teoria científica, consideram sempre aspectos isolados da realidade.

Os trabalhos de Newton constituem avanços concretos dos conhecimentos, quanto aos fenómenos luminosos, como fenómenos físicos. Estes trabalhos marcam uma etapa histórica na compreensão de tais fenómenos e abrem novos caminhos à investigação nesse domínio. A enorme fecundidade das ideias de Newton pode ser avaliada, por exemplo, pelo papel fundamental desempenhado pela espectroscopia na evolução da Física até aos nossos dias.

A importância atribuída à noção de raio e à variação do índice de refacção com a frequência (dispersão) são aspectos que se acham perfeitamente integrados nas teorias físicas actuais (teoria matemática das ondas e teoria do campo electromagnético). A crítica feita pelo autor deste livro à «absolutização» atribuída a Newton da noção de raio, mostra da sua parte uma incompreensão total do papel desempenhado pelos modelos nas teorias físicas. A noção de raio é evidentemente uma abstracção, mas é tão legítima como outras abstracções, que constituíram e ainda constituem instrumentos fundamentais na interpretação dos fenómenos físicos, a par das linhas

de força de Faraday ou das orbitais electrónicas no modelo atómico de Bohr:

De resto não me parece possível, como o autor tenta fazer, colocar no mesmo pé os escritos de Goethe e os trabalhos de Newton.

Como físico que é, Newton procura investigar o substrato objectivo dos fenómenos, para além do aspecto perceptual inerentemente subjectivo. Como não podia deixar de ser, não se deixa envolver com os aspectos psicológicos ou mesmo fisiológicos dos fenómenos da visão. Tais aspectos só intervêm na medida em que constituem «factores comuns» reprodutíveis por qualquer observador. Os trabalhos de Newton abrem assim caminho — apesar da escassez de meios então disponíveis — a todo um novo domínio da Física. Recorde-se simplesmente que Newton demonstra pela primeira vez a existência do espectro da luz solar e relaciona as componentes deste espectro com diferentes graus de refragibilidade. Estes dois resultados fundamentais viriam a encontrar a sua interpretação teórica na teoria electromagnética das radiações luminosas. A descoberta do fenómeno da dispersão tem uma importância fundamental, tanto teórica como prática.

Nada comparável resulta dos escritos de Goethe. Nem tal, na verdade, seria de esperar. Com efeito Goethe não é um físico profissional. O fenómeno da cor interessa-o principalmente como fenómeno psíquico, directamente ligado à percepção. Algumas das suas observações poderão, eventualmente, ter interesse do ponto de vista psicológico ou fisiológico, mas nada na verdade contribuíram para o avanço da Física.

Chega a ser completamente ridículo pretender arvorar Goethe em precursor de novas ideias filosóficas sobre a natureza da Ciência.

Do livro de Chalmers «What is this thing called Science», transcrevemos a seguinte citação de Goethe, extraída da sua obra «Theory of colours», tradução de C. L. Eastlake, a respeito da Electricidade:

«...it is a nothing, a zero, a mere point, which however, dwells in all apparent existences, and at the same time is the point of origin whence, on the slightest stimulus, a double appearance presents itself, an appearance which only manifests itself to vanish.

The conditions under which this manifestation is excited are infinitely varied, according to the nature of particular bodies.»

Chalmers comenta esta passagem do seguinte modo:

«If we take this quotation at face value, it is very difficult to see what possible set of physical circumstances could serve to falsify it. Just because it is so vague and indefinite (at least when taken out of context), it is unfalsifiable. Politicians and fortune — tellers can avoid being accused of making mistakes by making their assertions so vague that they can always be construed as compatible with whatever may eventuate. The demand for a high degree of feasibility rules out such manoeuvres. The falsificationist demands that theories are stated with sufficient clarity to run the risk of falsification.»

Ao pretender apresentar Goethe como um precursor das novas concepções acerca da natureza da Ciência, o autor deste livro cai em gritantes contradições.

Assim mostra-nos que, nos seus primeiros trabalhos (Beiträge zur Optik-1791) Goethe pretende libertar-se de toda a teoria, reduzindo a Ciência a uma pura descrição dos fenómenos. Esta tendência é mais tarde abandonada na sua obra fundamental (Zur Farbenlehre, 1810) procurando então estabelecer a existência de um «Urphenomenon» — um fenómeno primitivo — a unidade fenomenal que constituiria a base da sua teoria das cores. Segundo o próprio autor deste livro, também esta tentativa estava destinada ao fracasso. Goethe critica Newton por ter absolutizado o papel da matemática (ou da geometria) e ter «abstractizado» os fenómenos naturais. Segundo Goethe, Newton teria tentado explicar o simples (que seria o fenómeno natural...!) pelo complexo (que seria o modelo matemático...!). Poderá alguma vez considerar-se que estas concepções correspondem a uma moderna visão do que é a Ciência? Classificar de «complexa» a noção de raio equivale a considerar igualmente complexa a noção de linha geométrica e revela uma total incompreensão do processo de abstractização que torna possível a existência de qualquer teoria.

# Olimpíadas de Física 1991

## I. PROVAS REGIONAIS

### 1. Delegação Regional de Lisboa

Fac. Ciências U. Lisboa, 15 Junho 1991

#### 9.º ANO — PROVA TEÓRICO - EXPERIMENTAL

##### a) Actividade 1 (1h30)

1.ª Parte — Verifiquem se sobre a vossa mesa de trabalho se encontra o seguinte material: Proveta de 250 ml (1); Balança (1); Berlinde (8); Esguicho com água.

1. Realizem uma experiência que permita estimar um valor para a densidade absoluta do material de que é feito o berlinde, utilizando o material experimental que se encontra à vossa disposição.

2. Elaborem um relatório sobre a actividade experimental realizada.

2.ª Parte — As figuras 1 e 2 representam um corte da secção vertical de um navio que navega no Oceano Atlântico, junto à costa norte do Brasil (na zona do Equador), respectivamente sem carga e com carga. A navegação com carga faz-se dentro dos limites de segurança permitidos e a linha de água afunda-se 1 m.

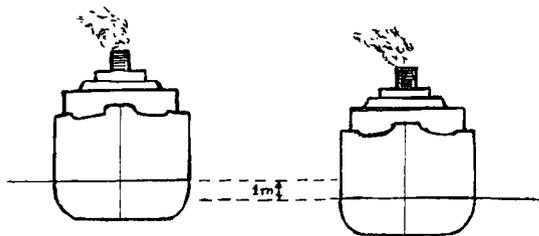


Fig. 1

Fig. 2

Considerem, nos cálculos que efectuarem, que a área da secção horizontal deste navio é  $2 \times 10^3 \text{ m}^2$ .

2.1. Sabendo que a densidade absoluta da água no Oceano Atlântico, junto à costa norte do Brasil é em média  $1,2 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ , calculem a massa da carga transportada pelo navio, nas condições da figura 2.

2.2. Suponham que este navio carregado entra na foz do rio Amazonas e navega neste rio cuja água tem uma densidade absoluta média de  $1,0 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ .

Expliquem como a variação da densidade da água influencia a posição do navio em relação à superfície livre do líquido.

Apresentem os cálculos que acharem convenientes para confirmar a explicação dada anteriormente.

2.3. Esquematizem as marcas de segurança que deveriam desenhar no casco do navio, supondo que ele transporta carga desde o rio Amazonas (no Equador) até à Argentina (nas proximidades do Círculo Polar Antártico). Façam a legenda da figura e expliquem porque fizeram esse esquema.

##### b) Actividade 2 (1h)

Verifiquem se sobre a vossa mesa de trabalho se encontra o seguinte material: Placas de cobre (4); Placas de alumínio (4); Gobelets (4); Solução de cloreto de sódio; Vinagre; Ácido clorídrico (diluído); Amperímetro; Voltímetro; Lâmpada em suporte (1); Fios de ligação.

1. Planeiem experiências que permitam investigar o efeito que a natureza do electrólito tem na produção de corrente eléctrica. Utilizem para tal o material experimental que têm à vossa disposição.

2. Realizem as experiências planeadas.

3. Elaborem um relatório contendo:

a) o registo das observações realizadas durante a execução das experiências planeadas;

b) o esquema das ligações efectuadas;

c) as conclusões a que chegaram após a realização das experiências.

4. Com base no estudo efectuado comentem a frase:

«Pilhas de 1,5 V podem debitar correntes de intensidade diferente para circuitos idênticos».

a) *Actividade 1 (1h)*

Os electroímans têm inúmeras aplicações nomeadamente na construção de campainhas, aparelhos de medida eléctrica e guindastes. Nesta actividade irás estudar variáveis que influenciam as forças criadas pelo electroíman.

Verifiquem se sobre a vossa mesa de trabalho se encontra o seguinte material: Bobine de 500 espiras; Bobine de 1000 espiras; Reóstato (Resistência variável de 0  $\Omega$  a 100  $\Omega$ ); Fios de ligação; Interruptor; Fonte de alimentação; Amperímetro; Núcleo de ferro macio; Pregos.

1. Planeiem experiências que ponham em relevo as variáveis que influenciam a força que o electroíman pode exercer sobre os pregos.

2. Executem as experiências planeadas.

3. Elaborem um relatório contendo:

a) a descrição das experiências planeadas e realizadas;

b) o registo das observações realizadas durante a execução das experiências planeadas;

c) as conclusões obtidas.

4. Projectem uma experiência que permita obter resultados com um maior rigor nas medições efectuadas.

b) *Actividade 2 (1h30)*

Verifiquem se têm à vossa disposição o seguinte material: Pêndulo em suporte; Suporte com lâmina de barbear; Régua; Papel químico e papel vegetal.

1.1. Utilizem o material experimental para montar um dispositivo semelhante ao representado na figura 1.

1.2. Planeiem uma experiência que permita estimar um valor para a velocidade do pêndulo

quando ele passa pela posição assinalada na figura 1 com a letra A.

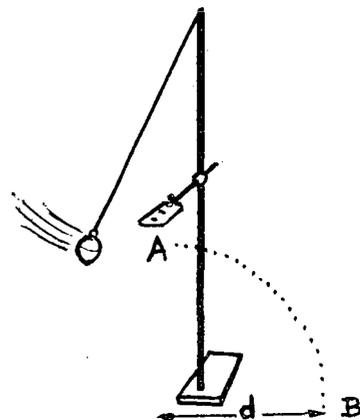


Fig. 1 — Esquema da montagem a utilizar.

1.3. Realizem essa experiência.

2. Quando o pêndulo passa pela posição A, a lâmina corta o fio de suspensão do pêndulo que atinge o nível da base de sustentação do pêndulo e da lâmina, na posição designada por B.

2.1. Planeiem uma experiência que permita determinar o valor da distância  $d$ , assinalada na figura 1.

2.2. Realizem a experiência planeada.

3. Elaborem um relatório que inclua:

a) a fundamentação teórica das experiências realizadas;

b) os resultados obtidos;

c) a discussão desses resultados.

## 2. Delegação Regional do Porto

Fac. Ciências U. Porto, 9 e 10 Maio 1991

### 9.º ANO

#### 1.ª Parte — Resistividade de um Material (1h30)

##### Material disponível

1 corpo cilíndrico condutor; 1 régua; 1 volímetro; 1 craveira; fios de ligação; 1 amperímetro; 1 pilha; 1 interruptor.

##### Introdução

Como sabes, todos os corpos oferecem uma certa resistência, maior ou menor, à passagem

da corrente eléctrica. Isso deve-se, em última análise, à estrutura de que o material é feito; se essa estrutura for uniforme em todas as direcções, podemos afirmar que o material apresenta, a uma determinada temperatura, uma resistividade ( $\rho$ ) característica, definida por:

$$\rho = R \frac{S}{l}$$

em que  $R$  é a resistência eléctrica do corpo considerado, a uma dada temperatura,  $l$  é o seu comprimento e  $S$  é a área da sua secção perpendicular à direcção da corrente eléctrica.

#### Objectivo do trabalho

Determina experimentalmente a resistividade do material de que é feito o corpo fornecido, ao longo do seu comprimento.

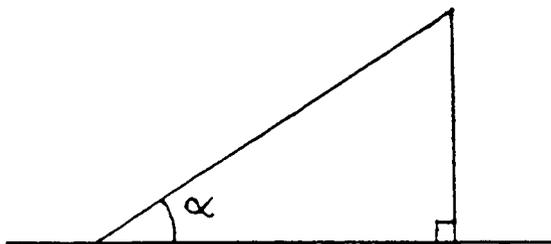
No final, elabora um relatório sucinto do trabalho realizado.

#### Pontuação

- Montagem do circuito — 0 a 5 pontos
- Medições — 0 a 5 pontos
- Cálculos — 0 a 5 pontos
- Relatório — 0 a 5 pontos

### 2.ª Parte — Plano Inclinado (40 min)

Uma superfície plana e inclinada relativamente à horizontal segundo um determinado ângulo  $\alpha$  constitui um plano inclinado:



O plano inclinado é uma máquina simples, que é utilizada em diversas situações para poupar esforço, como por exemplo, quando se carregam pipas de vinho para um camião.

Planifica uma experiência que te permitisse determinar a vantagem mecânica desta máquina simples.

### 1.ª Parte — Aceleração de um Móvel (1h30)

#### Material disponível

1 carro em miniatura; 1 roldana com suporte; 1 fio de nylon; 1 tesoura; 1 cronómetro; 1 fita métrica; 1 corpo de peso conhecido; 1 balança (em local próprio).

#### Objectivo do trabalho

Utilizando o material disponível, imprime ao carro um movimento uniformemente acelerado, e determina experimentalmente o valor da aceleração do móvel.

Em seguida, calcula o valor da aceleração através das leis da Dinâmica. Compara os resultados obtidos.

No final elabora um relatório sucinto do trabalho, incluindo uma crítica dos resultados.

#### Pontuação

- Determinação da aceleração através das leis do movimento — 0 a 5 pontos
- Determinação da aceleração através das leis da Dinâmica — 0 a 5 pontos
- Crítica dos resultados — 0 a 5 pontos

### 2.ª Parte — Potência de um Motor (40 min)

Planifica uma experiência que te permitisse determinar mecanicamente a potência útil do motor eléctrico de um pequeno automóvel, supondo que a tracção às rodas é directa, e que a aceleração imprimida ao veículo é constante.

## II. FINAL NACIONAL

### Org. Delegação Regional do Porto

Fac. Ciências U. Porto, 27 Setembro 1991

#### PROVA DO 9.º ANO

### 1.ª Parte — Frascos Mistério (1h30)

#### Material disponível

1 balança; 4 frascos A, B, C e D.

**NOTA:** É expressamente proibido abrir os frascos!

### Objectivo do trabalho

Os frascos A, B, C e D têm igual massa quando vazios. Os frascos A, B e C contêm iguais volumes de substâncias líquidas diferentes. Sabe-se que essas substâncias são água, propanona e tetracloreto de carbono, mas desconhece-se em que frascos se encontra cada uma.

Sabendo que a ordem das suas densidades ( $d$ ) é:

$$d(\text{tetracloreto de carbono}) > d(\text{água}) > d(\text{propanona})$$

- identifica os frascos em que se encontra cada substância;
- calcula a densidade relativa de cada substância;
- determina o volume do líquido contido em cada frasco.

No final elabora um relatório sucinto do trabalho, incluindo uma crítica de resultados.

### Pontuação

Medições — 0 a 5 pontos

Identificação dos frascos — 0 a 4 pontos

Cálculos — 0 a 6 pontos

Relatório — 0 a 5 pontos

### 2.ª Parte — Transferência de Energia Térmica (40 min)

Imagina três cubos idênticos de cobre A, B e C respectivamente. O cubo A encontra-se à temperatura de 200°C e os outros dois à temperatura de 0°C. Será possível conseguir que o cubo A, após contactar com os outros dois, atinja uma temperatura final inferior à temperatura final de B e C?

Justifica da forma mais completa possível. Despreza as trocas de energia com o ambiente.

### PROVA DO 11.º ANO

### 1.ª Parte — Rendimento de um Motor (1h30)

#### Material disponível

1 motor eléctrico; 1 fonte de alimentação;

1 interruptor; fios de ligação; 1 roldana com suporte; 1 corpo de massa conhecida; 1 fio de ligação; 1 tesoura; 1 fita métrica; 1 cronómetro.

### Objectivo do trabalho

Utilizando o material disponível, liga o motor eléctrico (5V, DC) e determina o seu rendimento. Despreza todas as forças de atrito exteriores ao motor. Considera que o motor consome 0,4J de energia eléctrica em cada segundo de funcionamento.

No final elabora um relatório sucinto do trabalho, incluindo uma crítica de resultados.

### Pontuação

Realização experimental — 0 a 5 pontos

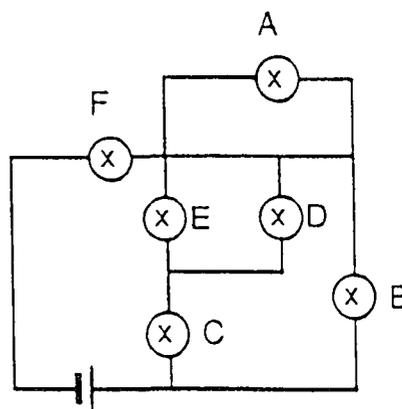
Medições — 0 a 5 pontos

Cálculos — 0 a 5 pontos

Relatório — 0 a 5 pontos

### 2.ª Parte — Circuito Eléctrico Discutível... (40 min)

Determina a ordem da intensidade luminosa das lâmpadas A, B, C, D, E e F no seguinte circuito eléctrico:



Justifica da forma mais completa possível. Admite que todas as lâmpadas têm igual resistência eléctrica.

## 1. Olimpíadas Regionais de Física - 91

### Delegação Regional de Lisboa

Como vem acontecendo nos últimos anos, teve lugar no Edifício C1 da Faculdade de Ciências de Lisboa, no dia 15 de Junho de 1991, a Etapa Regional das Olimpíadas de Física para alunos do ensino secundário da região de Lisboa, Sul e Ilhas.

Participaram nas 7.<sup>as</sup> Olimpíadas da Delegação de Lisboa as seguintes escolas secundárias: Francisco Arruda, Machado de Castro, Sacavém, Alves Redol (Vila Franca de Xira), Dr. Sousa Martins (Vila Franca de Xira), Caneças St.<sup>o</sup> António dos Cavaleiros, Falagueira, Mira-Sintra, Rio de Mouro, Alvide, Linda-a-Velha, Emídio Navarro, Abrantes n.<sup>o</sup> 1, Abrantes n.<sup>o</sup> 2, Rio Maior, St.<sup>a</sup> Maria do Olival (Tomar), Sebastião da Gama (Setúbal), Instituto de Odivelas, Azeitão, Santo André (Santiago do Cacém), Dr. Ângelo Augusto da Silva (Funchal), Francisco Franco (Funchal), Machico, Jaime Moniz (Funchal).

Para além da realização da etapa local, algumas destas escolas participaram na etapa da área pedagógica, pelo que na Etapa Regional estiveram presentes alunos de 21 escolas constituindo 16 equipas do 9.<sup>o</sup> ano e 10 do 11.<sup>o</sup> ano, que participaram nas provas teórico-experimentais e nas provas originais versando um tema de Física.

Foram vencedoras nas diferentes provas as seguintes equipas:

#### a) Provas Teórico-experimentais:

- 9.<sup>o</sup> ano — *Escola Secundária Sebastião da Gama* (Setúbal) constituída por:  
António Romão  
Nuno Grosso  
Carla Vanessa Barral

- 11.<sup>o</sup> ano — *Escola Secundária Linda-a-Velha* (Lisboa) constituída por:  
Cláudia Parente  
Luís Miguel Santos  
Ricardo Gonçalves Carvalho

#### b) Provas de Criatividade:

- 9.<sup>o</sup> ano — *Escola Secundária St.<sup>a</sup> Maria do Olival* (Tomar) constituída por:  
Margarida Venâncio  
Renato Matreno  
Mário Grãos

#### Prémio ex-aequo para:

- Escola Secundária da Falagueira* (Lisboa) constituída por:  
Ana Raquel Martinho  
Carla Sofia Chambel  
Denise Assunção

- 11.<sup>o</sup> ano — *Escola Secundária de St.<sup>o</sup> André* (Santiago do Cacém) constituída por:  
Ana Cláudia Videira  
Lara Cristina Maia  
Nuno Miguel Silva

#### Prémio ex-aequo para:

- Escola Secundária Machado de Castro* (Lisboa) constituída por:  
Filipe Ribeiro  
José Varela  
José António Pereira

Durante a tarde, os alunos e professores acompanhantes efectuaram visitas guiadas aos Museus da Água e da Electricidade.

Pelas 19 horas do mesmo dia foram distribuídos prémios às equipas vencedoras e prémios de participação a todos os alunos. Foram também oferecidos prémios às escolas que organizaram a etapa da área pedagógica.

A Delegação Regional de Lisboa contou com o apoio das seguintes entidades:

Conselho Directivo da Faculdade de Ciências de Lisboa e respectivos departamentos de Física, Educação, Matemática e Química, Secretaria de Estado da Reforma Educativa, Tecnodidáctica, Embaixada do Japão, CTT — Direcção Regional de Correios, Montepio Geral, Gradiva Publicações, Lda., Banco Totta e Açores, Direcção-Geral de Energia, Instituto Italiano de Cultura, JNICT, Instituto da Juventude, Museu da Electricidade, Museu da Água.

## Delegação Regional do Porto

As Olimpíadas de Física constituíram, mais uma vez, excelente oportunidade para despertar entusiasmo nos jovens do Ensino Secundário para o estudo da Física. A boa receptividade e colaboração que temos tido por parte dos professores de Física do Ensino Secundário está na base do êxito da realização das Olimpíadas, a qual é já uma tradição da S.P.F.

Decorreram nos dias 9 e 10 de Maio na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, as provas regionais para os 9.º e 11.º anos de escolaridade, respectivamente, com o seguinte programa:

- 9h00 — Recepção das equipas participantes;
- 9h30 — Realização das provas teórico-experimentais;
- 13h00 — Almoço;
- 14h30 — Classificação das provas facultativas;
- 17h00 — Distribuição de prémios;
- 17h30 — Lanche.

Participaram nestas Olimpíadas 31 equipas do 9.º ano e 24 do 11.º ano, em representação das Escolas Secundárias e «C+S» da Zona Norte. Cada uma das equipas era constituída por 3 elementos acompanhados pelo respectivo professor.

Os vencedores destas provas foram:

### a) *Provas Teórico-experimentais:*

**9.º ano** — *Escola Secundária Eça de Queirós* (Póvoa de Varzim) constituída por:

Ana Sofia Correia Nogueira  
Maria Antónia Neiva de Oliveira Costa de Araújo  
João Pedro Cadilhe Marques

**11.º ano** — *Escola Secundária de Gondomar* constituída por:

José Pedro Monteiro  
Paulo Nuno Silva Pinto  
Manuel Fernando Santos Oliveira

### b) *Provas de Criatividade:*

**9.º ano** — *Escola Secundária de Valbom* constituída por:

Paula Cristina Castro  
Maria Sílvia Santos  
Cristina Fernandes

**11.º ano** — *Externato de Nossa Senhora do Perpétuo Socorro* (Porto) constituída por:

Diamantino José Fonseca dos Santos Silva  
João Carlos Espinheira Gomes Ferreira da Silva  
José Albano Moura Pinto

## 2. Olimpíadas Nacionais de Física

A Delegação Regional do Norte organizou igualmente as Olimpíadas Nacionais de Física 91 (9.º e 11.º anos). Estas decorreram no dia 27 de Setembro na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. O programa das provas foi semelhante ao das provas regionais. Nestas provas participaram 4 equipas da região Norte, 4 da região Centro e 6 da região Sul, cada uma constituída por 3 elementos acompanhados pelo respectivo professor.

Os vencedores destas provas foram:

### a) *Provas Teórico-experimentais:*

**9.º ano** — *Escola Secundária da Murtosa* constituída por:

Januário Vieira da Cunha  
Daniel António Fonseca  
Pablo Oliveira Tavares

**11.º ano** — *Escola Secundária de Linda-a-Velha* constituída por:

Cláudia Parente  
Luís Miguel Santos  
Ricardo Gonçalves Carvalho

### b) *Provas de Criatividade:*

**9.º ano** — *Escola Secundária Marques de Castilho* (Águeda) constituída por:

Marco Paulo de Oliveira  
João Adriano Diaz David  
Ana Matilde Rodrigues Ramos

**11.º ano** — *Escola Secundária Machado de Castro* (Lisboa) constituída por:

Filipe Ribeiro  
José Varela  
José António Pereira

## Agradecimentos:

A Delegação Regional do Norte da Sociedade Portuguesa de Física agradece os valiosos patrocínios das seguintes entidades: Reforma Educativa, Banco Totta e Açores, Laboratório de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, JNICT, editorial Gradiva e Livraria Asa (Olimpíadas Regionais) e Calouste Gulbenkian, Banco Totta e Açores — Câmara Municipal do Porto (Olimpíadas Nacionais). Agradece-se ainda a colaboração prestada por docentes, investigadores e funcionários do Departamento de Física da Universidade do Porto que, com o seu empenho, muito contribuíram para o êxito destas organizações. Especial referência deve ser feita aos elementos que constituíram os júris e a todos os que prepararam, acompanharam e corrigiram as provas. Finalmente agradecemos ao Conselho Directivo da F.C.U.P. a cedência das instalações para a realização das provas.

### 3. Olimpíadas Internacionais de Física

No ano de 1991, em colaboração com as delegações do Norte, Centro e Sul, foi elaborado um novo regulamento para as Olimpíadas Locais, Regionais e Nacionais de Física com vista à possibilidade de participação de Portugal nas Olimpíadas Internacionais de Física. Espera-se que tal regulamento possa entrar em vigor em 1993.

### 4. Notícias das Delegações

#### Delegação Regional do Porto

##### Palestras de Física para Alunos Universitários e Professores do Ensino Secundário

Em colaboração com o Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, a Delegação Norte da S.P.F. levou a cabo as seguintes palestras, especialmente orientadas para alunos universitários e professores do ensino secundário:

«*O raio Verde*» pelo Dr. Manuel Joaquim Marques, do Dep. Física/FCUP, em 09/01/91.

«*Fusão nuclear controlada. Ficção e realidade*» pelo Prof. J. Tito Mendonça, do CFN/IST, em 16/01/91.

«*Qual a diferença entre o fóton e o  $W$* » pelo Prof. Augusto Barroso, do Dep. Física/FCUL, em 23/01/91.

«*Introdução aos momentos iniciais do Universo*» pelo Prof. José Mourão, do CFNUL/CFMC, em 06/03/91.

«*Visão 3-D, Fotografia e Holografia*» pelo Prof. Luís Bernardo, do Dep. Física/FCUP, em 13/03/91.

«*Estudo de Polimerização de Hemoglobina dentro de glóbulos vermelhos, utilizando a dispersão de luz incidente polarizada*» pelo Prof. Alexandre Quintanilha, do ICBAS, em 22/05/91.

«*Nova Geração de Magnetes Permanentes*» pelo Prof. J. Machado da Silva, do Dep. Física/FCUP, em 29/05/91.

«*Hidrodinâmica*» pelo Prof. J. Silva Duarte, do Dep. Física/FCUP, em 05/06/91.

«*Supercondutores de alta temperatura crítica: Propriedades e Aplicações*» pelo Prof. J. Ferreira da Silva, do Dep. Física/FCUP, em 12/06/91.

#### FÍSICA 92 — 8.ª Conferência Nacional de Física 2.º Encontro Ibérico para o Ensino de Física

Em 1991, a Delegação Regional Norte da S.P.F. desenvolveu já intensa actividade relacionada com esta conferência, de sua responsabilidade, e que irá ter lugar de 15 a 18 de Setembro de 1992, na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real. A Física 92 terá como Conferência Satélite o 2.º Encontro Ibérico para o Ensino da Física, numa organização conjunta da Real Sociedad Española de Física (RSEF) e da Sociedade Portuguesa de Física (SPF). Foi já enviada a todos os sócios da SPF e instituições de ensino a 1.ª circular da Física 92, juntamente com um boletim de pré-inscrição para a referida conferência. (A recepção de resumos das comunicações para a Física 92 termina em 31 de Março de 1992). Será em breve distribuído o cartaz anunciador da Conferência bem como a 2.ª circular, destinada à inscrição definitiva na referida conferência.

## Delegação Regional de Coimbra

### Acções para Alunos e Professores do Ensino Secundário

Como vem sendo hábito a Delegação Regional de Coimbra continua a promover a realização de Acções nas Escolas do Ensino Secundário da sua área destinadas a alunos dos últimos anos do ensino secundário e a professores. Estas acções são pequenas palestras destinadas à divulgação ou a um melhor esclarecimento de temas de Física.

É com prazer que vemos que esta iniciativa continua a ter um bom acolhimento junto das Escolas como o atesta o número elevado (cerca de 50) de Acções realizadas durante o ano lectivo 1990/91.

Apraz-nos também registar a colaboração que têm dado a esta actividade muitos professores dos Departamentos de Física das Universidades de Coimbra e de Aveiro. A todos eles queremos apresentar os nossos agradecimentos.

Para o ano lectivo 1991/92 é a seguinte a lista das Acções:

«*A luz e os nossos olhos*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria José B. Almeida.

«*A natureza da luz*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Helena Caldeira.

«*Calor, entropia e teoria cinética*» pelo Prof. Dr. João da Providência.

«*Campo electromagnético: origem e efeitos*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lucília Pires de Brito.

«*Computadores no laboratório: modernas tendências e novas oportunidades*» pelo Prof. Dr. Francisco Cardoso.

«*Física da cor*» pelo Prof. Dr. Luiz Alte da Veiga.

«*Física das partículas elementares*» pelo Prof. Dr. Manuel Fiolhais.

«*Física divertida*» pelo Prof. Dr. Carlos Fiolhais.

«*Física e desporto*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Margarida Ramalho.

«*Gravitação*» pelo Prof. Dr. João da Providência.

«*Insucessos da física clássica e advento da física moderna*» pelo Prof. Dr. Luiz Alte da Veiga.

«*Física estatística nos ensinamentos básico e secundário*» pelo Prof. Dr. Manuel Fernandes Thomaz.

«*Lasers e holografia*» pelo Prof. Dr. João de Lemos Pinto.

«*Mecânica quântica: o que é?*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Helena Caldeira.

«*Movimentos na água e o levantar dos aviões*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria José B. Almeida.

«*O núcleo atómico: estabilidade e desintegração*» pelo Prof. Dr. Adriano Pedroso de Lima.

«*Origem e evolução do universo*» pelo Prof. Dr. Manuel Fiolhais.

«*Os electrões e as propriedades dos materiais*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria José B. Almeida.

«*Princípios de conservação*» pelo Prof. Dr. Luiz Alte da Veiga.

«*Relatividade restrita*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Estela Pereira.

«*Simetrias e leis de conservação na física clássica*» pelo Prof. Dr. João da Providência.

«*Teoria da relatividade para os mais novos*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Helena Caldeira.

Foram realizadas no primeiro período deste período deste ano lectivo as seguintes Acções:

«*Física Divertida*» pelo Prof. Dr. Carlos Fiolhais, na Esc. Sec. do Fundão, no dia 27/11/91.

«*A luz e os nossos olhos*» pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria José de Almeida, na Escola Sec. Bernardino Machado na Figueira da Foz, no dia 14/12/91.

### Cursos de Formação da S.P.F. cuja organização esteve a cargo da Delegação de Coimbra

«*Uso do computador no ensino experimental da Física*», realizado pelo Prof. Dr. Francisco Cardoso na Escola Sec. n.º 1 da Marinha Grande, nos dias 21-22/11/91.

«*Termodinâmica Macroscópica*», realizado pela Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Helena Caldeira na Esc. Sec. Dr. Manuel Gomes de Almeida, Espinho, nos dias 25-26/11/91.

## Delegação Regional de Lisboa

### Olimpiadas Regionais de Física 92

Está já a decorrer a organização das Olimpíadas de Física 92. Até 24 de Fevereiro as escolas interessadas em participar devem enviar a inscrição respectiva para a Sede da Delegação.

A etapa regional está prevista para o dia 23 de Maio de 1992 em Lisboa.

## 5. European Optical Society — EOS

Foi recentemente fundada a EOS, aberta desde já à adesão de sócios individuais.

### *Actividades Previstas:*

- Organização e coordenação de Conferências e Escolas.
- Publicação de uma revista científica e de uma folha de informações:

A revista constará das partes A (trimestral ou bimensal, sobre Óptica Pura e Aplicada) e B (bimensal, IOPP «Quantum Optics», com início em 1992).

### *Benefícios dos Sócios:*

- Assinatura reduzida da revista EOS (A: 40 ECU, B: £ 34.50)
- Folha de informações
- Redução na inscrição de conferências
- Outras informações

### *Quota anual:*

- Durante 1991: 20 ECU (Estudantes 5 ECU)
- Após 1991: 30 ECU (Estudantes 7 ECU)

### *Secretariado:*

European Optical Society  
c/o Institut d'Optique  
B.P. 147 - 91 403 Orsay Cedex  
France  
Tel.: (33) 1 69416820  
Fax: (33) 1 69413192

### *Contacto em Portugal:*

Prof. O. Soares  
Laboratório de Física, Universidade do Porto  
P. Gomes Teixeira  
4000 Porto  
Tel.: (02) 310290  
Fax: (02) 319267

## 6. Divisão Técnica de Educação

No ano de 1991 a DTE prosseguiu a sua intensa actividade em que um dos pontos altos consistiu na colaboração que prestou à organização do 1.º Encontro Ibérico sobre o Ensino da Física que teve lugar em Valladolid, de 23 a 27 de Setembro.

Esta colaboração traduziu-se, não só na promoção do Encontro junto de todas as escolas secundárias e universitárias do país como, também, na deslocação de um grupo artístico — o Grupo Cancioneiro de Coimbra — que abrilhantou a sessão cultural de toda a XXIII Reunião Bienal da Real Sociedade

Espanhola de Física que decorreu simultaneamente com o 1.º Encontro Ibérico.

Entretanto também organizou, em colaboração com a Secretaria Regional de Educação e Cultura da Região Autónoma dos Açores, um Encontro de Professores de Física do Ensino Secundário da Região Açores que teve lugar de 21 a 25 de Maio na Escola Secundária de Antero de Quental em Ponta Delgada e que constou das seguintes acções:

«*Uso do Telescópio no Ensino Secundário*» pelo Astrónomo Máximo Ferreira.

«*O Ensino da Teoria da Relatividade Restrita no 12.º Ano de Escolaridade*» pela Prof.ª Dr.ª Estela Pereira.

«*Utilização dos Computadores no Ensino da Física*» pelo Prof. Dr. Carlos Fiolhais.

«*Cinemática e Dinâmica da Partícula*» pelo Dr. Vítor Ferreira

«*O Ensino da Mecânica nas Escolas Secundárias*» pelo Prof. Dr. Jorge Valadares

Para além de várias Palestras que organizou em várias localidades do país, também assumiu a responsabilidade dos seguintes Cursos de Formação da S.P.F.:

«*Ideias Intuitivas em Física*» pela Prof.ª Dr.ª Marília Thomaz em Vila Real de Santo António em 8 de Abril.

«*Cinemática e Dinâmica da Rotação*» pelo Dr. Vítor Ferreira em Portimão em 18 de Abril.

«*Uso do Telescópio no Ensino Secundário*» pelo Astrónomo Máximo Ferreira em Lagos.

«*Tratamento Experimental da Cinemática e da Dinâmica*» pelo Prof. Dr. Luiz Alte da Veiga e pelo Dr. Décio Martins em Oeiras nos dias 4 e 5 de Julho.

«*Introdução à Mecânica Quântica*» pelo Prof. Dr. Luciano Videira em Lisboa de 18 a 20 de Setembro.

Ao terminar a sua actividade ao serviço da DTE os seus actuais responsáveis, e em particular o seu actual coordenador que ocupa este cargo há já 6 anos, desejam agradecer toda a colaboração prestada por Professores das várias Universidades do país e por alguns Professores do Ensino Secundário, os quais, todos em conjunto, foram os grandes artífices do sucesso do trabalho realizado. Não destacaremos nenhum deles em particular para não subalternizar o mérito da colaboração dos outros.

# ÍNDICE DO VOLUME 14

## Vol. 14—Fasc. 1 (Janeiro a Março 1991)

A SPF e a Física em Portugal nos anos 90 (Carlos Matos Ferreira)	1
Os revestimentos de diamante e o futuro (José Francisco de Martins de Azevedo e Silva)	6
Inovações na Educação Científica e Tecnológica—I. Modelos Curriculares para um Curso de Tecnologia (Anabela Martins)	14
Ideias dos alunos sobre o conceito de som (M. H. Caldeira, M. E. Costa, M. A. Patrício, A. Pinto, E. M. Prata Pina, M. C. Ruivo e Marília F. Thomaz)	22
Curiosidades e Imagens da Física	33
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física	36
Um pouco de história...	39

## Vol. 14—Fasc. 2 (Abril a Junho 1991)

Propriedades termo-eléctricas da hematite de Moncorvo (F. Machado, J. M. Serra, A. M. Correia e L. Serrano)	41
Inovações na Educação Científica e Tecnológica—II. Modelos Curriculares. Formação e Actualização de Professores de Ciência e Tecnologia (Anabela Martins)	46
Uma experiência didáctica com um sistema de refrigeração (J. F. M. Azevedo e Silva)	61
Sobre a Radiação Cerenkov (M. João Martins)	67
Olimpíadas de Física SPF	73
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física	76
Um pouco de história...	80

## Vol. 14—Fasc. 3 (Julho a Setembro 1991)

Localização ou a luz envergonhada (Vítor S. Amaral)	81
A instalação em Portugal da primeira experiência de fusão nuclear: O Tokamak IST-TOK (C. A. F. Varandas, J. T. Mendonça, J. A. C. Cabral, M. P. Alonso, P. Amorim, B. B. Carvalho, M. L. Carvalho, H. Fernandes, A. Malaquias, M. E. Manso, J. P. Matias, A. Moreira, J. L. Pinto, A. Praxedes, F. Serra, A. Silva, P. Varela, S. Vergamota, R. Vigário, C. J. Freitas, A. Mateus, V. Prego e A. Soares)	86
A mãe de (quase) todas as distribuições (J. Miguel Nunes da Silva)	90
Circuitos Elementares de Corrente Contínua: Dificuldades de Aprendizagem e Formas de as Superar (António J. Neto, Mariana Valente e Maria Odete Valente)	94
O ciclo de histerese magnética no núcleo de um transformador (J. P. Marques e V. A. Esteves)	107
Educação Científica e Educação Tecnológica. (Autonomia e interdisciplinaridade) (João Baptista)	110
Prémio Nobel da Física 1991	117
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física	118

## Vol. 14—Fasc. 4 (Outubro a Dezembro 1991)

A experiência de Joule-Thomson (José Francisco de Martins de Azevedo e Silva)	121
Aspectos operacionais do funcionamento do Tokamak IST-TOK (C. A. F. Varandas, J. T. Mendonça, J. A. C. Cabral, B. B. Carvalho, H. Fernandes, C. J. Freitas, A. Mateus, S. Magalhães, V. Prego e A. Soares)	128
Cosmologia Quântica. I—Uma Introdução Básica (P. V. Moniz)	132
Fichas de apoio para o 8.º ano de Física (Maria Manuela de Santana Maia Leonardo)	142
Cartas dos Leitores	148
Olimpíadas de Física 1991	151
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física	155

# **PHYSIS — ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ESTUDANTES DE FÍSICA**

## **International Conference of Physics Students**

Lisboa, 21 - 28 Agosto 1992

A Physis — Associação Portuguesa de Estudantes de Física — está a organizar a ICPS'92 — International Conference of Physics Students 1992 — que decorrerá de 21 a 28 de Agosto em Lisboa. Esta conferência é organizada sob os auspícios da IAPS — International Association of Physics Students — de que a Physis é membro. A IAPS é uma associação que tem como objectivo principal encorajar os estudantes de física no seu trabalho académico e profissional num contexto internacional. Esta associação tem já membros em 18 países da Europa e EUA e o número de países aderentes aumenta todos os anos. As suas principais actividades são a organização de estágios e de uma conferência anual, mais precisamente a ICPS que passamos a apresentar.

Durante a ICPS'92 os estudantes de física terão a oportunidade de apresentar palestras sobre o seu trabalho científico, a sua universidade ou o seu país (no campo da física) e além disso conhecer estudantes de física de todo o mundo e assistir às suas palestras. Haverá também palestras de conhecidos cientistas portugueses e estrangeiros.

No programa científico da ICPS'92 incluem-se também visitas a laboratórios de física e a EXPOPHYSIS. Esta é uma exposição em que convidamos companhias privadas e outras instituições que desenvolvam trabalho no ramo da física para se apresentarem aos estudantes, assim como apresentarem possíveis propostas de trabalho ou de estágios.

Mas a ICPS'92 tem também um vasto programa cultural que inclui visitas turísticas aos mais interessantes locais de Lisboa e arredores e visitas guiadas a museus. Além disso haverá, como em anos anteriores, um local para os participantes se encontrarem à noite, onde poderão discutir qualquer tema mais interessante de uma palestra ou simplesmente conversarem um pouco e conhecerem-se melhor.

Durante estes encontros decorrerá também, como já é habitual, a assembleia geral da IAPS.

Segue-se um esboço do programa:

As visitas turísticas e científicas decorrerão de manhã e as palestras dos estudantes serão apresentadas durante a tarde. Para incluir este ano ainda mais palestras, estas serão dadas em paralelo. Depois do jantar decorrerão as palestras dos cientistas convidados.

Por fim resta salientar que esta conferência é destinada a todos os estudantes universitários de física, desde o primeiro ano do curso até ao doutoramento.

Para informações adicionais quer sobre a ICPS'92 quer sobre as actividades da Physis ou da IAPS contactar:

PHYSIS  
APARTADO 1738  
1017 LISBOA CODEX  
PORTUGAL

E-MAIL: FICPS92 AT PTEARN  
FAX: 351-1-924747/688100 (ATTN PHYSIS/ICPS'92)



VOL. 14 • FASC. 4 • DEZEMBRO 1991

## SUMÁRIO

<b>A experiência de Joule-Thomson . . . . .</b>	<b>121</b>
<i>José Francisco de Martins de Azevedo e Silva</i>	
<b>Aspectos operacionais do funcionamento do Tokamak IST-TOK . . .</b>	<b>128</b>
<i>C. A. F. Varandas, J. T. Mendonça, J. A. C. Cabral, B. B. Carvalho, H. Fernandes, C. J. Freitas, A. Mateus, S. Magalhães, V. Prego e A. Soares</i>	
<b>Cosmologia Quântica. I — Uma Introdução Básica . . . . .</b>	<b>132</b>
<i>P. V. Moniz</i>	
<b>Fichas de apoio para o 8.º ano de Física . . . . .</b>	<b>142</b>
<i>Maria Manuela de Santana Maia Leonardo</i>	
<b>Cartas dos Leitores . . . . .</b>	<b>148</b>
<b>Olimpiadas de Física 1991 . . . . .</b>	<b>151</b>
<b>Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física . . . . .</b>	<b>155</b>