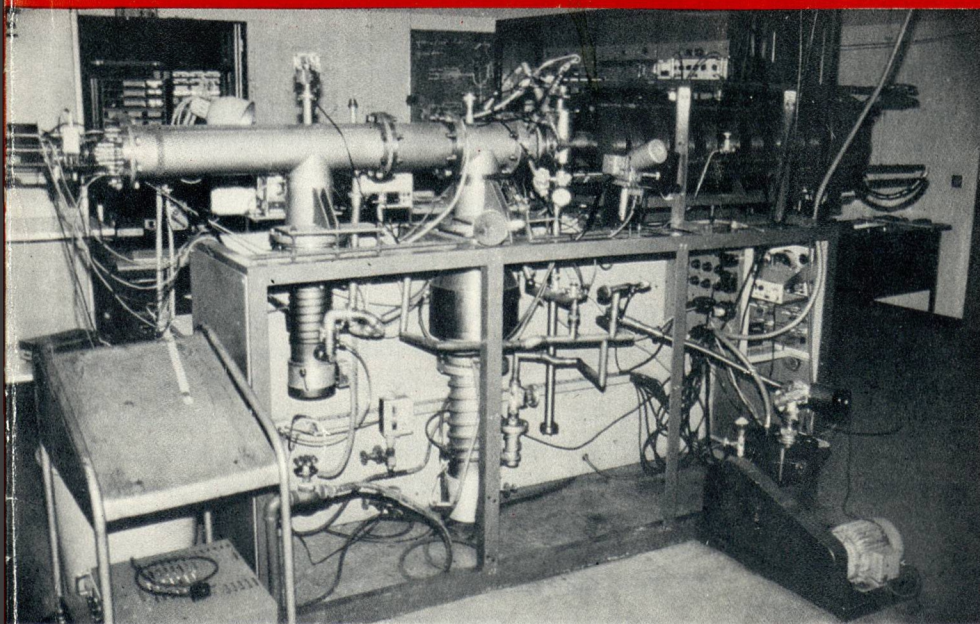


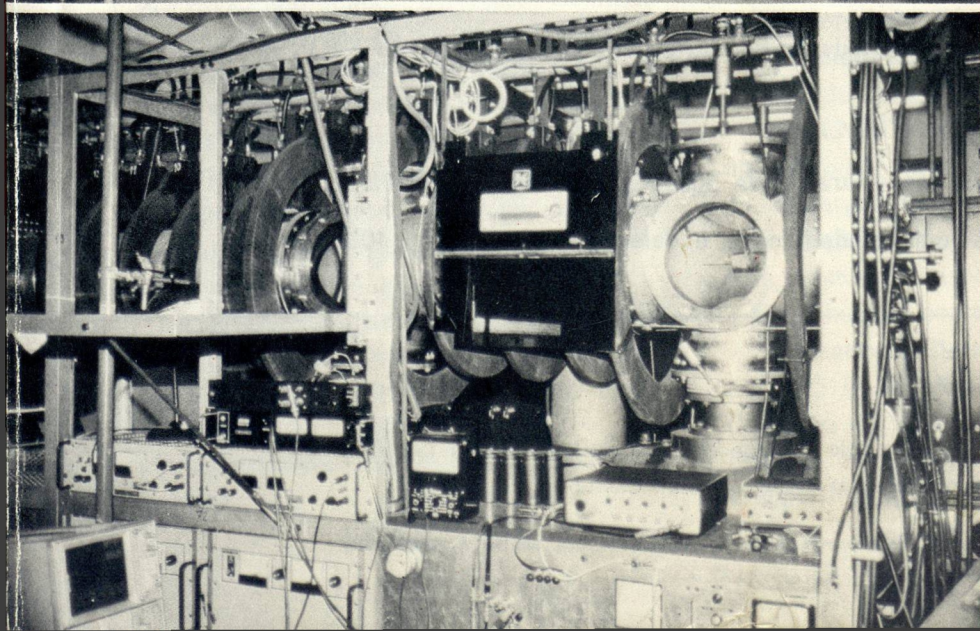
# GAZETA DE FISICA

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FISICA



VOL. 9, FASC. 4  
OUTUBRO 1986

Publicação Trimestral



Física de Plasmas •  
Experiências de interacção  
feixe-plasma e de descarga  
de cátodo oco no Centro  
de Electrodinâmica (INIC).

# GAZETA DE FISICA

Fundada em 1946 por A. Gibert

Propriedade e Edição: Sociedade Portuguesa de Física

Director: Filipe Duarte Santos (Secretário-Geral da S.P.F.)

## *Comissão de Redacção*

Conselho Directivo da S.P.F.: J. Moreira Araújo, F. Duarte Santos, E. Ducla Soares, J. Bessa Sousa, Rui J. Agostinho, J. Carvalho Soares, M. Amaral Fortes, Margarida R. Costa, Maria José Almeida, M. Pereira de Barros, J. Brochado Oliveira.

---

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 : pais 500\$00 ; estrangeiro US\$10.**

**Preço do fascículo avulso (sede e delegações da SPF) : 100\$00.**

---

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



# A Investigação e o Ensino da Física de Plasmas em Portugal

C. A. F. VARANDAS

Departamento de Física do Instituto Superior Técnico  
Centro de Electrodinâmica da Universidade Técnica de Lisboa

*O início do ensino da Física de Plasmas no Instituto Superior Técnico e a recente adesão de Portugal aos programas comunitários de fusão nuclear controlada vieram chamar a atenção para a importância da Física de Plasmas na investigação fundamental em física moderna e no desenvolvimento de novas tecnologias. Neste trabalho enunciamos algumas das aplicações da Física de Plasmas e fazemos referência à sua investigação e ao seu ensino em Portugal.*

## 1. Introdução

O interesse no estudo sistemático da Física de Plasmas iniciou-se no princípio da década de 50 com a apresentação dos primeiros projectos que previam a construção de reactores de fusão nuclear controlada [1] e com o advento da Física Espacial (pensa-se hoje que mais de 99 % da matéria do Universo está no estado de plasma, isto é, na forma de um gás ionizado, electricamente neutro à escala macroscópica, com comportamento colectivo [2, 3]).

A Física de Plasmas desempenha actualmente um papel importante em numerosos sectores da física moderna, nomeadamente, em Física do Estado Sólido, Astrofísica, Geofísica e Cosmologia (estudo da ionosfera, magnetosfera e atmosfera terrestres, do vento solar, do interior e da atmosfera das estrelas, das cinturas de radiação de Van Allen, do gás interestelar) e tem igualmente várias aplicações tecnológicas importantes, como por exemplo:

- Fusão nuclear controlada.
- Electrónica dos gases.
- Conversão magnetohidrodinâmica e termoiónica de energia.
- Motores para a propulsão e controlo de altitude de satélites.
- Comunicações em onda-curta via ionosfera.

- Síntese de compostos químicos.
- Laser de gás.
- Aceleradores e geradores a plasma (clitrons, magnetrons, orbitrons e girotrons).
- Soldadura, disjuntor e centrifugadora a plasma.
- Tratamento e processamento de materiais e superfícies.
- Écrans para terminais de computador.

## 2. A investigação em Física de Plasmas em Portugal

A investigação em Física de Plasmas em Portugal reduz-se ao Centro de Electrodinâmica da Universidade Técnica de Lisboa (CEL) e ao Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (LNETI).

No LNETI existe um único grupo, com um doutorado, trabalhando em espectroscopia de descargas luminescentes, e anuncia-se a constituição de um novo grupo vocacionado para o estudo de aspectos tecnológicos ligados à fusão nuclear controlada [4].

O Centro de Electrodinâmica [5] foi criado em 1975 na sequência de projectos da extinta Comissão de Estudos de Energia Nuclear do Instituto de Alta Cultura, está localizado no Complexo Interdisciplinar e tem sido subsidiado

pelo Instituto Nacional de Investigação Científica (INIC) e pelo Instituto Superior Técnico (IST). Neste Centro trabalham actualmente doze investigadores doutorados, nove investigadores não doutorados, três alunos bolseiros, três técnicos de laboratório e um técnico administrativo. Os investigadores do CEL são contratados pelo INIC (dois) e pelo IST através dos Departamentos de Engenharia Electrotécnica e de Computadores (nove), Física (oito) e Matemática (dois). Os graus académicos de Doutor foram obtidos em Inglaterra (três), França (dois), Estados Unidos da América do Norte (um), Holanda (um) e Portugal (cinco). O Centro de Electrodinâmica dispõe actualmente de seis instalações experimentais, de três micro-computadores, de dois terminais gráficos ligados à rede de cálculo do Centro de Informática do IST, de uma biblioteca com cerca de 1200 obras e de uma pequena oficina. A actividade experimental do CEL tem vindo a ser descrita no «World Survey of Major Facilities in Controlled Fusion Research» [6], publicado pela Agência Internacional de Energia Atómica, enquanto que o trabalho teórico tem sido divulgado no «Theoretical Work in European Plasma Physics Laboratories» [7], editado pela Comissão Económica Europeia.

Apresentamos, em seguida, um breve resumo da actividade científica em curso no Centro de Electrodinâmica, a qual está organizada em cinco Linhas de Acção e no Grupo de Fusão Nuclear Controlada.

## 2.1. Turbulência em plasmas

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Doutor Tito Mendonça e engloba os seguintes projectos:

- Teorias da turbulência plasma.
- Experiências de aceleração e caos.
- Experiências em descargas; solitões e instabilidades.

O primeiro projecto é de índole teórica e pretende alcançar uma visão global dos fenómenos turbulentos.

O objecto do segundo projecto é o estudo experimental de plasmas turbulentos que possam ser interpretados com a ajuda de sistemas

dinâmicos não integráveis. Em particular, pretende-se estudar a transição de regime numa experiência de interacção feixe-plasma e pôr em evidência experimental um mecanismo de aceleração dos raios cósmicos, já estudado do ponto de vista teórico.

O objectivo do terceiro projecto é o estudo experimental de plasmas turbulentos que possam ser interpretados com modelos analíticos integráveis. Foi já possível estudar uma instabilidade de banda lateral numa configuração experimental do tipo condensador plano. Actualmente estuda-se a propagação de uma perturbação que evolui como um solitão electrónico, com velocidade de propagação próxima da velocidade térmica electrónica, num plasma ( $n_0 \approx 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_e \approx 5 \text{ eV}$ ) de Argon ( $p_{\text{Ar}} \approx 10^{-1} \text{ Torr}$ ) criado num tubo de vidro ( $L = 120 \text{ cm}$ ,  $\phi = 3.5 \text{ cm}$ ,  $p_0 \approx 10^{-4} \text{ Torr}$ ) por uma descarga entre dois eléctrodos (Fig. 1). A descarga

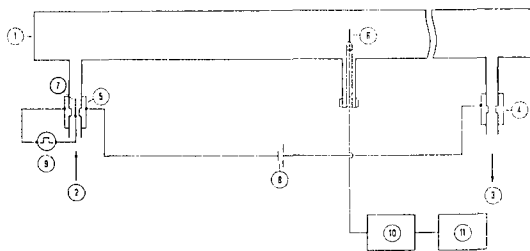


Fig. 1—Descarga luminiscente: 1—Tubo de vidro; 2—Entrada de gás; 3—Sistema de vácuo; 4—Ânodo; 5—Cátodo; 6—Sonda; 7—Electrodo auxiliar; 8—Fonte de alimentação; 9—Gerador de impulsos; 10—Osciloscópio; 11—Micro-computador.

arranca com uma tensão típica de 3 kV e funciona em regime estacionário com tensões da ordem de 700 a 800 V e correntes de 10 a 40 mA. Este projecto dispõe ainda de uma segunda instalação experimental (Fig. 2), constituída por um tubo de vidro ( $L = 45 \text{ cm}$ ,  $\phi = 33 \text{ cm}$ ,  $p_0 \approx 10^{-5} \text{ Torr}$ ) no qual um plasma de Argon ( $p_{\text{Ar}} \approx 10^{-4} \text{ Torr}$ ) é criado por uma descarga entre um filamento e os suportes metálicos dos ímans magnéticos, situados longitudinalmente na parede do tubo. Estes ímans têm os polos do mesmo nome orientados



na mesma direcção em cada suporte e em direcções opostas em suportes adjacentes. O campo magnético assim obtido apenas tem valores significativos na periferia ( $B_0 \approx 140$  Gauss), diminuindo rapidamente para valores

- Evolução não linear da interacção ciclo-trónica entre silvos e electrões.
- Ondas não lineares em plasmas e outros meios dispersivos.

O primeiro projecto visa a interpretação teórica dos dados recolhidos pelos três satélites colocados em orbita no âmbito do projecto AMPTE («Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers») e tem como objectivos principais:

- a) Caracterização da turbulência da bainha geomagnética.
- b) Modelização numérica do efeito da turbulência no transporte de iões pesados.
- c) Estudo do trânsito dos iões pesados através da magnetosfera.

O segundo projecto desenvolve-se em colaboração com o laboratório STAR da Universidade de Stanford, que faculta o acesso aos resultados experimentais obtidos com a estação polar de Siple, e pretende interpretar a fenomenologia resultante da acção simultânea de várias ondas sobre os electrões energéticos das cinturas de radiação de Van Allen.

No terceiro projecto estuda-se o equilíbrio, a estabilidade e a interacção de ondas superluminosas de grande amplitude.

### 2.3. Criação, diagnóstico e utilização de plasmas de laboratório

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Doutor José Cabral e engloba os seguintes projectos:

- Ondas e instabilidades na experiência de interacção feixe-plasma.
- Ondas e instabilidades num plasma de radio-freqüência.
- Ondas e instabilidades na chamada «Q-machine».
- Instabilidades iónicas associadas a potenciais electrostáticos em plasmas.
- Ondas e instabilidades em meios inhomogéneos.

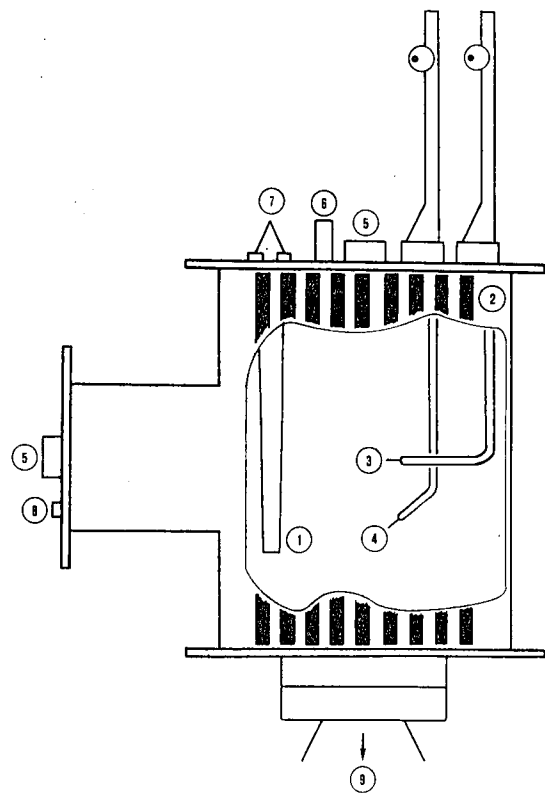


Fig. 2—Descarga multipolar: 1—Filamento; 2—Suporte dos ímans; 3—Sonda móvel; 4—Sonda fixa; 5—Janela; 6—Manómetro; 7—Fonte de alimentação; 8—Entrada de gás; 9—Sistema de vácuo.

menores de  $r$ . Deste modo a experiência permite obter um plasma ( $n_0 \approx 10^9$  cm<sup>-3</sup>,  $T_e \approx 8$  eV) confinado em volume numa região onde o campo magnético é praticamente nulo.

### 2.2. Propagação em meios activos

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Doutor Armando Brinca e engloba os seguintes projectos:

- Transporte de iões pesados no sistema vento solar-magnetosfera.

O primeiro projecto desenvolve-se numa máquina de interacção feixe-plasma (Fig. 3), constituída por um guia cilíndrico ( $L=75$  cm,  $\phi=8$  cm,  $p_0 \approx 10^{-6}$  Torr), no qual um plasma de baixa densidade ( $n_0 \approx 10^9$  cm $^{-3}$ ) e de pequena temperatura ( $T_e = 4$  a  $8$  eV) é criado pelas colisões inelásticas dos electrões de um feixe ( $U_b=2$  keV;  $i_b=0$  a  $20$  mA) com os átomos de um gás raro (normalmente Hélio,

O segundo projecto desenvolve-se num guia cilíndrico ( $L=100$  cm,  $\phi=10$  cm,  $p_0 \approx 10^{-6}$  Torr), imerso num campo magnético axial ( $B_0 \approx 150$  a  $300$  Gauss), onde um plasma ( $n_0 \approx 0.2$  a  $8 \times 10^9$  cm $^{-3}$ ,  $T_e=4$  a  $6$  eV) é criado por ionização de radio-frequência dos átomos de Argon ( $p_{Ar}=6 \times 10^{-4}$  a  $4 \times 10^{-3}$  Torr) através de uma pequena bobina ( $L=5$  cm,  $\phi=2.5$  cm) alimentada a  $15$  MHz com uma

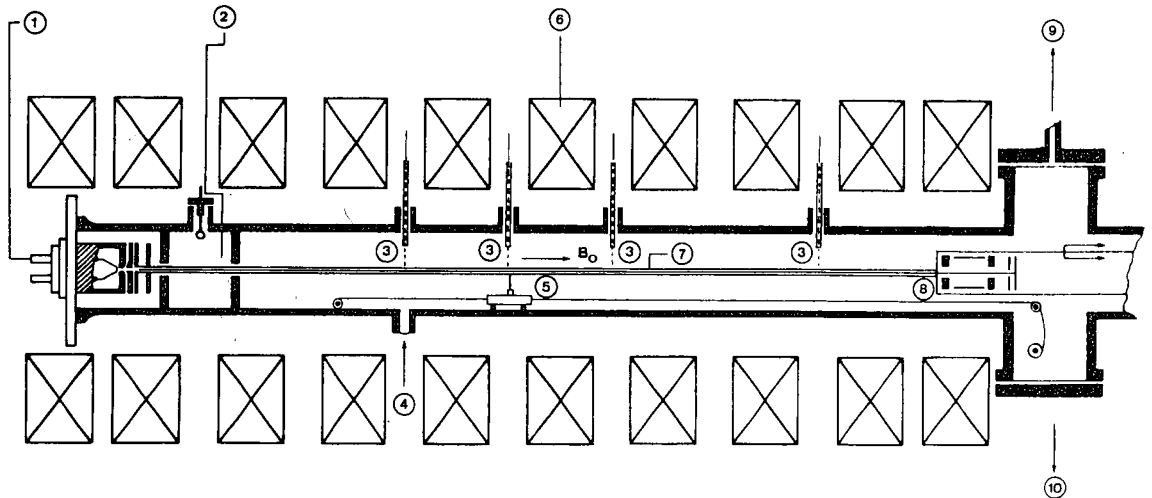


Fig. 3—Sistema de interacção feixe-plasma: 1—Canhão electrónico; 2—Cavidade ressonante electromagnética; 3—Sonda móvel em  $r$ ; 4—Entrada de gás; 5—Sonda móvel em  $z$ ; 6—Bobina de criação do campo magnético; 7—Feixe electrónico; 8—Analisador electrostático de energia; 9—Manómetro de ionização; 10—Sistema de vácuo.

a pressões da ordem de  $10^{-3}$  Torr), num campo magnético axial e praticamente homogéneo ( $B_0=50$  a  $300$  Gauss). As áreas científicas a estudar são:

- a) Desenvolvimento não linear da instabilidade electrociclótrónica.
- b) Estatísticas de amplitude e de intervalos de tempo dos sinais recolhidos por uma sonda.
- c) Regimes turbulentos da interacção feixe-plasma.
- d) Modificações dos espectros das instabilidades em sistemas feixe-plasma com duas espécies de iões.
- e) Modificações dos espectros e das funções de distribuição de velocidades dos electrões e dos iões por aplicação continuada ou pulsada de potenciais electrostáticos ao plasma.

potência típica de  $10$  W. Deste modo obtemos colunas de plasma magnetizado e confinado, com fortes gradientes longitudinais de densidade. As áreas científicas a considerar são:

- a) Características de propagação e mecanismos não lineares de interacção entre ondas electrónicas e iónicas.
- b) Transformação linear e não linear de modos.
- c) Propagação de ondas electrostáticas e sua transformação em ondas electromagnéticas perto das ressonâncias do sistema.
- d) Características de propagação de ondas superficiais com frequências muito menores que a frequência de corte do guia.
- e) Compensação do gradiente axial de densidade através de uma estrutura de campo magnético adequada.

O terceiro projecto desenvolve-se na chamada «Q-machine», constituída por um guia cilíndrico ( $L=100$  cm,  $\phi=10$  cm,  $p_0 \approx 10^{-8}$  Torr) imerso num campo magnético axial ( $B_0 \approx 1500$  a  $2000$  Gauss) no qual um plasma ( $n_0 \approx 10^9$  cm $^{-3}$ ,  $T_e=T_i \approx 0.1$  eV) é criado por ionização de contacto dos vapores de potássio numa placa de tântalo aquecida uniformemente pelo seu bombardeamento por um feixe de electrões. As áreas científicas a considerar são:

a) Características de propagação das diversas ondas, electrónicas e iónicas, em plasmas quiescentes.

b) Regimes transientes associados à súbita injeção de ondas.

c) Colisão entre um plasma quiescente de potássio e um outro criado em regime pulsado por uma descarga de radio-frequência em Argon.

O quarto projecto desenvolve-se nas experiências atrás descritas e tem como objectivos o estudo da formação de potenciais electrostáticos em plasmas e das instabilidades iónicas excitadas por estes potenciais. As áreas científicas a considerar são:

a) Condições de formação de potenciais electrostáticos.

b) Controlo das distribuições de potencial através das funções de distribuição das velocidades dos iões e dos electrões.

c) Criação de duplas camadas e células convectivas.

d) Identificação das instabilidades iónicas e estudo dos efeitos não lineares associados à sua propagação.

O último projecto é de índole essencialmente experimental e tem por objectivo o estudo da interacção feixe-plasma em configurações magnéticas com interesse para as máquinas de fusão nuclear controlada (espelhos e praias magnéticas). As áreas científicas a considerar são:

- Identificação e mecanismos de excitação das instabilidades electrónicas e iónicas.
- Processos de transferência de energia do feixe para o plasma.

Os resultados experimentais são interpretados, na aproximação de WKB, através de códigos numéricos que simulam o desenvolvimento linear da interacção feixe-plasma.

#### 2.4. Propagação e radiação de ondas electromagnéticas. Aspectos fundamentais. Aplicações

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Professor Abreu Faro e engloba um único projecto no âmbito da Física de Plasmas:

- Magnetosfera de pulsares e mecanismos de radiação associados.

O objectivo fundamental deste projecto, feito em colaboração com a Universidade de Manchester, é a investigação da estrutura da magnetosfera duma estrela neutrónica em rotação rápida visando a explicação das observações efectuadas em vários domínios do espectro de frequência das ondas electromagnéticas recebidas.

#### 2.5. Descargas em gases. Electrónica dos gases

Esta Linha de Acção é dirigida pelo Doutor Matos Ferreira e engloba os seguintes projectos:

- Modelização de descargas luminescentes em gases moleculares.
- Plasmas produzidos por campos RF, HF e micro-ondas.
- Descargas de arco de cátodo oco.

O primeiro projecto tem por objectivo o estudo teórico da cinética das descargas estacionárias de gases moleculares, tendo em consideração o forte acoplamento entre os modos de vibração do estado electrónico fundamental do gás e a distribuição de energia dos electrões.

O segundo projecto insere-se no âmbito duma colaboração internacional em que participam equipas experimentais em Orsay (França) e Montreal (Canadá) e pretende estudar os mecanismos de manutenção e as propriedades dos plasmas produzidos por campos alternados, tendo em vista as suas aplicações nos domínios dos Lasers, do tratamento de materiais e de superfícies e da gravura a plasma para a microelectrónica.



O terceiro projecto visa o estudo experimental e teórico de uma descarga de cátodo oco, de corrente elevada (até 200 A), confinada por um campo magnético, tendo em vista caracterizar as propriedades do plasma produzido (densidade do plasma, temperaturas electrónica e iónica e espécies excitadas) e os mecanismos de funcionamento do arco ao nível da zona catódica. Este projecto dispõe de uma montagem experimental (Fig. 4), totalmente construída em Portugal, constituída por um tubo de vácuo em aço ( $L=500$  cm,  $\phi=30$  cm,  $p_0 \approx 10^{-5}$  Torr) no qual se cria um plasma de Argon ( $p_{Ar} \approx 10^{-3}$  Torr) de elevada densi-

(ii) Colaborar na elaboração de um programa nacional de investigação dos problemas relacionados com os futuros reactores.

(iii) Estabelecer projectos de colaboração com laboratórios europeus no âmbito do programa de investigação da European Atomic Energy Community (EURATOM).

Este Grupo é dirigido pelo Doutor Tito Mendonça e engloba os seguintes projectos:

- Reactores em regime contínuo.
- Descarga toroidal.
- Geradores de alta frequência e de elevada potência.

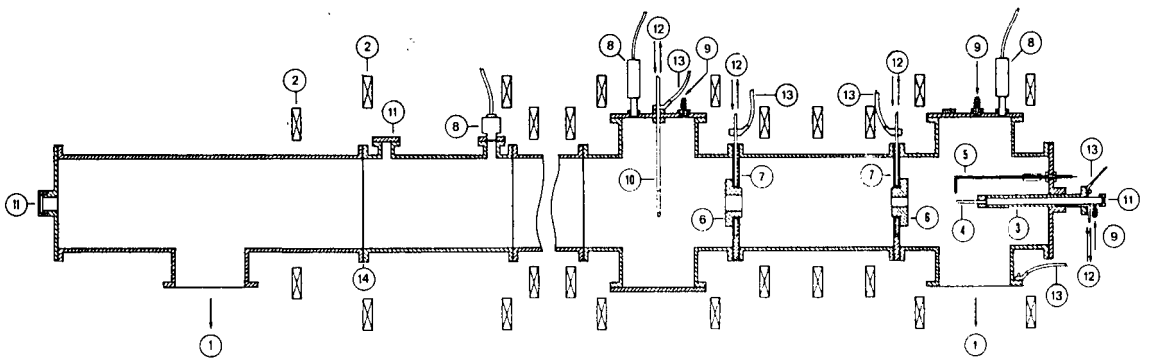


Fig. 4—Descarga de cátodo oco: 1—Sistema de vácuo; 2—Bobina de criação do campo magnético; 3—Suporte do cátodo; 4—Cátodo; 5—Sonda rotativa; 6—Estrangulamento; 7—Suporte; 8—Manómetro; 9—Entrada de gás; 10—Ânodo; 11—Janela; 12—Circuito de água de refrigeração; 13—Ligações eléctricas; 14—Junta.

dade ( $n_0 \approx 10^{14}$  cm $^{-3}$ ) e de baixa temperatura ( $T_e \approx 5$  eV) através de uma descarga entre um ânodo e um cátodo oco, num campo magnético axial e uniforme de 200 Gauss. Esta descarga arranca com tensões típicas de 1 kV e trabalha em regime contínuo com tensões da ordem de 80 a 100 V e correntes da ordem de 200 A.

## 2.6. Fusão Nuclear Controlada

O Grupo de Fusão Nuclear Controlada [8] foi recentemente criado com os seguintes objectivos:

(i) Sistematizar os trabalhos relacionados com a fusão nuclear que vinham a ser realizados nas diversas Linhas de Acção.

O primeiro projecto é de índole essencialmente teórica e destina-se a aprofundar o conhecimento dos vários mecanismos de geração de correntes em Tokamaks, através de feixes electromagnéticos na gama das radio-frequências. Em particular, pretende-se estudar um novo mecanismo em que a corrente é originada por um modo electrostático ou electromagnético resultante do batimento não linear de duas ondas electromagnéticas. Após a elaboração de códigos numéricos que permitam testar as várias situações experimentais, a eficiência deste mecanismo será testada numa máquina linear (a chamada «Q-machine») e numa descarga toroidal.

O segundo projecto é de índole experimental, com uma forte componente tecnológica, e o seu objectivo é a construção de uma

Tabela 1 — Disciplinas de Física de Plasmas dos currícula das licenciaturas de Engenharia Física Tecnológica (EFT) e Engenharia Electrotécnica e de Computadores (EEC) e do mestrado em Física (MF).

	NOME DA DISCIPLINA	S	T
EFT	Introdução à Física de Plasmas	8	Ob
	Física Experimental IV	8	Ob
	Ondas e Instabilidade em Plasmas	9	AE
	Descargas em Gases	9	AE
	Física Atómica e Molecular dos Plasmas	10	AE
	Fusão Termonuclear	10	AE
	Projecto	9 e 10	AE
EEC	Propagação em Meios Ionizados	9	Op
MF	Ondas e Turbulência em Plasmas	3	AE
	Electrónica nos Gases	3	AE
	Técnicas de Diagnóstico de Plasmas	3	AE
	Seminários sobre os seguintes temas:	4	AE
	Descargas em Gases		
	Interacção Plasmas-Superfície		
	Lasers de Plasmas		
	Fusão Termonuclear		
	Plasmas Geofísicos		
	Propagação de Ondas em Plasmas Inhomogéneos		

S...Semestre; T...Tipo de aula

Ob...Obrigatória; AE...Área de Especialização; Op...Opção

pequena experiência toroidal. Nesta máquina pretendem-se estudar alguns problemas relacionados com os reactores deste tipo, nomeadamente a estabilidade magnetohidrodinâmica e o aquecimento de radio-frequência, e testar novos métodos de diagnóstico de plasmas de fusão.

O terceiro projecto tem igualmente uma forte componente tecnológica já que o seu objectivo principal é a concepção e a construção de um gerador de potência (1 KW) na gama das ondas milimétricas (35 a 70 GHz).

### 3. O ensino da Física de Plasmas em Portugal

O ensino da Física de Plasmas em Portugal reduz-se ao Instituto Superior Técnico, nas licenciaturas de Engenharia Electrónica e de Computadores e Engenharia Física Tecnológica e no mestrado em Física. Este ensino iniciou-se, de uma forma sistemática, no ano

lectivo de 1985-86 com os currícula indicados na Tabela 1.

#### REFERÊNCIAS

- [1] A. S. BISHOP—«Project Sherwood», Addison-Wesley, Reading, Mass (1958).
- [2] F. F. CHEN—«Introduction to Plasma Physics», Plenum Press, New York (1974).
- [3] C. M. FERREIRA—Técnica, 464, 39 (1983).
- [4] J. C. OLIVEIRA—«Contribuição para a Formulação de um Plano Nacional de I & D em Fusão Nuclear», Nota Técnica do Instituto de Ciências e Engenharia Nucleares do LNETI (1986).
- [5] Os dados relativos ao Centro de Electrodinâmica foram recolhidos dos programas de acção enviados ao INIC.
- [6] «World Survey of Major Facilities in Controlled Fusion Research», International Atomic Energy Agency, Viena de Áustria (1976).
- [7] «Theoretical Work in European Plasma Physics Laboratories», Commission of the European Directorate-General XII, Fusion Programme, Brussels (1985).
- [8] J. T. MENDONÇA—«Grupo de Fusão Nuclear Controlada», Relatório interno do CEL (1986).

# ○ papel da intuição nas descobertas e invenções em Física (\*)

JOSÉ MARIA FILARDO BASSALO

Departamento de Física da Universidade Federal do Pará  
66 000 — Campus Guamá, Belém, Brasil

*Neste trabalho procuramos estudar o papel da intuição nas descobertas e invenções em Física. Inicialmente, analisamos o processo criativo geral revelado na Arte, na Ciência e no Humor (Kneller, Koestler), processo esse constituído de quatro etapas básicas (Poincaré): preparação, incubação, iluminação (intuição) e verificação, das quais a intuição é um factor preponderante. Em seguida, ao fazermos um estudo histórico da intuição, verificamos que ela nos proporciona conhecimento através da razão (Platão), da emoção (Plotino, Santo Agostinho) e da volição (Fichte, Dilthey). Por fim, usando uma série de exemplos, tentamos mostrar que as descobertas e invenções físicas, decorrem basicamente, de três tipos de intuição: racional, decorrente de trabalhos conscientes de seus autores e ocorrida, no entanto, fora das «torres de marfim» (Arquimedes, Newton, etc.); emotiva, proveniente de idéias isoladas e que, contudo, estão fora do paradigma científico vigente (Newton, Langevin); e volitiva, resultante de acidentes ou serendipitidades (Fermi, Roentgen, Becquerel, etc.).*

Quando adolescente, quer por ouvir contarem, quer por ler em livros didáticos que se preocupam com o aspecto histórico da Ciência, ou em livros de divulgação científica, tomamos conhecimento de histórias bizarras relacionadas com algumas descobertas e invenções científicas. Por exemplo, são por demais conhecidas as histórias de Arquimedes que saiu despido pelas ruas de Siracusa gritando *Eureka! Eureka! (Achei! Achei!)*, ao descobrir que seu corpo se tornava mais leve ao penetrar em uma banheira com água, fato esse que o levou a formular o «Princípio da Flutuabilidade»; de Newton, que ao ver cair uma maçã no quintal da fazenda de sua mãe, em Woolsthorpe, na Inglaterra, o levou a formular a Teoria da Gravitação; de Kelulé, que ao sonhar com uma

ouroboros (cobra que morde sua própria cauda), foi levado à sua famosa estrutura hexagonal do benzeno; ou as descobertas acidentais de Roentgen e de Becquerel, dos raios-X e da radioatividade, respectivamente. Todas essas histórias (e mais algumas que contaremos no decorrer deste trabalho), apesar de extravagantes, estão ligadas a alguma coisa mais profunda do que apenas a uma esquisitice do cientista-criador, isto é, estão ligadas àquilo que filósofos e psicólogos chamam de

(\*) A Comissão Redactorial respeitou integralmente a grafia do autor, mesmo quando ela se afastava da que é corrente em Portugal. Algumas «notas» foram separadas das «referências» e inseridas nas páginas apropriadas.

**MATERIAIS 87** • Universidade do Minho, Braga, 21-23 Abril 1987

**Temas:** Processos de Fabrico de Materiais • Comportamento dos Materiais • Física dos Materiais • Conservação dos Materiais

**Datas:** Resumos (1 folha A4) até 31-12-86; textos e inscrições até 15-3-87

**Endereço:** Materiais 87 • Univ. Minho • Largo do Paço • 4719 Braga Codex



*intuição*. Neste trabalho mostraremos, através de uma série de exemplos, o papel criador desempenhado pela intuição nas descobertas e invenções em Física.

O filósofo e cientista polonês Jacob Bronowski (1908-1974), em seu livro *Um Sentido do Futuro* [1], afirma que um *fato é descoberto* e que uma *teoria* ou *instrumento* são *inventados*. Porém, prossegue Bronowski, para que haja *criação* em uma descoberta ou em uma invenção, é necessário que haja uma profunda ou suficiente participação pessoal do descobridor/inventor. Para ilustrar essa opinião, Bronowski apresenta alguns exemplos. Assim, para ele, a descoberta das Índias Ocidentais (1492) pelo explorador italiano Cristóvão Colombo (1451-1506) e a invenção do telefone (1876) pelo escocês, naturalizado norte-americano, Alexander Graham Bell (1847-1922), são destituídos de criação, pois as Índias Ocidentais já existiam antes de Colombo e os fatos básicos para a invenção do telefone já existiam, também, antes de Bell. No caso do telefone, Bronowski acha que a engenhosidade da concepção de Bell, como se pode ver nas descrições que Isaac Asimov [2] e Peter Wymer [3] fazem sobre a mesma, não foi suficiente para considerá-la criativa, pois se não fosse Bell, adita Bronowski, seria um outro o inventor desse aparelho. Por outro lado, para o autor do notável *A Escalada do Homem*, a tragédia *Otelo* (1604) do poeta e dramaturgo inglês William Shakespeare (1564-1616) e o *quantum de energia* (1900) do físico alemão Max Karl Ernst Ludwig Planck (1859-1974; Prêmio Nobel de Física (PNF), 1918), são criações genuínas por serem profundamente pessoais. Por exemplo, para Bronowski, o teatro elisabetano teria continuado sem Shakespeare, mas nenhum outro dramaturgo teria criado *Otelo* tal como o conhecemos.

Sendo a intuição uma das etapas constituintes do processo criativo, cremos ser oportuno deter-nos um pouco sobre esse processo. Quando um homem é criativo? Vários cientistas, filósofos e psicólogos têm tentado responder a essa questão, já que a *criatividade* se constitui num ponto comum entre a Ciência

e a Arte (incluindo nesta o Humor). Bronowski [4], por exemplo, observando ser a Natureza caótica e, como tal, plena de uma variedade infinita, acredita que o homem em seu processo criativo, deverá procurar semelhanças, buscar estruturas comuns nessa variedade, até encontrar uma «unidade na variedade da Natureza». (Nessa definição de criação, Bronowski usou o conceito de *beleza* — «unidade expressa na variedade» — formulado pelo poeta e crítico literário inglês Samuel Taylor Coleridge (1772-1834)). Por outro lado, o filósofo norte-americano George Frederick Kneller (1908- ), em seu livro *Arte e Ciência da Criatividade* [5], após estudar um grande número de textos sobre a criação, observou que cada pessoa «constitui um padrão singular de potencialidades» e que, no entanto, para desenvolver tais potencialidades, essa pessoa deve ser educada no sentido de estimular sua criatividade. (Daí porque Kneller preconiza uma profunda reformulação na educação mundial que deverá ter como uma de suas principais virtudes «a busca de um conhecimento criativo»<sup>(1)</sup>). Para se aprender de maneira criativa, prossegue Kneller, «o aluno há de combinar o conhecimento que adquire numa determinada lição com o retirado de outras áreas de experiência». Assim, uma pessoa ao estudar determinado assunto, ao invés de apenas juntar alguma idéia oriunda desse seu estudo às outras que já estudara, deve inventar novos padrões de idéias ou «ativar idéias inertes», como preconiza o grande matemático e filósofo inglês Alfred North Whitehead (1861-1947). Para ser criativa, diz Kneller, uma pessoa deve procurar uma ligação entre idéias não previamente ligadas. E essa ligação, adverte, é produto da intuição.

A criação foi também extensivamente estudada pelo filósofo e novelista húngaro, naturalizado inglês, Alfred Koestler (1905-1983) em *The Act of Creation* [6]. Assim, para Koestler, os processos criadores revelados no

---

(1) Essa também é a opinião do educador brasileiro Lauro de Oliveira Lima, defendida em vários de seus livros, entre os quais, por exemplo, o recente *Introdução à Pedagogia* (Editora Brasiliense, 1983).

Humor, na Arte e na Ciência, participam de um padrão comum a *bissociação* — que consiste na conexão simultânea de níveis de experiência, oriundos de padrões de pensamento ou de comportamento: as *matrizes*. Então, afirma ainda Koestler, o ato de criação na Ciência decorre da  *fusão* de duas matrizes de pensamento até então não relacionadas, resultando em uma nova síntese que, por sua vez, leva a novas sínteses. Para demonstrar sua tese, Koestler descreve vários casos de bissociação científica. Por ser extremamente didática, vamos descrever a idéia da invenção do tipo móvel (~1438) pelo inventor alemão Johannes Gensfleisch Zur Laden, apelidado Gutenberg (1397-1468). «Este (Gutenberg), como sabemos por suas cartas, estava procurando um meio de produção livreira mais rápido que o permitido pelo laborioso entalhamento, em bloco de madeira, das letras e palavras que depois eram transferidas para o papel mediante o atrito deste no entalhe previamente coberto de tinta, até que a impressão ‘pegasse’. Esse método exigia que se entalhasse cada letra, novamente, para fazer a matriz de madeira necessária a cada página. A princípio ele divertiu-se com a idéia de fundir letras, como as usadas nos selos ou carimbos de estado, o que permitiria usá-la repetidamente. Percebeu, entretanto, que uma letra fundida desse modo não produziria impressão satisfatória se o papel fosse apenas atritado nela. Um dia, porém, enquanto observava o funcionamento de uma prensa de vinho, veio-lhe a *intuição* (o grifo é nosso) crucial. Duas ordens de pensamento — uma associada à prensa de vinho, outra associada ao carimbo — subitamente convergiram e ele viu que uma letra fundida como um carimbo poderia ser *premida* contra o papel, deixando a mais nítida impressão possível. Ali estava um meio de usar as mesmas letras indefinidamente e, ao mesmo tempo, produzir a clara impressão que não se obtinha pelo atrito. Dessa *intuição* (o grifo é nosso) nasceu a imprensa». Essa citação encontra-se no livro do Kneller, referido anteriormente.

Nas conceituações sobre a criatividade analisadas acima, surge uma questão: existirá um padrão no ato criador? Em outras palavras: existirão processos similares que caracterizam uma criação? Entre os estudiosos da criatividade, é amplamente aceite que um processo criativo é constituído basicamente de quatro etapas, podendo, no entanto, ser acrescido de mais uma. Essas quatro etapas básicas são: *preparação, incubação, iluminação e verificação*. Para Kneller, essas etapas devem ser precedidas de uma etapa chamada de *primeira apreensão* («insight»). Já para Abraham Antoine Moles em seu livro *A Criação Científica* [7], as quatro etapas básicas devem ser sucedidas por uma quinta: a *formulação*. Assim, uma pessoa ao ter uma idéia (*primeira apreensão*) sobre determinado assunto deve, primeiramente, familiarizar-se com idéias alheias sobre o assunto (ou correlatas a ele), para estudar as possibilidades de sua idéia. Esta é, em linhas gerais, a fase ou etapa da *preparação*, também conhecida como *documentação*. Depois que essas idéias são trabalhadas pelo consciente, há um período de atividade não-consciente, que pode ser longo ou curto, período esse que constitui a fase de *incubação*. (Segundo Poincaré [8], essa fase ocorre no *moi inconscient* ou *moi subliminal*). Por seu lado, a fase *iluminação* se constitui no clímax do processo criativo, ou seja, ela representa o instante em que o criador percebe que encontrou a solução de seu problema. Diz-se, também, ser esse o instante da *intuição* ou da *inspiração*. Como não cabe à natureza da *iluminação* ser certa ou errada, isto é, ser infalível, o processo criativo precisa ser completado. Aliás, isso é bem colocado pelo filósofo austríaco Sir Karl Raimund Popper (1902- ) no livro *A Sociedade Aberta e Seus Inimigos* [9] ao afirmar que: — «A intuição, indubitavelmente, desempenha grande parte na vida de um cientista, assim como o faz na vida de um poeta. Leva-o a suas descobertas. Mas pode levá-lo a seus fracassos». Um exemplo disso pode ser visto na falsa previsão do planeta Vulcano, que estaria localizado, segundo o astrônomo francês Urbain-Jean-Joseph Le Verrier (1811-

-1877), entre Mercúrio e o Sol. Ora, Le Verrier e, independentemente, o astrônomo inglês John Couch Adams (1819-1892), haviam demonstrado teoricamente que as perturbações da órbita do planeta Urano eram devidas à existência de um outro planeta. Realmente, tal hipótese foi confirmada com a descoberta, em 1846, do planeta Netuno, pelo astrônomo alemão Johann Gottfried Galle (1812-1910). Em vista disso, Le Verrier, em 1855, intuiu que as precessões do periélio do Mercúrio eram devidas à presença de um cinturão de asteróides interno à órbita de Mercúrio, do qual fazia parte Vulcano. As anomalias da órbita de Mercúrio no periélio viriam a ser explicadas pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein, formulada a partir de 1915.

Retomemos a descrição das quatro etapas do processo criativo. A *iluminação* é condição necessária à criação, mas não é suficiente. Assim, para se completar o processo criativo necessita-se da etapa da *verificação*, na qual as idéias intuídas são conscientemente elaboradas, alteradas e modificadas, e finalmente formalizadas. (Moles (op. cit.) considera a *formalização* como uma etapa isolada). Via de regra, essa etapa é muito longa e penosa, podendo mesmo durar anos, durante os quais várias verificações são realizadas, inclusive com novas intuições, até mesmo de naturezas diversas, até que o criador consiga dar forma final à sua obra. A necessidade da verificação de intuições (iluminações) no processo criativo é confirmada na frase do matemático, físico e astrônomo alemão Johann Karl Friedrich Gauss (1777-1855): — «Alcansei o meu resultado, mas não sei como chegar a ele». O estágio lento e penoso da verificação é sintetizado pelo inventor norte-americano Thomas Alva Edison (1847-1931) na frase: — «Invenção: 1 % de inspiração e 99 % de transpiração». É nessa fase de *verificação* que, além de uma atividade lógico-racional, o criador precisa exercer seu sentimento crítico que lhe faz, muitas vezes, reformular a concepção inicial ou mesmo abandonar a sua obra. Em *Os Sonâmbulos* [10], Koestler descreve as tentativas feitas pelo astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630) no

sentido de obter as três famosas leis que descrevem os movimentos dos planetas em torno do Sol, as quais, nas formulações finais, quase nada conservam de suas idéias iniciais. Por seu lado, Kneller (op. cit.) nos fala de poemas que retêm somente algumas frases da inspiração inicial, ou mesmo de outros que ficaram incompletos como alguns escritos por Coleridge. Do exposto acima, podemos dizer que a criatividade é constituída de características «dionisíacas» (intuitivas) e «apolíneas» (lógico-racionais) <sup>(2)</sup>. Concluindo esse pequeno estudo sobre a criatividade, podemos sintetizá-la no postulado do cientista brasileiro Maurício Oscar da Rocha e Silva (1910-1983): — «A criatividade científica deve ser livre, até o ponto em que os seus frutos foram colhidos» [11].

Depois dessa digressão sobre a criatividade, voltemos à intuição por ser ela o objeto principal deste trabalho. A intuição como fonte de conhecimento vem sendo estudada desde quando o filósofo grego Platão (c. 428-c. 348) falou pela primeira vez de uma *intuição espiritual*, de uma intuição no sentido estrito do termo, diferente da *intuição sensível*. Para ele, as *Idéias* são percebidas imediata e espiritualmente pela razão. Trata-se, como se vê, de uma intuição estritamente *racional*. A distinção entre esses dois tipos de intuição é bastante clara. Por exemplo, é através da intuição sensível que percebemos as cores e as formas dos corpos. No entanto, é somente através da intuição espiritual que conseguimos distinguir, por exemplo, um objeto azul de um verde, ou um objeto esférico de um cilíndrico. Ora, sendo o conhecimento, de um modo geral, representado por uma relação entre sujeito e objeto, conforme nos ensina Johannes Hessen em seu livro intitulado *Teoria do Conhecimento* [12], vê-se que a intuição sensível é inerente a todo sujeito e decorre de uma relação direta entre ele e o objeto, sem a intervenção do intelecto.

---

<sup>(2)</sup> Para entender o significado das expressões «dionisíaca» e «apolínea» na Ciência, o leitor deverá consultar o livro do físico e filósofo da Ciência, o norte americano Gerald James Holton (1922- ), *A Imaginação Científica* (Zahar Editores, 1979. (Tradução: Waltensir Dutra)).



Por seu lado, a intuição espiritual exige um pensamento por parte do sujeito ao relacionar-se com o objeto.

A intuição platônica das *Idéias* foi retomada pelo filósofo egípcio Plotino (205-270) que a substituiu, no entanto, pela intuição do *Nus Cósmico*. Assim, nossas idéias são uma pura manifestação do *Nus*, ou seja, o nosso espírito é uma emanção do *Espírito Cósmico*. Para Plotino, além dessa intuição do *Nus*, que continua sendo uma atividade puramente intelectual, existe uma outra manifestação intuitiva. Assim é que no livro *Enneads* [13], ele observa que a contemplação de Deus não é puramente racional, pois está fortemente impregnada de elementos emocionais. Portanto, Plotino reconhece que existe também uma *intuição emotiva* ou *emocional*. Esta intuição teve seu grande momento com Santo Agostinho (354-430), já que ele substituiu o *Nus* de Plotino pelo *Deus* do Cristianismo. Apesar de Santo Agostinho afirmar que as verdades e os conceitos supremos são iluminados por *Deus* para o nosso espírito, ou seja, que o conhecimento provém da iluminação divina, ele admite, também, conhecimento através da experiência. Assim, para o autor de *Confissões*, o conhecimento procede da iluminação divina ou da razão humana, segundo nos fala Hessen (op. cit.). A intuição emotiva como uma forma de conhecimento foi reconhecida por vários filósofos, conforme nos conta Hessen e Manoel Garcia Morente em seu *Fundamentos da Filosofia* [14], reconhecimento esse sintetizado pelo matemático, físico e filósofo francês Blaise Pascal (1612-1662), na seguinte frase: — «Le coeur a ses raisons, que la raison ne connaît pas».

Vimos, até aqui, que a intuição nos proporciona conhecimento, quer através da razão, quer através da emoção. No entanto, a estrutura psíquica do sujeito é constituída de três órgãos cognoscentes: *Pensamento*, ligado à *razão*; *Sentimento*, ligado à *emoção*; e a *Vontade*, ligado à *volição*. Por seu lado, todo objeto apresenta três aspectos: *Essência*, *Valor* e *Existência*, ligados, respectivamente, à *razão*, à *emoção* e à *volição*. Assim, uma questão que surge naturalmente é a de saber se existe uma

*intuição volitiva*. Sim, existe, e um dos primeiros filósofos a senti-la foi o alemão Johann Gottlieb Fichte (1762-1814) ao observar que a existência do Universo e a própria existência do sujeito dependem de uma afirmação voluntária do próprio sujeito, o que significa dizer que o sujeito ao afirmar-se a si próprio, ou ao afirmar a existência de um objeto, ele o faz por vontade própria e não por pensamento. Um dos pontos altos da intuição volitiva encontra-se nos escritos do filósofo alemão Wilhelm Dilthey (1833-1911) ao afirmar que a existência das coisas não pode ser demonstrada pela razão, não pode ser descoberta pelo pensamento e sim, ela deve ser intuída por nossa vontade, uma vez que antes de pensarmos, nós desejamos, nós queremos, isto é, antes de sermos entes de pensamento, somos entes de desejos, vontades, de apetites, conforme salienta Morente (op. cit.). Assim, o que acabamos de expor sobre a intuição pode ser resumido no seguinte: — Por meio da intuição racional ou intelectual o sujeito percebe que o objeto *está*, isto é, sua essência; por meio da intuição emotiva o sujeito percebe o valor do objeto; e por fim, por intermédio da intuição volitiva o sujeito percebe que o objeto *é*, ou seja, que ele existe.

Apesar de filósofos e físicos aceitarem a idéia de que existe uma etapa ilógica e não-consciente no processo criativo científico, eles, no entanto, não questionam a natureza cognoscente de tal etapa, isto é, se racional, emotiva ou volitiva. Contudo, essa questão é mais ampla pois se estende também à criação artística. Pois bem, não é raro ouvirmos dizer que existe estreita ligação entre o gênio e a loucura. Aliás, essa afirmação já se encontra nos escritos dos filósofos antigos, conforme salienta o escritor brasileiro Ciro dos Anjos em seu livro *A Criação Literária* [15], ao observar que «os antigos viam na criação poética uma forma de demência; a esse respeito Demócrito, Platão, Aristóteles e Horácio se acham de pleno acordo». Não obstante os românticos persistirem nesse parentesco entre o criador e o louco, uma relação entre expressão e criação começa a ser ressaltada depois que as artes

libertam-se do «princípio da imitação da realidade», e começa-se a dar importância à personalidade do artista no ato criador. A atenção, portanto, desloca-se do objeto para o sujeito. Assim, o ideal artístico deixa de consistir na imitação da Natureza para se transformar na expressão dos sentimentos, dos desejos e das aspirações do artista, como acentua Vítor Manuel Aguiar e Silva em sua *Teoria da Literatura* [16]. Hoje, acredita-se que a criação artística seja uma mistura de pensar, sentir e querer, apesar de que existam poetas que acreditam que a criação poética seja oriunda apenas do pensar e não do sentir, já que o sentir pertence a quem aprecia a obra de arte. Isto é claramente visto no poeta brasileiro João Cabral de Melo Neto e particularmente em seu poema *Psicologia da Composição* publicado em Barcelona em 1947, no qual escreveu: — «Saio de meu poema como quem lava as mãos» (3).

Conforme salienta Hilgard [17], a criação é a mesma quer seja artística ou científica ou, segundo suas próprias palavras: — «Creative thinking goes on both in artistic production and in scientific discovery. Whereas the scientist is bent upon the discovery of fact and principles (and the invention and applications of theories), the artist seeks to interpret imaginatively things, relationships, or values as he perceives them (...) both artist and scientist may have the thrill of discovery or of invention; both may have a period of incubation before their thoughts are clarified through a 'hunch' or inspiration». Portanto, cremos que, semelhante à criação artística, a criação científica é uma mistura das três intuições: racional, emotiva e volitiva. Porém, a nosso ver, em cada situação determinada, há predominância de uma delas sobre as outras duas. Em vista disso, através de vários exemplos de intuições científicas que abordaremos neste trabalho (o maior número de exemplos será tomado na Física), poderemos tentar uma classificação «ingênua» de tais intuições: 1) *intuições emotivas* são aquelas que resultam em idéias isoladas, e que estão além da compreensão de quem as teve e, na maioria das

vezes, estão fora do paradigma (4) científico vigente. Em tais situações, o *sentir* é mais forte do que *pensar*; 2) *intuições racionais* são aquelas que decorrem de trabalhos conscientes sobre determinado problema e que, na maioria das vezes, ocorre fora do ambiente de trabalho. Nestes casos, a *razão* (5) predomina sobre o *sentimento* ou sobre a *volição*; 3) *intuições volitivas* são aquelas que resultam de acidentes verificados no ambiente de trabalho de quem as teve, e para as quais a atenção do cientista não estava voltada. A partir da *existência* do fenômeno inesperado, surgem então idéias novas relacionadas com o mesmo. Apesar de que, nestes casos e a nosso ver, a *volição* prevalecer sobre a *razão*, esta encontra-se também presente pois, como bem acentua Bronowski (op. cit.), «só uma mente inquisidora é capaz de transformar um acidente num ato providencial». Aliás, ter uma mente aberta em relação ao acaso já havia sido preconizado pelo filósofo grego Xenófanes, que floresceu no século V a.C., ao afirmar: — «Quem não espera o inesperado, não o perceberá» (6).

Vejamos alguns exemplos dos três tipos de intuição, segundo a «classificação» que fizemos acima. Começemos com as *intuições isoladas ou emotivas*. Segundo Schenberg, em seu livro *Pensando à Física* [18], o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) foi pró-

---

(3) Agradeço a minha mulher Célia, Professora de Teoria Literária da Universidade Federal do Pará, por ter-me chamado a atenção para esse poema, bem como pelas discussões sobre criação artística. É oportuno salientar que o filósofo e crítico literário brasileiro Benedito José Vianna da Costa Nunes (1929- ) em *João Cabral de Melo Neto* (Editora Vozes, 1971) faz uma análise do rompimento do lirismo por parte desse nosso poeta.

(4) Estamos usando o termo paradigma no mesmo sentido usado por Thomas S. Kuhn em *A Estrutura das Revoluções Científicas* (Editora Perspectiva, 1975. (Tradução: Beatriz Vianna Boeira e Nelson Boeira)).

(5) Cremos ser importante chamar atenção para o fato de que estamos usando a *razão* como um conceito filosófico e não psicanalítico.

(6) Citado por Popper, em seu livro *Conjecturas e Refutações*. (Editora da Universidade de Brasília, s/d. (Tradução: Sérgio Bath)).

digo em tais intuições. Por exemplo, em seu livro *Optics* [19], publicado em 1704, ele revela sua intuição sobre a natureza elétrica das forças dentro de um átomo, numa época em que nada se sabia sobre eletricidade e muito menos sobre átomos. Essa hipótese de Newton só foi confirmada cerca de 200 anos depois, com o advento da Teoria Atômica, desenvolvida a partir de fenômenos puramente atômicos, ocorrida nas últimas décadas do século XIX, como se pode ver em nossa *Crônica da Física Moderna* [20].

Apesar de Newton haver formulado uma teoria corpuscular da luz, o aspecto ondulatório da mesma não lhe era desconhecido. Assim é que, ainda em seu *Optics*, ele fala das experiências do físico italiano Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) a respeito da difração da luz, experiências publicadas somente em 1665, após a morte de Grimaldi. Newton, ainda nesse mesmo livro, fala das experiências realizadas em 1669 pelo médico dinamarquês Erasmus Bartholinus (1625-1698) sobre a dupla refração. Para poder interpretar tais fenômenos, Newton intuiu que, no caso da difração da luz através de uma fenda (como foi observada por Grimaldi), as regiões claras e escuras da figura de difração estariam ligadas ao acesso («fits») que os corpúsculos de luz teriam ao passar ou não pela fenda e, uma vez passados pela fenda, tais corpúsculos poderiam ir ou não para um lado ou para o outro lado da referida fenda. Aliás, a idéia de que a luz teria «lados», também foi utilizada pelo grande sábio inglês para explicar a dupla refração sofrida pela luz ao atravessar o espato-de-islândia, como observara Bartholinus. Newton, de maneira emotiva, intuiu assim, a idéia de «transversalidade» da luz, porém não a compreendeu inteiramente. Essa idéia foi retomada pelo físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829), em 1817 [21], somente depois de não haver mais dúvidas sobre o caráter ondulatório da luz, caráter esse outra vez evidenciado na experiência sobre interferência da luz realizada pelo próprio Young, em 1801, e na experiência de polarização da luz realizada

pelo físico francês Étienne Louis Malus (1775-1812), em 1808.

O estudo das propriedades magnéticas da matéria (dia, para ou ferromagnetismo), nos leva a mais um exemplo de intuição isolada ou emotiva. Vejamos qual. Em 1895, em sua tese de doutramento, o físico francês Pierre Curie (1859-1906; PNF, 1903) mostrou que a susceptibilidade magnética de um material paramagnético (oxigênio, por exemplo) variava na razão inversa de sua temperatura absoluta — hoje conhecida como *lei de Curie* —, e que uma substância ferromagnética comporta-se como uma substância paramagnética quando sua temperatura ultrapassa uma temperatura crítica, hoje conhecida como *temperatura de Curie*. Ora, tais leis empíricas precisavam, portanto, receber explicação teórica. Assim, para explicar o paramagnetismo, o físico francês Paul Langevin (1872-1946), em 1905, intuiu que os materiais paramagnéticos apresentavam momentos magnéticos (atômicos ou moleculares) permanentes (?), e, com isso, conseguiu demonstrar a lei de Curie. Nessa demonstração, Langevin partiu da hipótese de que uma amostra de material paramagnético, numa dada temperatura e colocada num campo magnético externo, apresentava seus momentos magnéticos permanentes distribuídos espacialmente e obedecendo à distribuição de Boltzmann, da Mecânica Estatística. A relevância dessa intuição (emotiva) de Langevin prende-se ao fato de que se ele fizesse um cálculo rigoroso do momento magnético, cálculo esse baseado na teoria clássica lorentziana dos elétrons (1892), isto é, se ele exprimisse o momento magnético atômico ou molecular como função das coordenadas e das velocidades dos elétrons que o compõem, ele chegaria a um resultado nulo, indicando que o paramagnetismo é incompatível com a Mecânica e o Eletromagnetismo Clássicos, conforme nos fala Anatole Abragam em seu livro *Réflexions d'un Physicien* [22]. Portanto, quando Langevin intuiu

---

(?) Essa idéia já havia sido suscitada pelo físico alemão, Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), em 1852. (Cf. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 7. 1978. Macropaedia. The University of Chicago).

que o momento magnético do átomo ou da molécula tem um valor fixo, ele o estava quantizando sem o saber. Essa quantização foi determinada experimentalmente em 1922, pelos físicos alemães Otto Stern (1888-1969; PNF, 1943) e Walther Gerlach (1899-1979), ao observarem a deflexão de um feixe de átomos de prata movendo-se através de um campo magnético inhomogêneo. Nessa experiência, evidenciaram não só a existência de momentos magnéticos<sup>(8)</sup>, bem como a sua quantização espacial. Desse modo, o resultado encontrado por Stern-Gerlach mostrou que os elétrons atômicos não podiam tomar qualquer orientação espacial como fora sugerido por Langevin e sim, somente determinadas posições no espaço. A fórmula de Langevin foi modificada pelo físico francês Léon-Nicholas Brillouin (1889-1969), em 1927, o qual utilizou-se da Mecânica Quântica [23].

Até aqui, vimos alguns exemplos de intuições isoladas ou emotivas, que é um dos três tipos de intuição que acreditamos participarem do processo criativo científico. Assim, em prosseguimento ao estudo de tais intuições, vamos examinar agora alguns exemplos de *intuições racionais*. Conforme vimos anteriormente, essas intuições decorrem de trabalhos conscientes sobre determinado assunto e que, no entanto, afloram à mente do cientista em lugares os mais insólitos. O exemplo clássico desse tipo de intuição e, por isso mesmo, é sempre citado em toda literatura sobre criatividade, é o da descoberta das funções fuchsianas por Poincaré. (Aliás, conforme já dissemos, foi essa descoberta que levou Poincaré à formulação de sua «teoria da criação matemática»). Vejamos como chegou até ela. Desde jovem ele se preocupou com um tipo de função que generalizasse as funções conhecidas da análise elementar (circular, hiperbólica e elíptica), conhecida como função automórfica. Um tipo desta, a que generaliza a função elíptica, já havia sido descoberta em 1866, pelo matemático alemão Lazarus Fuchs (1833-1902). Pois bem, muito embora continuasse a procurar outra dessas funções, Poincaré não a encontrava, até

que um certo dia ele a encontrou. Porém, deixemos que ele próprio descreva esse episódio, como o fez em seu *Science et Méthode* (op. cit.):

«Durante 15 dias, lutei para provar que não podia haver qualquer função como aquela que passei a chamar de funções fuchsianas. Eu era bem ignorante nessa época; todo dia sentava à mesa de trabalho, ficava uma ou duas horas, tentava um grande número de combinações e não alcançava resultado algum. Uma noite, contrariando meus hábitos, tomei café e não consegui dormir. Milhares de idéias me surgiram na cabeça; eu as sentia se entrechocando, até que se foram formando pares, por assim dizer, em uma combinação estável. Na manhã seguinte, eu tinha estabelecido a existência de uma classe de funções fuchsianas, aquelas que vêm das séries hipergeométricas; precisei apenas escrever os resultados, o que levou poucas horas. Então, quis representar essas funções pelo quociente de duas séries; essa idéia foi perfeitamente consciente e deliberada, a analogia com funções elípticas me guiou. Eu me perguntei que propriedades essas séries deveriam ter caso existissem e consegui, sem dificuldade, formar a série que chamei de 'teta-fuchsiana'. Exatamente nessa época, deixei Caen, onde estava vivendo, para fazer uma excursão geológica sob os auspícios da Escola de Minas. As mudanças da viagem fizeram-me esquecer o trabalho matemático. Chegando a Coutances, entramos em um ônibus para ir a algum lugar. No momento em que coloquei o pé no degrau me veio a idéia, sem que nada em meus pensamentos anteriores tenha preparado o caminho para

---

(8) O nome *magneton de Bohr*, para a unidade fundamental de momento magnético, foi sugerido em 1920, pelo físico austríaco Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945). (Cf. Mehra e Rechenberg. *The Historical Development of Quantum Theory*, Volume, 1, parte 2. Springer-Verlag, 1982).

isso, de que as transformações que eu tinha usado para definir as funções fuchsianas eram idênticas às da geometria não-euclidiana. Não verifiquei a idéia, não teria tido tempo para isso, pois, assim que tomei lugar no ônibus, continuei uma conversa já iniciada, mas tive a perfeita certeza. De volta a Caen, eu verifiquei o resultado depois de estar com a cabeça repousada e consciente».

Assim, depois de estudar esse assunto, Poincaré publicou cinco artigos referentes ao mesmo, entre 1882 e 1884, na *Acta Mathematica*, revista essa que acabara de ser fundada. Aliás, é oportuno observar que o grande matemático alemão, Leopold Kronecker (1823-1891) quando leu o primeiro desses cinco artigos, que inclusive iniciara aquela revista, advertiu o editor da mesma, Mittag-Leffler, que a imaturidade e a obscuridade desse artigo de Poincaré poderia matar esse jornal, segundo nos conta Morris Kline [24].

Em Física, existem dois exemplos históricos dessas *intuições racionais*. O primeiro deles é devido ao matemático, físico e engenheiro grego Arquimedes (287-212), por ocasião de sua descoberta do *princípio da flutuabilidade*, cuja experiência que levou a tal descoberta foi descrita pelo arquiteto romano Marcus Vitruvius Pollio (c. 70 a.C. - ?) em seu famoso livro *De Architectura*. Segundo Vitruvius, Hierão II, rei de Siracusa, desconfiava haver sido enganado por um ourives, que teria misturado prata na confecção de uma coroa de ouro, e pediu a Arquimedes que verificasse a veracidade de sua suspeita. A partir daí, deixemos que o próprio Vitruvius descreva o desenrolar dos acontecimentos <sup>(9)</sup>:

«Enquanto Arquimedes pensava sobre o problema, chegou por acaso ao banho público, e lá, sentado na banheira, notou que a quantidade de água que transbordava era igual à porção imersa de seu corpo. Isto lhe sugeriu um método de resolver o problema, e sem demora saltou alegremente

da banheira e, correndo nu para casa, gritava bem alto que tinha achado o que procurava. Pois, enquanto corria, gritava repetidamente em grego 'Eureka!' 'Eureka!'. Em seguida à descoberta, teria tomado duas massas com o mesmo peso da coroa, uma de ouro e outra de prata. Enchendo com água um grande vaso, nele mergulhou a massa de prata. Seu peso correspondia à água que transbordava do vaso. Removeu então a massa de prata e tornou a encher o vaso com a mesma quantidade de água que transbordara, de maneira que a água voltou ao nível anterior, até a borda. Descobriu assim que o peso da prata equivalia à determinada medida de água».

Ainda segundo Vitruvius, ao repetir a mesma experiência com a massa de ouro e com a própria coroa de ouro de Hierão II, ao medir os respectivos volumes de água deslocados, Arquimedes determinou a quantidade de prata contida na coroa e comprovou, dessa maneira, a fraude do ourives. O resultado de tal experiência levou Arquimedes a repeti-la com outros corpos e, ao fazer o estudo teórico da flutuabilidade de corpos, basicamente de formas parabolóides chegou à seguinte conclusão: — «Quando um corpo flutua em um fluido, seu peso é igual ao do fluido deslocado e, quando submerso, seu peso diminui daquela quantidade». Este é portanto o *princípio da flutuabilidade*, hoje conhecido como *princípio de Arquimedes*, e encontra-se muito bem descrito no livro do próprio Arquimedes intitulado *On Floating Bodies* [25].

O segundo dos exemplos históricos sobre intuições racionais a que nos referimos acima, é, como se sabe, devido a Newton por ocasião da descoberta da *lei da gravitação universal*, que deveu-se à intuição que tivera ao ver cair

---

<sup>(9)</sup> As citações utilizadas são devidas a H. Moyses Nussenzveig em *Curso de Física Básica 2* (Edgard Blücher Ltda., 1981) e por W. I. B. Beveridge em *Sementes da Descoberta Científica* (T. A. Queiroz e EDUSP, 1981. (Tradução: S. R. Barreto)).

uma maçã, em sua cabeça (para uns) ou junto a seus pés (para outros), na fazenda de sua mãe em Woolsthorpe, fazenda onde nascera e para onde se refugiara nos anos de 1665-1666, devido à grande peste que assolara a cidade de Londres por essa ocasião<sup>(10)</sup>. É oportuno lembrar que esses anos em que ficou em Woolsthorpe, foram os mais profícuos do gênio inventivo do grande sábio inglês, pois foi nesse período que fez suas principais descobertas, tais como: a potência de um binômio e sua redução a uma série (hoje, conhecido como *binômio* ou *série de Newton*), o método das tangentes (hoje, conhecido como *fórmula de interpolação de Newton*), os métodos direto e indireto das fluxões (*cálculo diferencial e integral*, como hoje são conhecidos), a decomposição espectral da luz branca do Sol (*prisma e disco de Newton*), além, é claro, da *lei de gravitação universal*. Para chegar a esta lei, Newton usou mais uma vez a sua grande intuição ao formular a hipótese de que a mesma força que atraía a maçã para baixo também mantinha a Lua presa em sua órbita. Esta era uma hipótese audaciosa, já que a filosofia aristotélica dizia que o movimento de objetos situados na Terra e no Céu era regido por leis diferentes. Essa hipótese, contudo, precisava ser confirmada. Para isso, Newton passou a comparar as forças entre Terra e Lua e entre Terra e maçã. Em 1666, conforme o próprio Newton mais tarde relatou (cf. Cortés Pla, op. cit.), ele demonstrara que aquelas forças variavam com o inverso do quadrado da distância, utilizando, nessa demonstração, a lei que o astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630) havia formulado em 1619, segundo a qual «o quadrado do período dos planetas é proporcional ao cubo da distância média entre eles».

Ao fazer a comparação entre as forças Terra-Lua e Terra-maçã, Newton determinou a distância até a Lua em termos do raio terrestre. Ora, tal distância já era conhecida desde quando o astrônomo grego Hiparco de Rhodes (190-120) a calculou, por volta de

130 a.C., como sendo aproximadamente 60 raios terrestres. O raio terrestre, por sua vez, já havia sido calculado pelo astrônomo e poeta grego Eratóstenes de Cyrene (276-194), como sendo da ordem de 6500 kms. Ora, é claro que Newton utilizou um valor mais recente para o raio terrestre como, por exemplo, o que havia sido calculado pelo astrônomo e matemático holandês Willebrord van Roijen Snell (1591-1626), em 1615. Assim, ao comparar esse valor do raio terrestre com que o obtinha com a sua hipótese, encontrou uma relação de 7/8. Tal diferença parecia suficiente para negar sua hipótese.

Muito embora essa discrepância encontrada por Newton pudesse desestimulá-lo no sentido de aceitar sua hipótese da universalidade da força gravitacional, contudo, o que o fez abandonar o problema da gravitação por quase 20 anos, foi o fato de que não conseguira demonstrar que a Terra pudesse ser reduzida a um ponto central, ao tratar o problema da atração lunar. Veio a conseguir essa demonstração somente em 1685, segundo falam seus biógrafos, entre os quais Cortés Pla (op. cit.) e Lorde Keynes [26]. Assim, em seu famoso *Mathematical Principles of Natural Philosophy* [27], publicado pela primeira vez em 1687, Newton afirma que todos os corpos no Universo estão submetidos a uma força universal de ação à distância — a *força gravitacional* — e, com isso, segundo fala Leite Lopes em *L'Image Physique du Monde: de Parménide*

---

(10) Essa história foi contada ao mundo científico pelo famoso escritor francês, François-Marie Arouet Voltaire (1694-1778), ao divulgar em França a obra de Newton, através de seu livro *Éléments de Philosophie de Newton*, publicado em 1738. Nesse livro, Voltaire conta que uma sobrinha de Newton, Madame Conduit (Catalina Barthon), foi quem lhe deu a informação de que a idéia de Newton sobre a atração universal lhe foi sugerida pela queda de uma fruta em sua fazenda. Essa citação encontra-se no livro de H. Moysés Nussenzweig, intitulado *Curso de Física Básica 1* (Edgard Blücher Ltda, 1981) e no livro *Isaac Newton* (Espasa — Calpe Argentina, S.A., 1945) de Cortés Pla.



à Einstein [28], consegue a segunda teoria unificada em Física. Ainda segundo Leite Lopes, a primeira fora feita por Galileu, em 1602, ao propor a idéia de um Universo aberto anti-aristotélico, unificado e governado pelas mesmas leis universais, ou seja, a idéia de que as leis do Céu e da Terra se fundem numa mesma lei.

Como exemplo final de intuição ocorrida a um pesquisador fora de seu local de trabalho, vamos descrever o acontecido com o físico norte-americano Donald Arthur Glaser (1926- ), e que levou à invenção da *câmara de bolhas*. Durante o trabalho na Universidade de Michigan, sua atenção foi voltada para a *câmara de névoa* ou *de Wilson*, utilizada na detecção de partículas elementares. Apesar do aperfeiçoamento introduzido a essa câmara pelo físico inglês, Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974), em 1931, ela apresentava algumas limitações para seu uso. Por exemplo, partículas de energia extremamente elevada, tais como as encontradas nos raios cósmicos ou produzidas em aceleradores, produziam trajetórias tão longas que não eram totalmente contidas em tais dispositivos. Por outro lado, a baixa densidade do gás (pouca matéria por unidade de volume) nessas câmaras significava que a maior parte das partículas escapava das mesmas antes de deixar traços que as identificassem.

Pois bem, eram esses alguns dos problemas apresentados pelas câmaras de Wilson e que, certamente, preocupavam os físicos experimentais que trabalhavam com ela e, entre eles, encontrava-se Glaser. Certo dia, como nos fala James Trefil em seu livro *From Atoms to Quarks* [29], ao tomar uma cerveja num bar em Ann Arbor, Glaser percebeu que a cerveja ao ser aberta, começava a borbulhar. Então veio-lhe a intuição de construir um dispositivo semelhante à câmara de névoa e baseado no mesmo princípio que faz a cerveja borbulhar. Ora, pensou Glaser, quando se alivia bruscamente a pressão exercida sobre um líquido no limite de ebulição, forma-se um grande número de bolhas durante o estado metaestável entre

as fases gasosa e líquida. Porém, aumentando-se a pressão, as bolhas desaparecem. Com essa idéia em mente, Glaser passou a construir, em 1952, a sua *câmara de bolhas*. Tomou inicialmente o éter etílico e o manteve em uma temperatura acima de seu ponto normal de ebulição, mas impedido de ferver pela aplicação de uma pressão, tornando-o, pois, um líquido superaquecido. Assim, quando partículas carregadas (ionizantes) atravessam o líquido no momento de uma descompressão adiabática, havia formação de pequenas bolhas ao longo da trajetória de tais partículas, de maneira análoga à formação de gotículas de névoa na câmara de Wilson. Quando as bolhas crescem o suficiente, dispara-se um poderoso «flash» eletrônico e fotografias estereoscópicas da câmara são então efetuadas. Glaser observou posteriormente que a substituição do éter etílico pelo hidrogênio líquido aumentava a eficiência de sua câmara. Convém observar que a grande vantagem da câmara de bolhas em relação à de névoa, decorre do fato de que a substituição do gás super-saturado pelo líquido super-aquecido, faz com que haja um aumento de mais de mil vezes na densidade da câmara, possibilitando, dessa maneira, o maior número de colisões entre as partículas ionizantes e os alvos (partículas constituintes do líquido da câmara) e, em consequência, as trajetórias das partículas que estão sendo observadas se tornam mais curtas. Essa invenção de Glaser, deu-lhe o Prêmio Nobel de Física de 1960.

Após havermos estudado alguns exemplos de *intuições racionais*, concluiremos este trabalho sobre o papel da intuição no processo criativo científico, examinando algumas *intuições volitivas*. Lembremos que definimos essas intuições como as que resultam de acidentes verificados por ocasião do trabalho desenvolvido por uma cientista, porém sem nenhuma relação com o mesmo. No entanto, a partir da *existência* do fenômeno inesperado, ele intui novas idéias relacionando-as com esse mesmo fenômeno. Existem descobertas acidentais (conhecidas também com o nome de *serendi-*

*pitidades* <sup>(11)</sup>) famosas na ciência médica, como por exemplo, a da penicilina em 1928, pelo bacterologista inglês, Sir Alexander Fleming (1881-1951; PNF, 1945) e a do tratamento da depressão psicótica pelo lítio, feita em 1948, pelo psiquiatra John Cade, e muito bem descritas por Beveridge (op. cit.). No entanto, neste trabalho nós nos deteremos apenas em alguns exemplos ocorridos em Física.

Começamos pelo ocorrido com Fermi por ocasião de sua descoberta do processo de obtenção de nêutrons lentos. Na primeira metade da década de 1930, após a descoberta do nêutrons pelo físico inglês, Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935), em 1932, e da descoberta da radioatividade artificial pelo casal de físicos franceses, Irène (1897-1956; PNQ, 1935) e Jean-Frédéric Joliot-Curie (1900-1958; PNQ, 1935), em janeiro de 1934, uma das principais linhas de pesquisa em Física Nuclear era o estudo da radioatividade artificial induzida por nêutrons. Assim, Fermi e seus colaboradores <sup>(12)</sup> da Universidade de Roma — conhecido como *o grupo de Roma* — a partir de janeiro de 1934 começaram a bombardear com nêutrons todos os elementos químicos em ordem de número atômico crescente: hidrogênio, lítio, berílio, boro, carbono, nitrogênio e oxigênio. No entanto, a tentativa de obterem isótopos radioativos de tais elementos, malogrou. Conseguiram, porém, êxito com o fluor ao obterem um isótopo radioativo desse elemento. Esse trabalho sistemático de bombardeamento de elementos químicos por nêutrons prosseguiu até que, em maio de 1934, o grupo irradiou o mais pesado dos elementos até então conhecidos — o urânio. Apesar do apuro experimental com que realizaram esta última experiência, o resultado da mesma apresentava-se confuso, pois encontraram diversos períodos radioativos. Em vista disso, acreditaram haver obtido um novo elemento químico transurânico, o qual chegou a ser denominado por Fermi de *urânio-X*. Essa dificuldade não impediu que Fermi e seu grupo continuassem o trabalho sobre radioatividade induzida por nêutrons e, mais ainda, que Fermi fizesse uma

descoberta acidental, no dia 22 de outubro de 1934, conhecida hoje como processo de obtenção de nêutrons lentos. Tal descoberta foi descrita por Fermi em uma conversa com o astrofísico indiano Subrahmanyam Chandrasekhar (1910- ; PNF, 1983) da seguinte maneira [30]:

«—Estávamos trabalhando com afincos na radioatividade induzida por nêutrons e os resultados que estávamos obtendo não faziam sentido. Certo dia, quando cheguei ao laboratório, ocorreu-me a idéia de que deveria examinar o efeito da colocação de uma peça de chumbo diante dos nêutrons incidentes. E, ao contrário de meu costume, esmerei-me em ter a peça de chumbo precisamente elaborada, isto é, nas medidas e especificações precisas. Eu estava claramente insatisfeito com alguma coisa; tentara todas as ‘desculpas’ para adiar a colocação de peça de chumbo em seu lugar. Quando finalmente, com alguma relutância, ia colocá-la em seu lugar, disse para mim mesmo: —‘Não, não quero aqui esta peça de chumbo; o que quero é uma peça de parafina’. Foi assim mesmo sem advertência prévia, sem raciocínio consciente anterior. Imediatamente apanhei o primeiro pedaço de parafina que apareceu na minha frente e coloquei-o onde a peça de chumbo deveria estar».

---

<sup>(11)</sup> A palavra *serendipidade* («serendipity») foi inventada pelo escritor inglês, Horace Walpole (1717-1797), em 1754, para representar as descobertas acidentais. Para tal, baseou-se no seguinte conto de fadas persa: A Princesa de Serendipe — antigo nome do Ceilão — tinha três pretendentes e a cada um incumbiu uma tarefa impossível: fracassaram todos três, mas, no decorrer de seus heróicos esforços cada qual, no entanto, fez descobertas afortunadas e inesperadas, por mero acidente, segundo nos contam Lynn White Jr., em *As Fronteiras do Conhecimento* (Editora Fundo de Cultura, s/d. (Tradução: Almira Guimarães)) e W. I. B. Beveridge (Op. cit.).

<sup>(12)</sup> O grupo de Roma era constituído por Enrico Fermi, Edoardo Amaldi, Oscar d’Agostino, Franco Rasetti, Emilio Gino Segré, e Bruno Pontecorvo.

Ao perceber que os nêutrons tinham sua velocidade reduzida devido a colisões elásticas com a parafina (substância rica em hidrogênio), Fermi intuiu volitivamente que tais nêutrons seriam mais efectivos que os rápidos (estes, oriundos de uma fonte de radônio e berílio) na produção de certas reações nucleares, pois, por serem lentos, eram mais facilmente absorvidos. De posse dessa nova técnica, Fermi e seu grupo passou a realizar experiências com esse tipo de nêutrons, posteriormente denominados de *nêutrons térmicos*. Apesar do sucesso dessa técnica, o grupo de Roma não foi capaz de perceber que tais nêutrons eram a chave da fissão nuclear, o que só ocorreu muito mais tarde quando Fermi já se encontrava nos Estados Unidos, ocasião em que realizou a primeira fissão nuclear controlada, no dia 2 de dezembro de 1942, no pátio da Universidade de Chicago. Contudo, esse êxito de Fermi deve-se não só ao seu próprio trabalho, como também à experiência dos químicos alemães, Otto Hahn (1879-1968; PNQ, 1944) e Fritz Strassmann (1902-1980) realizada em 1939, sobre a obtenção de elementos alcalino-terrosos através da desintegração do urânio bombardeado com nêutrons, e, também, à interpretação de experiências desse tipo como sendo devidas a uma fissão nuclear, pela física austríaca, Lise Meitner (1878-1968) e seu sobrinho, o físico austríaco Otto Robert Frisch (1904-1979), ainda em 1939. Nesta oportunidade, cabem aqui duas observações: a primeira, é que graças às suas experiências com nêutrons lentos, Fermi ganhou o Prêmio Nobel de Física de 1938; a segunda, refere-se ao fato de que somente em 1940, os físicos-químicos norte-americanos, Edwin Mattison McMillan (1907- ; PNQ, 1951) e Phillip Hange Abelson (1913- ) conseguiram obter em laboratório o primeiro elemento transurânico — o *neptúnio*.

Encerraremos esta parte referente às *intuições volitivas* com dois exemplos históricos de serendipidade em Física: as descobertas dos raios-X e da radioatividade. Começamos pela

descoberta dos Raios-X feita pelo físico alemão, Wilhelm Konrad Roentgen (1845-1923), em 1895. O interesse principal de Roentgen relacionava-se com a luminescência (fluorescência e fosforescência) que os raios catódicos provocavam em determinados produtos químicos. Assim, com o objectivo de melhor observar esse fenômeno, no dia 8 de novembro de 1895, Roentgen escureceu sua sala de trabalho e colocou o tubo de Hittorf (produtor de raios catódicos), em uma caixa de papel preto. Ao ligá-lo, observou que uma folha de papel embebida com platino — cianeto de bário, colocada a uma certa distância do tubo, estava brilhando. Ao desligar o tubo, verificou que a luminosidade da folha desaparecia, e que voltava a brilhar tão logo o tubo fosse religado. Surpreso com o inesperado fenômeno, Roentgen resolveu investigá-lo com mais rigor<sup>(13)</sup>. Virou a folha embebida com o composto de prata, deslocou-a, colocou certos objetos (papel grosso e finas lâminas metálicas) entre ela e o tubo, levou-a para uma sala vizinha, etc. Por fim, por desconhecer a natureza do fenômeno que acabara de observar, intuiu então que deveria tratar-se de uma «nova espécie de raios», aos quais deu o nome de *raios-X*, por ser *X* o símbolo matemático que representa uma variável desconhecida. Assim, partindo da existência dos raios-X, Roentgen prosseguiu suas experiências no sentido de descobrir algumas de suas propriedades características. Inicialmente observou que os mesmos eram capazes de ionizar gases, e que, no entanto, não eram desviados quer por campos elétricos, quer por campos magnéticos. Em seguida, observou que os mesmos não eram nem refletidos nem refratados por determinadas superfícies. Depois de uma série de experiências realizadas por Roentgen, ele só se convenceu de sua descoberta quando conseguiu fixá-los em placas fotográficas. Em vista disso, preparou o primeiro trabalho sobre os raios-X no dia 28 de dezembro de 1895. Logo que

(13) *Acurácia* no original (alteração da responsabilidade da C. R.).

anunciou sua descoberta, muitos cientistas começaram a investigar novas propriedades dos «raios de Roentgen». É importante frisar que graças a essa descoberta, foi agraciado com o primeiro Prêmio Nobel de Física, instituído em 1901.

Ao procurar entender a natureza dos raios-X, o físico francês, Antoine Henri Becquerel (1852-1923) descobriu de modo acidental, em 1896, um novo fenômeno físico posteriormente denominado de *radioatividade*. Vejamos de que maneira ocorreu esse evento importante da História da Ciência, e que se encontra muito bem descrito por Segrè<sup>(14)</sup>. Na sessão do dia 20 de janeiro de 1896 da Academia Francesa de Ciências, Poincaré apresentou as primeiras fotografias de raios-X enviadas por Roentgen. Presente a essa sessão, Becquerel perguntou a Poincaré de que parte do tubo de Hittorf que Roentgen utilizara, haviam saídos os raios-X. — «Da parte oposta ao catodo, que se torna fluorescente», respondeu Poincaré. Sendo especialista em luminescência, especialidade que aprendera com seu avô Antoine-César (1788-1878) e com seu pai Alexandre-Edmond (1820-1891), Henri passou a realizar experiências procurando uma relação entre as substâncias fluorescentes e a emissão de raios-X por parte das mesmas. Com esse objetivo em mente, em meados de fevereiro de 1896, Henri recobriu uma chapa fotográfica com papel escuro, depois colocou cristais de sulfato de urânio-potássio (uranilo) sobre o papel, e expôs o conjunto aos raios solares. Ao revelar as chapas fotográficas, percebeu que as mesmas haviam sido veladas. A explicação que deu para o fato de ter sido impressionada a chapa fotográfica, foi a de que a luz solar provocara fluorescência nos cristais de uranilo com a emissão de raios-X. Estes, por sua vez, ao atravessarem o papel escuro que envolvia os cristais, foram impressionar a chapa fotográfica. Becquerel procurou então repetir essa experiência no final de fevereiro. Porém, o tempo nublado em Paris o impediu de realizá-la. Becquerel resolveu repetir a experiência no dia 1.º de março, mesmo que o

tempo continuasse nublado. Esperando encontrar imagens muito fracas ao revelar a chapa fotográfica, foi surpreendido com imagens de grande intensidade. Em vista disso, intuiu volitivamente que os cristais emitiam novas espécies de «raios» até então desconhecidos, descobrindo dessa maneira um novo fenômeno físico. A partir da existência desses «raios», Becquerel prosseguiu com novas experiências no sentido de estudar a natureza física dos mesmos. Assim é que, no dia 9 de março, Becquerel descobriu que esses «raios» ionizavam gases tornando-os condutores. Em vista disso, passou a utilizar um tosco electrosκόpio de folha de ouro com o objetivo de determinar a «atividade» desses «raios», o que conseguia medindo a ionização por eles produzida. Descobriu ainda Becquerel que esses novos «raios» eram emitidos pelo urânio. Ao tomarem conhecimento dessa descoberta, alguns cientistas passaram a estudar sistematicamente esse novo e revolucionário fenômeno físico. Por essa descoberta, Becquerel compartilhou com o casal Curie, o Prêmio Nobel de Física de 1903.

Ao finalizarmos este trabalho no qual procuramos destacar o papel da intuição nas descobertas e invenções na Física, é importante frisar que ele está longe de ser completo pois, como o próprio leitor percebeu (e certamente reclamou!), não fizemos nenhuma referência a conhecida intuição de físicos célebres não abordada por nós. Por exemplo, a do físico e matemático escocês, James Clerk Maxwell (1831-1879) por ocasião da formulação de sua teoria de unificação entre a Óptica, a Eletricidade e o Magnetismo (1868-1870), conforme salienta Banesh Hoffman em *L'étrange histoire des quanta* [31]; a de Einstein, por ocasião da formulação de seus dois postulados básicos da Relatividade Restrita (1905), já que, conforme salienta Holton (op. cit.), o próprio Einstein

---

(14) O autor refere-se ao livro de Emílio Segrè *From X-Rays to Quarks*, W. H. Freeman and Co, 1980, tradução de *Personaggi e Scoperte nella Fisica Contemporanea*, Mondadori, 1976 (N.R.).

assim os considerava; ou a de Dirac em seus trabalhos pioneiros sobre a Teoria Quântica dos Campos (1927). Também não falamos da intuição do físico francês, Nicolas-Léonard Sadi Carnot (1796-1832) sobre o princípio da conservação da energia <sup>(15)</sup>, cuja formulação matemática foi apresentada em 1847, pelo fisiologista e físico alemão, Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894). Certamente o exame das obras científicas (e de biografias) desses físicos (e de outros, também) mostrarão outros exemplos sobre os três tipos de intuição que acreditamos compor o processo criativo da Física, os quais deixaremos para uma outra oportunidade ou, quem sabe, para algum leitor que acredite ser esse o caminho para o entendimento do Processo Cognitivo da Física.

---

(15) Para Mário Schenberg (*Pensando a Física* (Op. cit.)), a descoberta do princípio da conservação da energia foi uma das grandes conquistas da Física do século XIX.

#### REFERÊNCIAS

- [1] BRONOWSKI, J. — *Um Sentido do Futuro*. Editora Universidade de Brasília. (Tradução: Sérgio Bath) (1980).
- [2] ASIMOV, I. — *Os Gênios da Humanidade*. Bloch Editores. (Tradução: José Reis) (1974).
- [3] WYMER, P. — *Eureka!* Editorial Labor do Brasil S.A. (Tradução: Manoel de Seabra) (1975).
- [4] BRONOWSKI, J. — (Op. cit.).
- [5] KNELLER, G. F. — *Arte e Ciência da Criatividade*. Instituição Brasileira de Difusão Cultural S.A. — IBRASA. (Tradução: José Reis) (1978).
- [6] KOESTLER, A. H. — *The Act of Creation*. Macmillan (1964).
- [7] MOLES, A. A. — *A Criação Científica*. Editora Perspectiva e Editora da Universidade de São Paulo — EDUSP. (Tradução: Gita K. Guinsburg) (1971).
- [8] POINCARÉ, E. — *Science et Methode*. Flammarion (1918).
- [9] POPPER, K. R. — *A Sociedade Aberta e Seus Inimigos*. Editora Itatiaia e EDUSP. (Tradução: Milton Amado) (1974).
- [10] KOESTLER, A. H. — *Os Sonâmbulos*. IBRASA. (Tradução: Alberto Denis) (1961).
- [11] ROCHA E SILVA, M. O. — *Ciência e Cultura*, 23 (1): 1-7 (1971).
- [12] HESSEN, J. — *Teoria do Conhecimento*. Armênio Amado, Editor. (Tradução: Antonio Correia) (1973).
- [13] PLOTINO — *Enneads*. Great Books of the Western World (Tradução: Stephen Mackenna and B. S. Page) (1971).
- [14] MORENTE, M. G. — *Fundamentos de Filosofia*. Editora Mestre Jou. (Tradução: Guilherme de la Cruz Coronado) (1970).
- [15] ANJOS, C. — *A Criação Literária*. Tecnoprint Gráfica S. A. (1967).
- [16] AGUIAR E SILVA, V. M. — *Teoria da Literatura*. Livraria Almedina (1973).
- [17] HILGARD, E. R. — *Introduction to Psychology*. Harcourt, Brace & World, Inc (1962).
- [18] SCHENBERG, M. — *Pensando a Física*. Editora Brasiliense (1984).
- [19] NEWTON, I. — *Optics*. Great Books of the Western World (1971).
- [20] BASSALO, J. M. F. — *A Crônica da Física Moderna*. *Ciência e Cultura*, 37 (5): 735 (1985).
- [21] ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, X — *Micropaedia*. The University of Chicago (1978).
- [22] ABRAGAM, A. — *Réflexions d'un Physicien*. Hermann (1983).
- [23] ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, 7 — *Micropaedia*. The University of Chicago (1978).
- [24] KLINE, M. — *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, Oxford University Press (1972).
- [25] ARQUIMEDES — *On Floating Bodies. Book One, Two*. Great Books of the Western World. (Tradução: Sir Thomas L. Heath) (1971).
- [26] KEYNES, J. H. — *Newton*. *Revista de Ensino de Física*, 5 (2): 43-52 (1983).
- [27] NEWTON, I. — *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Great Books of the Western World. (Tradução: Andrew Motta e Florian Cajori) (1971).
- [28] LETTE LOPES, J. — *L'Image physique du monde: de Parménide à Einstein*. Centre de Recherches Nucléaires, CRN/HE-O5. Strasbourg (1983).
- [29] TREFIL, J. S. — *From Atoms to Quarks*. Charles Scribner & Sons (1980).
- [30] KNELLER, G. F. — *A Ciência como Atividade Humana*. Zahar Editores e EDUSP (Tradução: Antonio José de Souza) (1980).
- [31] HOFFMANN, B. — *L'étrange histoire des quanta*. Éditions du Seuil (1981).

# ○ «paradoxo» das temperaturas absolutas negativas

JOSÉ CARLOS F. N. LOPES (\*)

Escola Sec. de Rocha Peixoto — Póvoa de Varzim

## 1. Temperaturas absolutas negativas?!

Ao pensarmos em temperaturas absolutas, imaginamos uma grandeza que, ao contrário das temperaturas medidas em quaisquer outras escalas, é sempre positiva. Por seu turno, o zero absoluto, sendo inatingível, aparece-nos como uma espécie de *nec plus ultra*. Qual poderá ser, então, o significado de temperaturas absolutas negativas? Será o de temperaturas «abaixo de zero», mais «frias» do que as temperaturas absolutas positivas? Neste caso, se tivéssemos um sistema a 0,1 K e o arrefecêssemos a uma temperatura absoluta negativa, o sistema teria de passar pelo zero absoluto? Se sim, o 3.º Princípio da Termodinâmica — que nega a possibilidade de se atingir o zero absoluto através de uma série finita de processos (mesmo que ideais) — será violado? E o 1.º e 2.º Princípios: serão afectados por esta ideia de temperaturas absolutas negativas?

Recordemos o conceito de temperatura. A definição original desta grandeza é a seguinte: num ciclo de Carnot reversível as quantidades de calor trocadas (entre o sistema e as fontes) estão entre si como as temperaturas absolutas das fontes. Se  $Q_1$  e  $Q_2$  designarem os valores algébricos das quantidades de calor trocadas, respectivamente, às temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , e considerando que  $Q_1$  e  $Q_2$  são positivas quando recebidas pelo sistema, tem-se a seguinte relação:

$$Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0 \quad (1)$$

No ciclo directo (reversível) há fornecimento de trabalho ao exterior,

$$W = Q_1 + Q_2 > 0$$

Então, se  $T_1$  e  $T_2$  tiverem o mesmo sinal <sup>(1)</sup> a eq. (1) implica que  $Q_1$  e  $Q_2$  tenham, necessa-

riamente, sinais opostos. Seja, por exemplo, em concordância com a desigualdade anterior,

$$Q_1 > -Q_2 > 0$$

Será então  $T_1/T_2 > 1$ , o que implica  $T_1 > T_2 > 0$  (correspondente à situação habitual) ou  $T_1 < T_2 < 0$ : esta parece uma situação absurda pois o sistema que descreve o ciclo de Carnot receberia calor da fonte 1, cederia calor à fonte 2 (com  $T_2 > T_1$ ) e, simultaneamente, cederia trabalho ao exterior!

Um caso ainda mais preocupante ocorre se considerarmos um ciclo (não necessariamente reversível) em que o sistema troque calor com *uma* única fonte: é, então,  $W = Q$  e  $Q/T \leq 0$ . Logo  $W = Q \leq 0$ , se  $T > 0$  (o que corresponde à habitual conversão, integral, de trabalho em calor); mas  $W = Q \geq 0$  se  $T < 0$  — o que, aparentemente, corresponderia a uma violação do 2.º Princípio da Termodinâmica. Poderemos, então, concluir que a ideia de temperaturas absolutas negativas é absurda?

Antes de decidirmos, convém debruçarmos-nos sobre o conceito de temperatura. Esta está relacionada com a entropia pela relação termodinâmica

$$1/T = (\partial S / \partial U)_X \quad (2)$$

(onde X representa variáveis termodinâmicas extensivas, U a energia interna e S a entropia). A entropia, estatisticamente, é definida por

$$S = k_B \ln \Omega(U) \quad (3)$$

onde  $k_B$  é a constante de Boltzmann e  $\Omega(U)$

(\*) Actualmente no Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

(1) Não são possíveis transformações isentrópicas entre um estado de temperatura (absoluta) positiva e outro de temperatura negativa.



é a densidade de estados para a energia  $U$ . Como a eq. (3) não pressupõe que  $\Omega$  seja uma função monótona crescente de  $U$ , é perfeitamente possível que  $S$  diminua quando  $U$  aumenta e, pela eq. (2), que seja  $T < 0$ . Nesta situação, a distribuição de Maxwell-Boltzmann,

$$N_j/N_i = \exp [ - (\epsilon_j - \epsilon_i)/k_B T ] \quad (4)$$

( $N_j$  designa a população do nível  $j$  cuja energia é  $\epsilon_j$ , *idem* para  $N_i$  e  $\epsilon_i$ ), permanece válida (no equilíbrio estatístico). Esta eq. (4) permite-nos ver que, se for  $T < 0$ , os níveis mais energéticos estarão mais povoados que os níveis menos energéticos, situação designada por inversão de população, já que é o oposto do que se verifica quando  $T > 0$ . Portanto, temperaturas absolutas negativas e inversão de população estão intimamente associadas.

Os sistemas termodinâmicos vulgares (p. ex., um mole dum gás ou dum cristal) estão a temperaturas absolutas positivas e, em princípio, não há limite para a energia que as suas partículas podem possuir. Fornecendo energia ao sistema, transferimos partículas dos níveis mais baixos para os mais elevados, mas cada nível continua a ter, no equilíbrio, uma população maior do que qualquer nível superior: não se consegue inverter a população.

Mas imaginemos que existe um sistema termodinâmico, constituído por  $N$  partículas, tal que a energia dos seus níveis está limitada superiormente. Para simplificar, suponhamos que o número de níveis é finito, por exemplo quatro, e que as suas energias são  $\epsilon$ ,  $2\epsilon$ ,  $3\epsilon$  e  $4\epsilon$ . Para uma dada temperatura  $T$ , positiva, o gráfico representativo da população em função da energia é um conjunto de quatro segmentos verticais, cujas extremidades superiores assentam sobre uma exponencial, decrescente à medida que a energia dos níveis aumenta (Fig. 1). O gráfico correspondente à temperatura  $-T$  é apresentado na Fig. 2. A representação gráfica da variação da entropia com a energia interna de tal sistema numa transformação em que: (a) no estado inicial,

houvesse  $N$  partículas no nível energético mais baixo; (b) no estado final, estivessem as  $N$  partículas no nível mais elevado; e (c) um estado intermédio fosse caracterizado por uma

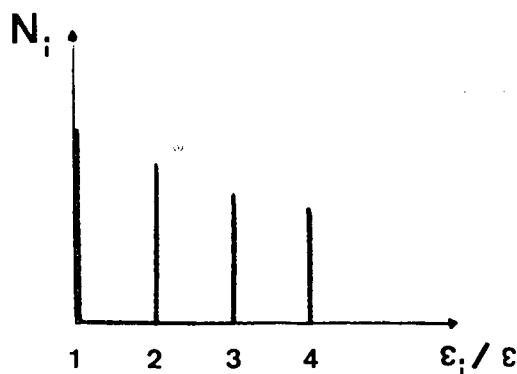


Fig. 1 ( $T > 0$ )

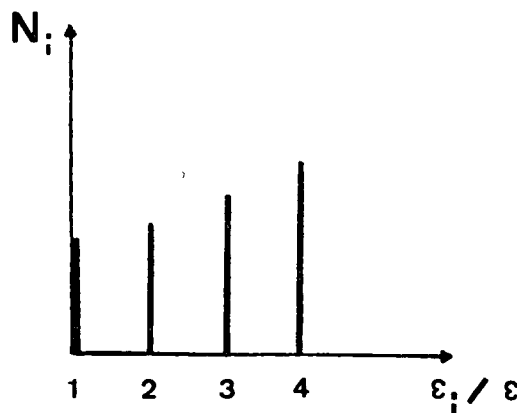


Fig. 2 ( $T < 0$ )

distribuição equitativa das  $N$  partículas pelos quatro níveis — essa representação teria uma forma semelhante à indicada na Fig. 3; aí os pontos A, B e C assinalam os estados (a), (b) e (c) respectivamente. A metade esquerda da curva tem declive positivo; portanto,  $(\partial S/\partial U)$  é positiva e, pela eq. (2),  $T$  também. A metade direita, onde o declive é sempre negativo, é a zona das temperaturas absolutas negativas.

Mais à frente analisaremos em pormenor a Fig. 3. Agora convém resumir o que se disse até aqui. Não há, do ponto de vista da Termodinâmica Estatística, qualquer obstáculo à existência de temperaturas absolutas negativas: tudo o que se exige é um sistema cuja energia

seja limitada superiormente, e um processo de inverter a população.

Surge, naturalmente, a dúvida: existirão esse sistema e esse processo? A resposta é afirmativa e, na secção 3, serão exemplificados um e outro.

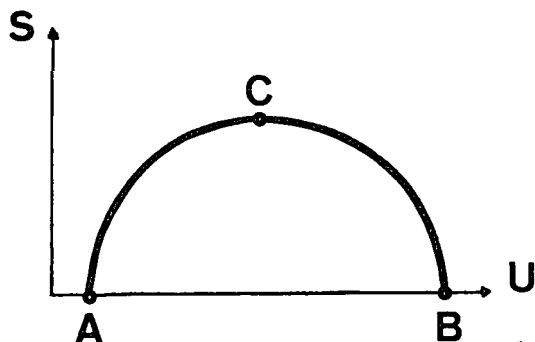


Fig. 3

Da Fig. 3 podem inferir-se vários factos «estranhos». Começemos por notar que a fronteira (ponto C) entre temperaturas absolutas positivas e negativas *não* é o zero absoluto, mas  $T = \pm \infty$ ! (Esta igualdade significa que  $T = +\infty$  é a mesma temperatura que  $T = -\infty$ !) Ao contrário do que poderia parecer à primeira vista, uma temperatura infinita não implica, necessariamente, uma quantidade infinita de energia, nem sequer uma quantidade muito grande. Como se pode observar na Fig. 3, quando o sistema está a uma temperatura absoluta negativa, o seu conteúdo energético é maior do que se a sua temperatura for positiva. Ora, ao pormos em contacto térmico dois sistemas a temperaturas diferentes, o calor flui do sistema mais quente, isto é, aquele cuja temperatura é mais elevada, para o sistema mais frio, cuja temperatura é mais baixa. Concluimos, pois, que uma temperatura absoluta negativa é mais «quente» que uma temperatura absoluta positiva! É mesmo mais «quente» que  $T = +\infty$ ! Ainda através da Fig. 3, torna-se fácil conceber que, além do «velho» zero absoluto ( $0^+$  K) — ou seja, um estado em que todas as partículas estão no nível mais baixo —, existe um «novo» zero absoluto ( $0^-$  K) — isto é, um estado em que o nível mais elevado contém todas as

partículas. Note-se que um sistema no primeiro estado não pode ceder mais energia (é o mais baixo estado energético possível), enquanto um sistema no segundo estado não pode receber mais energia.

Do que fica dito segue-se que a escala de temperaturas, desde a mais baixa à mais alta, é  $0^+$  K, ..., 300 K, ...,  $+\infty = -\infty$  K, ...,  $-300$  K, ...,  $0^-$  K. Esta situação, pouco satisfatória, resulta da escolha (arbitrária) da função para representar a temperatura; mas é facilmente superada se se usar a função  $-1/T$  (muitas vezes utilizada para expandir a escala de temperaturas na vizinhança do «velho» zero absoluto). Deste modo teríamos:

T	$0^+$	$+\theta$	$+\infty$	$-\infty$	$-\theta$	$0^-$
$-1/T$	$-\infty$	$-1/\theta$	$-0$	$+0$	$+1/\theta$	$+\infty$

As vantagens desta representação são claras: as novas «temperaturas» positivas são maiores que as negativas, passando-se dum para outras sem «saltos»; é mais «aceitável» que (o novo)  $-0$  seja o mesmo que (o novo)  $+0$ ; aos (antigos) zeros absolutos correspondem os extremos da nova escala, pelo que a distinção entre as duas temperaturas fica mais nítida e a sua inatingibilidade aparece traduzida dum modo mais imediato.

## 2. Temperaturas absolutas negativas e Princípios da Termodinâmica

O Primeiro Princípio, que traduz a conservação da energia, e o Princípio Zero não são afectados pela existência de temperaturas absolutas negativas.

O caso mais delicado e interessante é o do Segundo Princípio. Deve referir-se que não se pode conceber um ciclo de Carnot que opere entre uma temperatura positiva e outra negativa (ver nota da pág. 113), pelo que não é possível comparar as duas temperaturas por este processo.

Tanto a temperaturas positivas como a temperaturas negativas, o rendimento de uma

máquina de Carnot reversível é dado da forma habitual por

$$\eta = W/Q_1 = 1 + Q_2/Q_1 = 1 - T_2/T_1 \quad (5)$$

onde  $Q_1$  e  $Q_2$  são as quantidades de calor recebidas das fontes  $T_1$  e  $T_2$  (ter presente que  $Q_1$  e  $Q_2$  são grandezas algébricas).

Se admitirmos, por exemplo,  $0 > T_1 > T_2$ , será  $T_2/T_1 > 1$  e  $\eta < 0$ : para a máquina de Carnot retirar calor ( $Q_1 > 0$ ) da «fonte quente» ( $T_1$ ) é necessário fornecer-lhe trabalho,  $W = Q_1 + Q_2 = \eta Q_1 < 0$ .

Para ser  $W > 0$  terá de ser  $Q_1 < 0$ : a máquina produz trabalho quando retira calor da «fonte fria» ( $T_2$ ),  $Q_2 > 0$ , cedendo à «fonte quente» ( $T_1$ ) uma quantidade de calor menor,  $Q_2 - W$ .

Tendo uma máquina a trabalhar deste modo, se se fizer regressar à fonte fria uma quantidade de calor igual à que é entregue à fonte quente, obtem-se um dispositivo que opera num ciclo e cujo único efeito é extrair calor de uma fonte e realizar a mesma quantidade de trabalho. Este facto obriga a alterar o enunciado de Kelvin-Planck do Segundo Princípio, que passará a ser: É impossível construir uma máquina operando num ciclo cujo único efeito seja (i) extrair calor duma fonte a temperatura positiva e realizar igual quantidade de trabalho ou (ii) entregar uma quantidade de calor a uma fonte a temperatura negativa e receber uma quantidade igual de trabalho. Já o enunciado de Clausius se mantém (É impossível construir uma máquina operando num ciclo cujo único efeito seja transferir calor dum corpo frio para um corpo quente), bem assim como o enunciado em termos da entropia (A entropia de um sistema isolado nunca pode diminuir).

Uma vez que a passagem duma temperatura positiva para uma temperatura negativa não se faz pelo zero absoluto, o Terceiro Princípio não deve ficar prejudicado. No entanto, dada a existência de dois zeros absolutos, é conveniente a sua reformulação: É impossível, através de uma série finita de processos, baixar

a temperatura de um sistema a  $0^+$  K ou elevá-la a  $0^-$  K.

### 3. A experiência de Pound, Purcell e Ramsey

Um tipo de sistemas com energia limitada superiormente (e número finito de níveis) são sistemas quânticos, com momento magnético resultante  $\mathbf{M}$ , na presença de um campo magnético. O vector  $\mathbf{M}$  pode estar orientado em relação ao campo num número finito e discreto de direcções, a que correspondem outros tantos estados energéticos do sistema. Tais sistemas podem ser átomos, moléculas, iões ou núcleos. Consideremos estes últimos. À semelhança dos electrões, os nucleões também possuem momentos angulares orbital e intrínseco, que dão origem a fenómenos de magnetismo nuclear. O spin nuclear resultante é caracterizado por um número quântico,  $I$ . Quando um núcleo no seu estado fundamental,  $\epsilon_0$ , possui um número quântico de spin  $I$  e momento magnético  $\mathbf{M}$ , e é colocado num campo magnético  $\mathbf{H}$ , a sua energia de interacção com o campo pode tomar  $2I + 1$  valores, dados por  $-\mu_0 \mathbf{H} \mathbf{M}/I$ , onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vazio e  $m$  é o número quântico magnético nuclear, que toma valores entre  $-I$  e  $+I$  por saltos de uma unidade.

A inversão de população é viável (como já se disse), mas não para todo e qualquer sistema dos referidos acima — do mesmo modo que para se produzirem baixas temperaturas não se pode utilizar um material qualquer. As propriedades térmicas e magnéticas do subsistema (iónico ou nuclear) duma amostra permitem-nos levar muito abaixo de 1 K a temperatura (positiva) de toda a amostra (refrigeração por desmagnetização adiabática de uma substância paramagnética). Para se obterem temperaturas absolutas negativas, usam-se (por exemplo) as ditas propriedades dum subsistema magnético nuclear, mas apenas este — não todo o sistema — atinge temperaturas absolutas negativas.

Esta não é, porém, a única maneira de produzir tais temperaturas. Com efeito, desde o aparecimento do maser (em 1954) e, mais tarde, do laser, várias técnicas de inversão de população têm sido realizadas, recorrendo a subsistemas tais como modos de vibração- rotação de moléculas poliatômicas e spins electrónicos em presença de campos magnéticos. Em todas estas técnicas se verifica que:

— o conjunto de valores possíveis da energia do subsistema está limitado superiormente.

— a temperatura absoluta negativa *coexiste* com a temperatura, sempre positiva, da «rede» (designação genérica da parte do sistema que não pertence ao subsistema). Esta temperatura está associada à energia cinética média das partículas (átomos, moléculas, iões) do sistema, ao passo que as temperaturas negativas estão relacionadas com outros graus de liberdade. A referida coexistência não é mais extraordinária que uma lareira acesa numa sala fria!

— o subsistema obedece a determinados requisitos.

Estes requisitos, apresentados a seguir para o caso de um subsistema de spins nucleares, aplicam-se às outras técnicas (*mutatis mutandis*):

1) O subsistema magnético nuclear atinge o equilíbrio interno muito rapidamente — em cerca de  $10 \mu\text{s}$  (num tempo, dito de relaxação spin-spin,  $\tau_2$ ) —, isto é, os spins interactuam com suficiente intensidade e rapidez, de modo que se pode considerar que há equilíbrio estatístico e atribuir uma temperatura ao subsistema.

2) A rede tem uma capacidade calorífica elevada e encontra-se a uma temperatura que pode aproximar-se da ambiente.

3) O tempo (dito de relaxação spin-rede,  $\tau_1$ ) necessário para o subsistema atingir o equilíbrio com a rede é suficientemente longo (pelo menos alguns minutos) para se fazerem experiências sobre o subsistema, podendo-se considerá-lo isolado durante esse tempo.

A primeira vez que se produziram temperaturas absolutas negativas foi em 1951, quando Pound, Purcell e Ramsey descobriram

que, num cristal de LiF, os núcleos dos iões de Li constituíam um subsistema que satisfazia aos requisitos atrás citados.

Na sua experiência, o cristal é colocado num campo magnético forte ( $H_1 \sim 10^6$  A/m) e espera-se que seja atingido o equilíbrio térmico à temperatura ambiente (300 K). O estado fundamental,  $\epsilon_0$ , de cada núcleo divide-se em quatro níveis energéticos ( $I=3/2$ ) — ver tabela — e os spins alinham-se parcialmente com o campo. Dado que a diferença de energia entre dois níveis consecutivos é cerca de  $10^{-6} k_B T$ , a população dos níveis menos energéticos é apenas ligeiramente superior à dos mais energéticos (cf. eq. (3)).

TABELA

m	energia
-3/2	$\epsilon_0 + M \mu_0 H$
-1/2	$\epsilon_0 + 1/3 M \mu_0 H$
1/2	$\epsilon_0 - 1/3 M \mu_0 H$
3/2	$\epsilon_0 - M \mu_0 H$

Esta pequena diferença de população é detectada por ressonância magnética nuclear (RMN). Nesta técnica, os núcleos são submetidos a radiação electromagnética ressonante, i.e., radiação de frequência  $\nu_H$  tal que a energia dos fotões,  $h \nu_H$ , é igual ao espaçamento entre os níveis, que depende do campo exterior  $H$ . Alguns núcleos absorvem energia e transitam para o nível acima ( $\Delta m = -1$ ), ao passo que outros são estimulados a emitir energia, transitando para o nível abaixo ( $\Delta m = +1$ ). Uma vez que estes processos ocorrem com igual probabilidade, e dado que há mais núcleos nos níveis mais baixos do que nos superiores, o saldo é uma pequena absorção de energia. Esta absorção é observada num receptor (pertencente ao equipamento de RMN), cujo sinal de saída exhibe uma queda de amplitude, correspondente a uma temperatura positiva.

No passo seguinte da experiência, o cristal é retirado do campo  $H_1$  e introduzido num solenóide cujo eixo é paralelo a um campo

$H_2 \sim 10^4$  A/m, criado por um ímã permanente. Com esta redução reversível (lenta) e adiabática do campo, o número de spins paralelos ao campo não varia (a razão das populações mantém-se) e a temperatura do subsistema decai para alguns Kelvin. Descarregando um condensador (com uma constante de tempo da ordem de  $10^{-7}$  s) no solenóide, provoca-se uma inversão rápida (irreversível) do campo

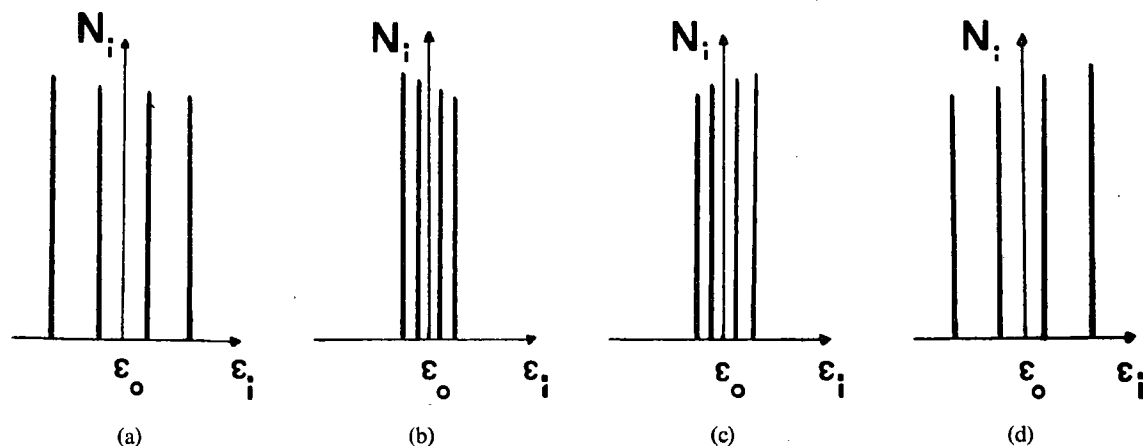


Fig. 4 - (a)  $H_1 \sim 10^6$  A/m , (b)  $H_2 \sim 10^4$  A/m , (c)  $-H_2$  , (d)  $-H_1$

para  $-H_2$ . Nesse intervalo de tempo ( $10^{-7}$  s), os spins não conseguem acompanhar o campo, de modo que a sua distribuição pelos diferentes níveis não se altera. A energia de interação, porém, inverte o sinal e, por consequência, a população dos níveis mais energéticos passa a exceder a dos menos energéticos. A esta situação corresponde uma temperatura absoluta negativa, de cerca de  $-10$  K.

Seguidamente, procede-se a um aumento adiabático e reversível do campo, colocando o cristal novamente no campo  $H_1$  mas invertido, e a temperatura *baixa* para cerca de  $-400$  K.

Finalmente, o subsistema *arrefece* por interação com a rede, descendo a temperatura de  $-400$  K para  $-\infty$  (que neste contexto é o mesmo que  $+\infty$ ) e daí para os 300 K iniciais.

Na Fig. 4 indicam-se os espaçamentos entre os níveis e as respectivas populações nas diferentes fases da experiência.

Durante o período de dois minutos em que o subsistema nuclear está a temperaturas

absolutas negativas, o receptor do equipamento de RMN mostra um aumento do sinal de saída à frequência  $\nu_H$ , indicando uma emissão «líquida» de energia.

O autor está extremamente grato aos Profs. Dr. J. Ferreira da Silva, Eduardo S. Lage e J. Moreira Araújo pelas críticas valiosíssimas ao manuscrito.

#### BIBLIOGRAFIA

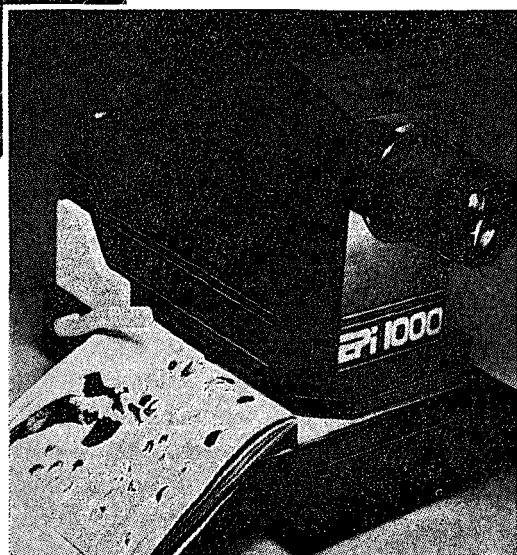
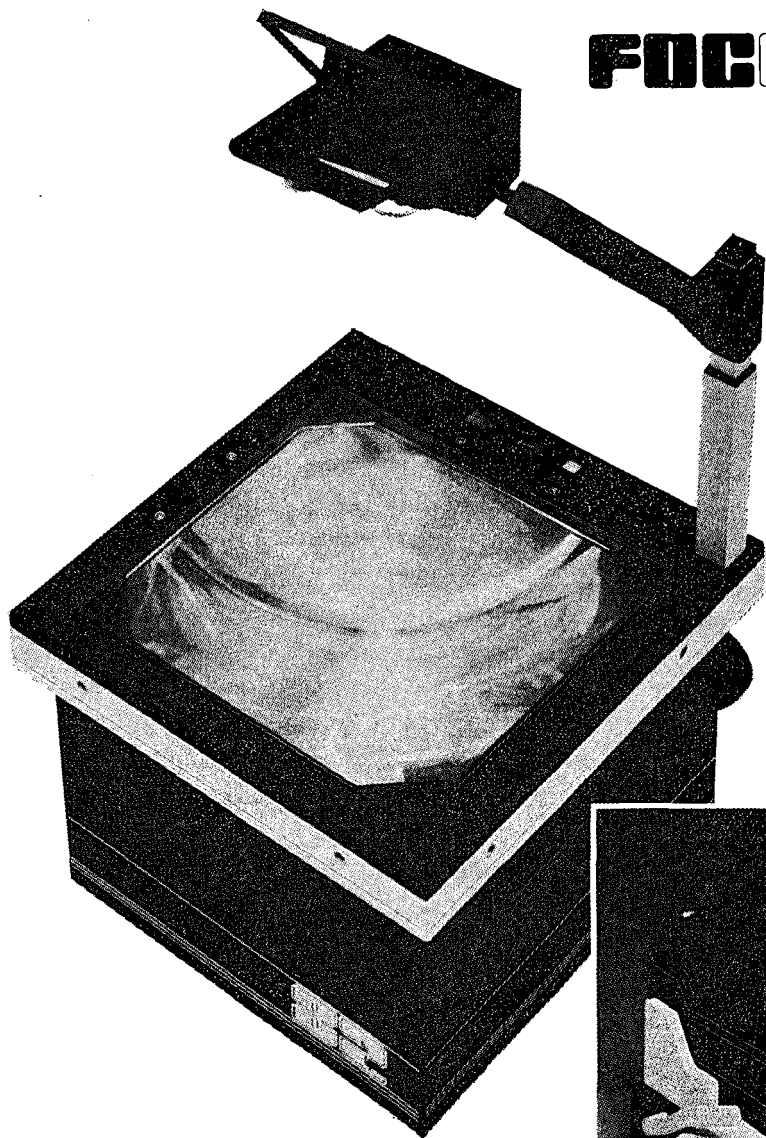
Alguns dos textos mais interessantes sobre o tema são:

- CHAMBDAL, P., «Paradoxes of Physics», Transworld Publishers Ltd, Londres, 1973.  
 «Encyclopaedic Dictionary of Physics», Pergamon Press, 1961 artigos «Negative absolute temperatures» e «Nuclear magnetic resonance».  
 DUGDALE, J. S., «Entropy and Low Temperature Physics» William Claves & Sons, Londres, 1966.  
 PIPPARD, A. B., «Elements of Classical Thermodynamics» Cambridge University Press, 1966 (pág. 48 e seguintes).  
 POWLES, J. G., «Negative Absolute Temperatures and Rotating Temperatures», Contemporary Physics 4, 338 (1963).  
 RAMSEY, N. F., «Thermodynamics and Statistical Mechanics at Negative Absolute Temperatures», Phys. Rev. 103, 20 (1956).  
 ZEMANSKY, M. W., DITTMAN, R. H., «Heat and Thermodynamics», 6<sup>th</sup> ed. McGraw Hill International Book Company, 1981.

Os artigos em que Pound, Purcell e Ramsey originariamente descreveram as suas experiências foram publicados em Phys. Rev. 81 (1951), 156, 278, 279.

# AUDIOVISUAIS

## FOCLUMEN

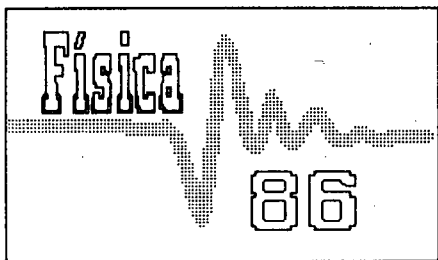


MOBILIÁRIO E EQUIPAMENTO PARA ESCOLAS, SARL

Est. da Circunvalação / Portela da Ajuda  
1495 Lisboa  
Telef. 218 70 62  
Telex 18682 Focesc P Portugal

## EPI 1000





## SUMÁRIO DA CONFERÊNCIA (\*)

Com a realização da Física 86 em Braga cumpriu-se de novo a regularidade bienal das Conferências Nacionais de Física, promovidas pela Sociedade Portuguesa de Física. A participação nesta conferência permitiu ter um contacto directo com o trabalho de investigação de muitos grupos, permitiu confrontar ideias, estabelecer colaborações e sentir as linhas de força e os pontos de crescimento da física no nosso país.

É interessante ponderar sobre alguns dados estatísticos relativos à Física 86. Estiveram presentes como participantes 420 pessoas. Destas 69 eram estudantes e igual número professores do ensino secundário. Houve pois uma participação de 17 % de estudantes e 17 % de professores do ensino secundário. Os restantes 66 % são físicos que realizam a sua actividade profissional em Laboratórios e Institutos Nacionais, Universidades, Empresas, Hospitais, etc. A elevada participação de estudantes do ensino superior a nível de Licenciatura e de Mestrado pode interpretar-se como um forte indicador de sinal positivo para o futuro da física.

Na organização da Física 86 optou-se por aumentar o número de exposições convidadas e nestas incluir um número apreciável de estrangeiros. É um formato novo e penso que resultou plenamente. Tivemos 9 colegas estrangeiros e 11 portugueses a realizar exposições convidadas. Foram sessões extremamente interessantes que conseguiram despertar o interesse de uma audiência por vezes bastante heterogénica.

O número total de comunicações apresentadas à Física 86 foi de 235, ligeiramente

superior ao verificado em Évora na 4.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física (ver Gazeta de Física 7 (1984) 67). Todas as comunicações foram apresentadas sob a forma de cartazes (posters) o que penso ser solução correcta para uma comunidade de físicos relativamente pequena em número e por isso muito diversificada, dada a grande expansão e especialização da física nos nossos dias. Teria sido desejável ter os cartazes expostos mais tempo, para permitir uma consulta mais demorada e atenta. Isso não foi possível devido às condições bastante limitadas do espaço disponível.

A distribuição das comunicações pelos vários domínios é bastante semelhante à da Física 84. Contudo notam-se agora nitidamente três polos de crescimento: física aplicada (incluindo instrumentação, óptica, electrónica, instrumentação nuclear e computadores) física da matéria condensada e ciências geofísicas. A procura sistemática de uma estreita ligação entre a teoria e a experiência é um aspecto importante dos trabalhos de investigação apresentados em Braga. Observa-se também uma utilização intensa de meios computacionais, por vezes de modo muito exigente tanto em memória como em tempo de cálculo. É outro indício de estarmos no limiar de uma nova fase, bem mais evoluída, em que a nossa competitividade com os países estrangeiros começa a afirmar-se. Há um domínio da física aplicada em que creio haver ainda um longo caminho a percorrer. Trata-se da investigação e desenvolvimento na área das aplicações da física à medicina. Hoje em dia, nos países mais evoluídos, este é um campo de crescimento acelerado. Entre nós a classe médica não se apercebeu ainda de que existem físicos em Portugal capazes de melhorar e otimizar sistematicamente a instrumentação, cada vez mais sofisticada, que se utiliza em medicina.

Importa notar que a física é actualmente um vastíssimo e diversificado campo de investigação. Numa conferência deste tipo há fac-

---

(\*) Alocução do Secretário-Geral da SPF na sessão de encerramento da 5.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física.

tores que podem determinar uma menor participação em certos domínios, pelo que a conferência não reflecte necessariamente a situação real do desenvolvimento desse domínio, no país: É por esta razão que é interessante pensar na possibilidade de, em futuras conferências nacionais, eleger um tema prioritário para as comunicações tal como Física Aplicada na Indústria, Física Aplicada na Medicina, Física da Matéria Condensada, Ciências Geofísicas, Física das Altas Energias, Ensino da Física, etc. Nesta perspectiva talvez fosse viável ter conferências anuais, desde que sectoriais, ou seja, dirigidas prioritariamente para um número restrito de domínios que alternariam no tempo.

As Conferências Nacionais de Física têm sido um espaço privilegiado para desabafar acerca das condições vergonhosas em que se encontra o ensino de física a nível do ensino secundário no nosso país. A Física 86 não foi excepção. Porém pouco ou nada se tem conseguido fazer. O Ministério da Educação parece não ter consciência de que a Sociedade Portuguesa de Física continua a existir entre duas sucessivas conferências nacionais. A S.P.F. tem entre os seus sócios pessoas que dedicaram e dedicam inteiramente a sua vida profissional ao ensino e à investigação em física. Quem as representa, melhor ou pior, na sua qualidade de profissionais de física é a S.P.F. É por esta razão que em países mais avançados do que o nosso as sociedades de física são frequentes vezes chamadas a emitir pareceres e a intervir sobre assuntos relativos ao ensino e à investigação em física. Contudo esta prática não é ainda aceite entre nós, talvez em parte por deficiência da própria S.P.F. em se afirmar e projectar junto da opinião pública. A situação, porém, está a modificar-se. Entre várias iniciativas recentes da S.P.F. uma de grande impacto é a realização das Olimpíadas da Física que a nível nacional se efectuaram pela primeira vez em Braga durante a Física 86.

As disciplinas de física no ensino secundário podem e devem despertar o interesse dos estudantes, porque, entre outras razões,

desafiam a capacidade de inteligência e criatividade e são importantes para a formação de profissionais em vários domínios — engenharia, medicina, ciência, etc. A física não é uma disciplina enfadonha, sem ligação com a realidade do quotidiano, não é um obstáculo arbitrário colocado no caminho dos estudantes. Se as coisas se passam de outro modo em Portugal é porque algo está errado e é necessário corrigir a situação. Sinto que os sócios da S.P.F. começam a convencer-se de que a S.P.F. pode contribuir para a solução do problema.

É nesta perspectiva que a S.P.F. irá muito brevemente apresentar ao Ministério da Educação um conjunto mínimo de medidas relativas ao ensino da física a nível secundário que, pensamos, deveriam ser postas em prática tão rapidamente quanto possível. Presentemente a física não é disciplina obrigatória para nenhum curso superior universitário incluindo as próprias Licenciaturas em Física. É uma situação verdadeiramente surpreendente que prejudica muito a formação dos alunos. Tanto quanto consegui apurar é uma situação única na Europa!

Outro aspecto gravemente anómalo é o facto de as actividades experimentais não terem carácter de obrigatoriedade nas disciplinas de física dos 10.º, 11.º e 12.º anos. É possível introduzir estas actividades sem grandes encargos, através da reciclagem e actualização de professores. A S.P.F. pode colaborar na resolução deste problema. A física é uma ciência de observação e experiência e se for ensinada de modo apenas livresco, para além de outras desvantagens, torna-se ridícula aos olhos dos alunos dos nossos dias, permanentemente confrontados com um acelerado desenvolvimento tecnológico.

Finalmente há uma necessidade urgente de coordenar os programas dos ensinos da Física, da Matemática e da Química no secundário. Também aqui a S.P.F., em colaboração com a Sociedade Portuguesa de Matemática e a Sociedade Portuguesa de Química, pode contribuir de modo decisivo para a resolução do problema.

É importante lembrar a todos os que participaram na Física 86 por meio da apresentação de exposições convidadas ou contribuições que ambas podem ser submetidas para publicação na Gazeta de Física ou na *Portugaliae Physica*, conforme mais apropriado. O actual Conselho Directivo da S.P.F., que termina o seu mandato em Fevereiro do próximo ano, considerou como parte importante do seu programa a publicação regular da Gazeta de Física. Tal tem sido possível mas obviamente que depende, de modo crucial, da apresentação regular de artigos para publicação. Os trabalhos apresentados à Física 86 podem converter-se com relativa facilidade em artigos para a Gazeta de Física ou para a *Portugaliae Physica*. Aqui deixo pois um apelo nesse sentido.

Por regra de alternância, a organização da próxima Conferência Nacional de Física ficará a cargo da Delegação Regional de Coimbra da S.P.F. Continuando o projecto de descentralização e regionalização que a S.P.F. tem procurado imprimir às suas actividades é provável que a 6.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física se realize em Aveiro.

A S.P.F. deseja manifestar o seu agradecimento a todas as entidades que patrocinaram com o seu apoio a realização da Física 86. A conferência foi organizada e decorreu de modo exemplar. Isso deve-se ao empenhamento e ao esforço da Comissão Organizadora. Não é fácil erguer e levar a bom termo uma conferência destas entre nós. Surgem os mais variados imprevistos, demoras, burocracias, etc. Foi uma conferência que nos deixa, a todos os participantes, uma boa memória. Ela resulta em grande parte do incansável empenhamento do Manuel de Barros na sua organização. Em nome da S.P.F. quero agradecer à Comissão Organizadora da Física 86 todo o seu trabalho e entusiasmo na organização da conferência. Valeu o esforço: foram 4 dias de agradável convívio científico nesta bela cidade de Braga.

*Filipe Duarte Santos*

## OLIMPIADAS DE FÍSICA

Em Braga, no passado dia 2 de Outubro de 1986, tiveram lugar as Olimpíadas Nacionais de Física.

Participaram nas provas os alunos do ensino secundário que tinham sido vencedores das Olimpíadas Regionais, realizadas pelas Delegações de Lisboa, Coimbra e Porto, em Junho de 1985.

Foram vencedores nas diferentes provas as seguintes equipas:

### Prova teórico-experimental

9.<sup>o</sup> ano—Artur Ricardo Coelho de Amaral  
António José da Silva Coutinho  
Frederico Carlos Reis Morais

Colégio Militar—Lisboa

11.<sup>o</sup> ano—Carlos Manuel Mira da Fonseca  
Andrea Hall  
Patrícia Pinto

Escola Secundária N.º 1—Aveiro

### Apresentação de trabalho original sobre tema de Física

9.<sup>o</sup> ano—O Júri deliberou atribuir o prémio ex-aequo:

Paulo Duarte Serra Oliveira  
Ricardo Delgado Cabral  
Pedro Miguel Costa Raposo

Escola Secundária Antero de Quental—Ponta Delgada

Remígio de Matos Machado  
João André Tomé Aleixo  
Anabela Canas Dias

Escola Secundária de Mação

11.<sup>o</sup> ano—Carlos Manuel Mira da Fonseca  
Pedro Miguel Pinho dos Santos  
António José de S. Alves

Escola Secundária N.º 1—Aveiro

Na sessão de encerramento da 5.<sup>a</sup> Conferência Nacional de Física foram distribuídos os prémios às equipas vencedoras e ainda um prémio de participação aos restantes alunos.

A realização das provas teórico-experimentais foi possível graças à cedência do material necessário por parte da Tecnodidáctica.

A Sociedade Portuguesa de Física contou com o apoio da Fundação Calouste Gulbenkian para angariação dos prémios, deslocação e estadia dos participantes e dos respectivos professores acompanhantes.

Seguem-se os textos das provas teórico-experimentais realizadas em Braga.

## Prova do 9.º ano

Parte I (90 minutos)

### Material e esquema de montagem

—carro; placa de madeira com duas faces diferentes; roldana; grampos de mesa; fio de algodão; martelo; régua graduada.

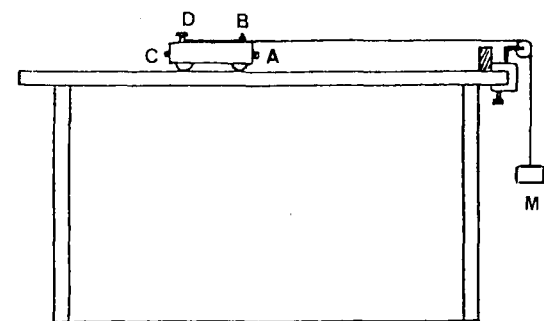


Fig. 1

O carro é constituído por várias partes como se ilustra na Fig. 2.

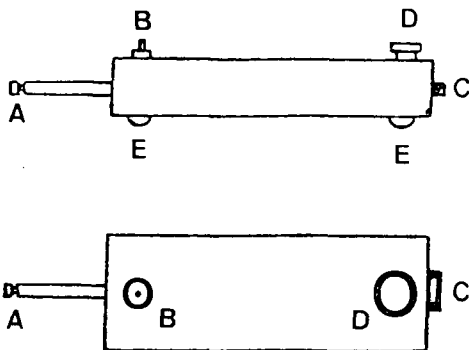


Fig. 2—A—Vara propulsora accionada por uma mola elástica; B—Botão de imobilização da vara propulsora; C—Patilha; D—Pino para fixar o fio; E—Rodas com rolamentos de esferas; M—Massa marcada.

## Experiências e perguntas

Em cima da tua mesa encontras o material necessário para fazeres a montagem esquematizada na Fig. 1. Como já deste conta, há uma placa de platex com duas faces diferentes sobre as quais irá mover-se o carrinho. Com ela vais executar dois conjuntos de experiências. Antes porém, começa por experimentar o funcionamento do carrinho dando uma pancada seca, com o martelo de que dispões, no botão B (ver Fig. 2).

### 1.º conjunto de experiências

Monta o esquema da Fig. 1, utilizando a face polida da placa (onde poderás desprezar o atrito). Em M colocarás a massa marcada que te é fornecida.

Coloca então o carrinho encostado ao anteparo, com a vara propulsora recolhida, e acciona-o batendo com o martelo em B.

a) Utilizando uma notação vectorial adequada, representa as forças que actuam sobre a massa M suspensa do fio durante a subida.

b) Esquematiza num diagrama as forças aplicadas no carrinho durante o movimento, após a actuação da vara propulsora.

c) Qual a utilidade da roldana na montagem que efectuaste?

d) Que transformações de energia ocorrem durante a experiência?

e) Explica porque parou o carrinho a certa altura.

f) Calcula o valor da energia cinética inicial do sistema, supondo desprezáveis todas as forças resistentes. Enuncia o Princípio, Lei ou Teorema em que te baseaste para efectuares os cálculos.

### 2.º conjunto de experiências

Repete a experiência, utilizando a mesma massa e a face rugosa da placa.

a) Que diferença notaste relativamente à experiência anterior?

b) Esquematiza as forças aplicadas ao sistema carrinho-placa durante o movimento, referenciado o sentido deste.

c) Calcula o trabalho realizado pelas forças de atrito, considerando que a velocidade inicial imprimida ao carrinho é a mesma nos dois conjuntos de experiências.

d) Supondo constante a força de atrito entre o carro e a placa durante o movimento, calcula o valor dessa força.

## Parte II (90 minutos)

### Material

—mola suspensa; régua graduada com cursor; ovo de plástico; massas marcadas; copo graduado; água; álcool.

### Experiências e perguntas

1—Suspende da mola, sucessivamente, as massas marcadas que te são fornecidas, e determina a sua constante de elasticidade. Improvisaste assim um dinamómetro.

2—Suspende agora o ovo que te é fornecido e determina o seu peso.

3—Deita no copo água até à marca de 500 ml e introduz nela o ovo suspenso na mola, de modo que fique totalmente mergulhado, sem tocar no fundo.

Determina o peso aparente (isto é, o «peso» do ovo mergulhado no líquido).

4—Repete a experiência 3, usando em vez de água o *mesmo volume* de álcool.

Determina o novo peso aparente.

a) Como verificaste há uma diferença entre o peso real e o peso aparente, que se deve à acção dos líquidos.

Esquematiza num diagrama a acção do líquido sobre o ovo e justifica.

b) O peso aparente do ovo nos dois líquidos é diferente, sinal de que as suas acções sobre o corpo são diferentes.

De que propriedade dos líquidos te parece depender essa acção?

c) Provavelmente já notaste que é mais fácil boiar na água do mar do que numa piscina

de água doce. Relacionas esta observação com a experiência que acabaste de realizar? Explica porquê.

d) Um pequeno barco a remos pode transportar uma carga máxima de 50 caixas de sardinhas num percurso marítimo. Poderá o mesmo barco transportar essa carga máxima num percurso fluvial? (Considera desprezável a ondulação, as correntes e os ventos). Justifica.

### Outras perguntas

Atenta bem nas situações que se descrevem a seguir e nas quais provavelmente já terás reparado:

—Uma mesa de quatro pernas produz sulcos mais profundos numa alcatifa do que uma mesa da mesma massa mas de base circular.

—Um prego espeta-se tanto mais facilmente quanto mais aguçada for a sua ponta.

—Uma pessoa enterra-se mais na areia se utilizar sapatos de salto fino de que se usar sandálias de salto raso.

—Na neve caminha-se melhor com raquetes adaptadas aos sapatos do que só com os sapatos.

Em cada um destes casos os efeitos produzidos pela mesma força são diferentes.

a) És capaz de dizer de que outra grandeza, além da força, depende este efeito?

b) «Os camiões destinados ao transporte de grandes cargas têm as rodas duplas, que além disso são mais largas do que as dos carros ligeiros, e isto não é para aguentarem melhor o peso que levam em cima, mas sim, para que o chão aguente».

Explica porque se procede deste modo.

### Prova do 11.º ano (3 horas)

A. Verifiquem se têm ao vosso dispor o seguinte material:

- Motor eléctrico com uma roldana acoplada (1);
- Fonte de alimentação de 2V-12V (1);
- Amperímetro;

- Voltímetro (1);
- Marcador electromagnético com a respectiva fita (1);
- Transformador de 5V (1);
- Extensão (1);
- Fios de ligação (6);
- Interruptor de campainha (1);
- Massas marcadas;
- Fio;
- Suporte universal com a respectiva pinça (1);
- Chave de fenda (1);
- Tesoura (1);
- Régua graduada (1);
- Fita métrica (1);
- Papel milimétrico;
- Papel de rascunho, lápis e borracha.

#### Informação útil

- A fonte de alimentação deve funcionar a uma d.d.p. de 8V;
- O marcador electromagnético imprime sinais gráficos, a intervalos de tempo iguais, na fita de papel que se encontra ligada às massas que são elevadas;
- Para facilitar os cálculos sugere-se que considerem o valor da aceleração da gravidade local igual a  $10 \text{ m/s}^2$ .

**B.1.** De acordo com a montagem, elevem as várias massas marcadas. Utilizem o marcador electromagnético para registar na fita os sinais gráficos que lhe vão permitir estudar posteriormente os tipos de movimento das massas marcadas.

2. Intercalem um amperímetro e um voltímetro no circuito e recolham os dados necessários à determinação posterior da resistência interna do motor e da sua força contra electromotriz.

**C.1.** Identifiquem e caracterizem as transformações de energia ocorridas durante a experiência.

2. Para cada caso, calculem a variação da energia mecânica do sistema massas marcadas-Terra, no instante inicial e final do movimento.

3.1. Para cada um dos ensaios efectuados, analisem e caracterizem o tipo de movimento a que ficaram sujeitas as massas marcadas. Utilize, para tal, as fitas de papel de registo.

3.2. Comentem e critiquem os resultados obtidos.

3.3. Determinem a energia cinética média das massas para cada elevação.

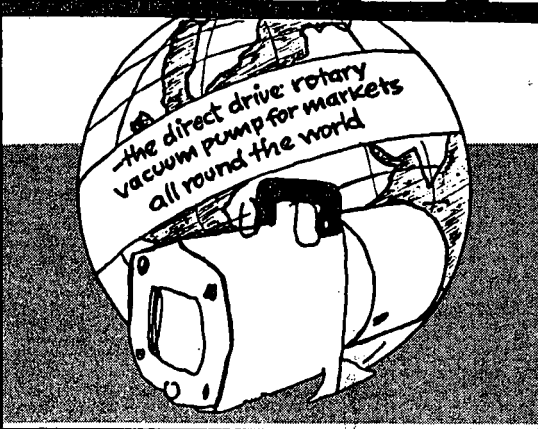
4.1. Determine:

- Resistência interna do motor;
- Força contra electromotriz do motor.


4.2. Descreva o procedimento experimental que lhes permitiu obter os dados para a determinação da resistência interna do motor e da sua força contra electromotriz.

5. Considere o sistema motor-massas marcadas. Analise o sistema quanto à conservação de energia.

# Edwards



VENDIDO POR:  
**MENDES DE ALMEIDA, LDA.**



Av. 24 de Julho, 52 - A G  
Telex 13559 ALMEDA P  
Telef. 663371 1200 LISBOA



# Noticiário SPF

## ELEIÇÕES PARA O TRIÉNIO 1987-90

De acordo com os Estatutos da SPF (cf. Gaz. Fís. 9, 73, Julho 1986), as mesas das assembleias gerais regionais recebem, durante o mês de **Dezembro de 1986**, candidaturas para os cargos directivos (mesa da assembleia geral e direcção) das respectivas delegações. As candidaturas podem ser apresentadas quer pela direcção cessante quer por grupos de dez sócios efectivos no pleno uso dos seus direitos; a mesa da assembleia geral regional deverá apresentar uma candidatura caso nenhuma tenha sido recebida no prazo estatutário (art.º 43.º). As eleições deverão ter lugar em reuniões das assembleias gerais regionais, durante o mês de Janeiro de 1987 (art.º 36.º).

Por outro lado, a mesa da assembleia geral da SPF recebe, durante o mês de **Janeiro de 1987**, candidaturas para: mesa da assembleia geral; secretário-geral, secretários-adjuntos, tesoureiro; conselho fiscal. As candidaturas podem ser apresentadas quer pelo conselho directivo cessante quer por um grupo de vinte sócios efectivos no pleno uso dos seus direitos; também neste caso deve a mesa da assembleia geral (da Sociedade) apresentar uma candidatura caso nenhuma tenha sido recebida no prazo estatutário (art.º 44.º). As eleições deverão ter lugar em reunião da assembleia geral da Sociedade, durante o mês de Fevereiro de 1987 (art.º 37.º).

## ALTERAÇÃO DA QUOTA ANUAL

Por ocasião da Física - 86 realizou-se, em Braga, uma sessão extraordinária da Assembleia Geral da SPF, com o objecto de discutir e votar uma proposta de actualização da quota anual.

A Assembleia aprovou, por unanimidade, que a quota anual dos **sócios efectivos** passe a ser de **1.200 Escudos**; aprovou ainda, por

maioria (2 abstenções), que a quota dos **sócios estudantes** passe a ser de **600 Escudos**.

Foi referido que os novos valores das quotas deveriam permitir ao próximo Conselho Directivo da SPF manter, durante o ano de 1987, as actividades da SPF ao nível actual (publicação regular da Gazeta, realização das Olimpíadas de Física, organização de cursos de actualização e seminários, participação em organismos internacionais, etc.) — desde que continue a verificar-se o apoio das instituições que tem subsidiado actividades da SPF (INIC, Fundação Calouste Gulbenkian, JNICT, UNESCO, Ministério dos Negócios Estrangeiros, etc.).

Os novos preços da Gazeta de Física — que é enviada gratuitamente a todos os sócios da SPF no pleno uso dos seus direitos — entrarão em vigor em Janeiro de 1987.

## COLÓQUIOS DA DELEGAÇÃO REGIONAL DE LISBOA

### • «Acidente de Tchernobil»

Integrado na série de colóquios programados pela Delegação Regional de Lisboa sobre temas de actualidade, realizou-se em 15 de Julho de 1986, na sede da S.P.F., num colóquio subordinado ao tema «*O acidente de TCHERNOBIL*». O Prof. E. Recknagel, da Universidade de Constança, orientador do colóquio, apresentou resultados obtidos na República Federal da Alemanha relativos aos isótopos detectados, ao aumento do nível de radiação e à incorporação da radioactividade na cadeia alimentar.

No final da exposição teve lugar uma troca de opiniões sobre possíveis causas do acidente e suas consequências para o desenvolvimento da Energia Nuclear.

### • Os próximos colóquios

• *A Física e os contratos de investigação do Ministério da Indústria.*

2 de Dezembro, 21 horas, Sede da SPF.

- *A Qualidade—um desafio aos investigadores portugueses.*

15 de Dezembro, 21 horas, Sede da SPF.

- *A entrada para o CERN e a Física Portuguesa.*

12 de Janeiro 1987, 18 horas, Complexo II do INIC (Av. Gama Pinto).

## II ESCOLA IBÉRICA DE FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA

### • «Fenómenos Cooperativos»

A Escola decorrerá na Figueira da Foz, de 14 a 26 de Setembro de 1987, fazendo parte de um conjunto de realizações conjuntas da Divisão de Física da Matéria Condensada da SPF e do Grupo Especializado de Física del Estado Sólido de la Real Sociedad Española de Física (I Simpósio, Lisboa 1983; I Escola, Segóvia 1984; II Simpósio, Sevilha 1986). A «comissão conjunta», responsável pela Escola, inclui F. Agulló Lopez (Universidade Autónoma, Madrid), R. Alcalá Grande (Zaragoza), A. Conde Amiano (Sevilha), A. Farinha Martins (Universidade Nova de Lisboa), M. Fernandes Thomaz (Aveiro), E. Seabra Lage (Porto) e A. Vallera (Lisboa). Estão previstos oito cursos, de 4 ou 5 horas, versando aspectos mais gerais na primeira semana (Caracterização experimental e teorias simples; Teoria de Landau; Grupo de Renormalização; Métodos de Simulação) e problemas mais específicos na segunda semana (Sistemas desordenados e localização de Anderson; Dinâmica crítica; Sistemas longe do equilíbrio; Sistemas de baixa dimensionalidade). A Escola deverá ainda incluir seminários sobre temas actuais e complementares dos tratados nas lições, cursos tutoriais (técnicas experimentais; utilização de computadores em simulação) e reuniões informais. A exemplo do que ocorreu em Segóvia espera-se uma participação significativa de países latino-americanos e africanos de expressão portuguesa, desde que garantidos os esperados apoios internacionais e de instituições portuguesas.

## APLICAÇÕES DA FÍSICA NUCLEAR EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

Viana do Castelo, 6-18 Setembro 1987.

Esta Escola (NATO ASI) tem como directores os Profs. E. Recknagel (Konstanz) e J. Carvalho Soares (Lisboa). O número de participantes será de 80 a 100, dos quais uma dezena serão portugueses.

Além dos cursos ministrados por especialistas de diversos países, haverá oportunidade para apresentação de comunicações.

*Contacto:* Prof. J. Carvalho Soares, Centro de Física Nuclear da Universidade de Lisboa, Av. Prof. Gama Pinto 2, 1699 Lisboa Codex.

### 8.º colóquio especializado Ampère

#### LIQUID CRYSTALS AND LIQUID CRYSTALLINE POLYMERS

(as studied by magnetic resonance and related techniques)

Lisboa, 14-18 Setembro 1987.

O colóquio terá lugar nas instalações da Fundação Gulbenkian, com o apoio de organismos portugueses e internacionais. A lista dos tópicos considerados inclui:

Mesomorphic order and structure; Phase transitions and instabilities; Polymer flexibility and conformation in mesophases; Molecular dynamics and fluctuations; Transport properties; Rheology and external field effects; Non-linear and chaotic phenomena; Mesomorphous polymer solutions; Mixtures and inhomogeneous systems; Lyotropics, surfactants, microemulsions, micellar systems; Membranes and biological liquid crystals; Mesogenic organometallics and organic conductors; Mesogenic plastics, fibres and elastomers.

*Contacto:* Prof. A. Farinha Martins, Centro de Física da Matéria Condensada, Av. Prof. Gama Pinto 2, 1699 Lisboa Codex.

# KEITHLEY

Multímetros e Termómetros Digitais—Instrumentos Científicos—Sistemas de Componentes — Sistemas de Teste Paramétricos — Medida de Radiações, etc.

# LEADER

Aparelhos Electrónicos de Medida—Osciloscópios—Geradores Audio—Geradores de Funções—Milivoltímetros—Multímetros Electrónicos—Frequencímetros Digitais—Comprovador de Transistores—Fontes de Alimentação —Pontes LCR Analógicas e Digitais, etc.

REPRESENTANTES E IMPORTADORES:

**EMÍLIO DE AZEVEDO CAMPOS & CA., LDA.**

Rua de Bolama, 109 — Telefones 497357 e 489893 — 4200 PORTO

Rua Ferreira da Silva, 9 — Telefone 573046 — 1900 LISBOA

## LIVRARIA ESCOLAR EDITORA

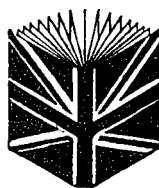


A Livraria Técnico-Científica do País  
Serviço rápido de assinaturas  
de revistas científicas

LIVRARIA — Rua da Escola Politécnica, 80-A  
Telefs. 664040 - 672561  
Telex 18570 ESCOLI P - PORTUGAL  
1200 LISBOA

Filial no Porto — Rua da Boa Hora, 43 4000 PORTO  
Telex 27247 ESCOP - P

## LIVRARIA BRITÂNICA



THE ENGLISH BOOKSHOP  
Para todos os seus livros  
de inglês

Rua S. Marçal, 168-A Telef. 328472 1200 LISBOA

Filial no Porto:  
Rua da Boa-Hora, 43 Telef. 382786 4000 PORTO

### GAZETA DE FÍSICA Publicidade

Tiragem actual — 2200

Periodicidade — trimestral

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

**Preços:\***

Fracção de página	1/8	1/4	1/2	1/1
Preto e branco	4	6	10	20
Com cor adicional	5	7	12	24

\* em contos

**Contactos telefónicos:** Lisboa 773325-774297 (Prof. J. Carvalho Soares)  
Coimbra 23675-29252 (Prof. M. Margarida Costa)  
Porto 310290-21653 (Prof. J. Bessa Sousa)

# ÍNDICE DOS VOLUMES 8 e 9

## Vol. 8—Fasc. 1 (Janeiro 1985)

O Cometa de Halley ao longo da história (M. F. Thomaz)	1
Cálculo matricial em óptica (Paulo A. R. Oliveira Lopes)	13
Microcomputadores, Minicomputadores e Física Experimental (Dinis Magalhães Santos)	17
Utilização de Microcomputadores da gama mais baixa em Instrumentação (Gaspar P. Ferreira)	21
P. A. M. Dirac, 1902-1984	25
As licenciaturas em Física e algumas licenciaturas afins	32
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física	38

## Vol. 8—Fasc. 2 (Abril 1985)

A descoberta do W e do Z (J. Mariano Gago)	43
Difracção na Matéria Condensada (M. Margarida R. R. Costa)	49
Forças nos eixos de rotação (João Bessa Sousa)	54
Sobre Novos Programas para o Curso Unificado (Fernando Fernandes, <i>et al.</i> )	57
Ensino assistido por computador (A. M. Gonçalves)	65
As licenciaturas em Física e algumas licenciaturas afins - II	68
A Física fora do laboratório (C. Marciano)	70
Divirta-se com a Física	72
Crítica de livros	76
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física	78

## Vol. 8—Fasc. 3 (Julho 1985)

Problemas pedagógicos do ensino da Dinâmica (M. Constança Batoréu Providência)	83
Sobre a ordem de grandeza das pressões e temperaturas no interior das estrelas (J. Lin Yun e F. Duarte Santos)	88
Comemorações em Física (E. J. S. Lage)	93
Sistemas solares passivos (Eduardo Maldonado)	99
Adesão de Portugal ao CERN	109
Olimpíadas de Física	111
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física	118

## Vol. 8—Fasc. 4 (Outubro 1985)

O ano do centenário de Niels Bohr	123
Armando Gibert (1914-1985)	124
Icarus 85 / Laser - Portugal; 25 anos depois!	125
Da Grande Unificação à Superforça final (Jorge Dias de Deus)	126
Conferência Girep - 86	135
Gerador de funções (Valtrudes S. Oliveira e J. Sousa Lopes)	136
Difracção na Matéria Condensada - II (M. Margarida R. R. Costa)	140
Paradoxo da vara e do celeiro e invariância relativista (A. A. Gonçalves da Silva e P. M. Araújo Sá)	147
Ponto de Física do 12.º ano - Soluções «oficiais» e soluções correctas (C. Ramalho Carlos, Eduardo Martinho e Jorge Valadares)	149
Bolsas da Divisão de Física Nuclear e Partículas	152
Olimpíadas de Física	153
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física	158

## Vol. 9—Fasc. 1 (Janeiro 1986)

O efeito Hall quantificado — Prémio Nobel da Física de 1985 (J. M. B. Lopes dos Santos)	1
Materials Research Soc. / II Simpósio Ibérico Fís. Mat. Condensada	12
O forno solar na escola secundária (António Gama e Artur Marques da Costa)	13
Olimpíadas de Física	17
Publicações da SPF	19
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física	21

Laser Portugal - 25 anos depois . . . . .	24
Princípios do Laser (M. Ribau Teixeira e F. Carvalho Rodrigues) . . . . .	I
Holografia: Princípios e Aplicações (O. D. D. Soares) . . . . .	VIII
O Processamento de Materiais por Laser (Dietmar Appelt) . . . . .	XVIII
Comunicações Laser (Manuel A. R. P. de Barros) . . . . .	XXVIII
Os Lasers em Química (Hugh D. Burrows e Sebastião J. Formosinho) . . . . .	XXXI

**Vol. 9—Fasc. 2 (Abril 1986)**

Problemas pedagógicos do ensino da Dinâmica — II (M. Constança Batoréu Providência) . . . . .	25
Tempo e Relatividade — I (P. Crawford do Nascimento e A. Isabel Simões) . . . . .	36
Simulação de um modelo físico simples (J. M. Nunes da Silva) . . . . .	41
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física . . . . .	46

**Laser Portugal - 25 anos depois (continuação)**

Lasers em Medicina (L. M. Bernardo) . . . . .	XXXVII
Lasers em Oftalmologia (P. Ribeiro) . . . . .	XLII
Um Laser é mais brilhante que o Sol! ? . . . . .	XLIV
Os Lasers em espectroscopia (M. Alves Marques) . . . . .	XLV
Lasers em detecção remota (J. Lemos Pinto) . . . . .	LIV
Sensores de fibras ópticas (A. M. P. P. Leite) . . . . .	LVI
Metrologia dimensional laser (O. D. D. Soares e A. O. S. Gomes) . . . . .	LX
Microtopologia diferencial (J. C. A. Fernandes) . . . . .	LXIV
Granitado Laser (A. L. V. S. Lage) . . . . .	LXVI
Ondas térmicas na análise não destrutiva de materiais (M. Zamith Silva e J. A. Ferreira) . . . . .	LXIX

**Vol. 9—Fasc. 3 (Julho 1986)**

Tempo e Relatividade - II (P. Crawford do Nascimento e A. Isabel Simões) . . . . .	49
Anemometria Laser (D. F. G. Durão e J. C. F. Pereira) . . . . .	57
A utilização dos Lasers na espectroscopia Raman (M. Pereira dos Santos e C. Hirlimann) . . . . .	62
Fronteiras da Física . . . . .	65
Alterações Humanas do Clima: o aumento de CO <sub>2</sub> na atmosfera (Ricardo F. Aguiar e Filipe Duarte Santos) . . . . .	67
II Semana de Magnetismo / Sociedade Europeia de Física . . . . .	72
Estatutos da Sociedade Portuguesa de Física . . . . .	73
Olimpíadas de Física . . . . .	79
Física - 86 . . . . .	85
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física . . . . .	86

**Vol. 9—Fasc. 4 (Outubro 1986)**

A Investigação e o Ensino da Física de Plasmas em Portugal (C. A. F. Varandas) . . . . .	89
Materiais 87 . . . . .	96
O papel da intuição nas descobertas e invenções em Física (José Maria Fidalgo Bassalo) . . . . .	96
O «paradoxo» das temperaturas absolutas negativas (José Carlos F. N. Lopes) . . . . .	111
Física - 86 — Sumário da Conferência . . . . .	118
Olimpíadas de Física . . . . .	120
Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física . . . . .	124
II Escola Ibérica de Física da Matéria Condensada / Aplicações da Física Nuclear em Ciência dos Materiais / 8.º colóquio especializado Ampère . . . . .	125
Índice dos volumes 8 e 9 . . . . .	127

*inscreva-se na*

# SOPORVAC

Sociedade Portuguesa de Vácuo

	Joia	Anuidade
sócios singulares:	500\$00	1.000\$00
sócios colectivos:	5.000\$00	5.000\$00

e compareça na Assembleia Extraordinária de 29 de Novembro, às 09h30, no Laboratório de Física da Universidade do Minho, Braga, para eleição dos seus Órgãos.

Lembramos-lhe que o **Curso para Operadores** de VÁCUO ali terá lugar em 27 e 28 de Novembro e terá oportunidade de ver na **Exposição** o equipamento que aqui temos anunciado.

*Contactar:* Prof. Pereira dos Santos — Departamento de Física  
Universidade do Minho — Av. João XXI  
4700 BRAGA — Telef. 053 - 27007/8/9

**CAIOLAB**

Praça D. Afonso V, 120  
4100 Porto • Tel. 682028

EQUIPAMENTO CRIOGÉNICO  
E DE LABORATÓRIO, LDA.



VOL. 9 • FASC. 4 • OUTUBRO 1986

## SUMÁRIO

<b>A Investigação e o Ensino da Física de Plasmas em Portugal . . .</b>	<b>89</b>
<i>C. A. F. Varandas</i>	
Materiais 87 . . . . .	96
<b>O papel da intuição nas descobertas e invenções em Física . . .</b>	<b>96</b>
<i>José Maria Fidalgo Bassalo</i>	
<b>O «paradoxo» das temperaturas absolutas negativas . . . . .</b>	<b>111</b>
<i>José Carlos F. N. Lopes</i>	
<b>Física - 86 – Sumário da Conferência . . . . .</b>	<b>118</b>
<b>Olimpíadas de Física . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física . . . . .</b>	<b>124</b>
II Escola Ibérica de Física da Matéria Condensada / Aplicações da Física Nuclear em Ciência dos Materiais / 8.º colóquio especiali- zado Ampère . . . . .	125
<b>Índices dos volumes 8 e 9 . . . . .</b>	<b>127</b>