GAZETA DE FISICA

REVISTA DA SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

VOL. 8, FASC. 4
OUTUBRO 1985

Niels Bohr • 1885 - 1962
O primeiro centenário do seu nascimento ocorreu a 7 de Outubro de 1985.

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.° — 1000 LISBOA

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

Preço de assinatura: país 500$00; estrangeiro US$10.

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

Publicação subsidiada pelo Instituto Nacional de Investigação Científica

Composto e impresso na *Imprensa Portuguesa* • Rua Formosa, 108-116 • 4000 PORTO

O ano do centenário de Niels Bohr

Ocorreu a 7 de Outubro de 1985 o primeiro centenário do nascimento de Niels Bohr. Durante o ano lectivo que agora começa, Gazeta de Física *procurará fazer-se eco das comemorações, publicando traduções ou artigos alusivos à vida e obra científica de N. Bohr.*

O nome deste grande físico dinamarquês aparece associado, para os nossos alunos do secundário — e mesmo para o grande público — ao chamado modelo atómico de Rutherford-Bohr (1913), desenvolvido quando o jovem Niels Bohr colaborou com o grupo de Manchester, liderado por Ernest Rutherford.

Menos conhecidos — para além do gosto de N. Bohr pelo futebol, ski e vela ou da tocante ligação a seu irmão, o matemático Harald Bohr — são os primeiros trabalhos (experimentais) sobre tensão superficial (vibrações de jactos líquidos), a dissertação de doutoramento sobre teoria electrónica dos metais, a falta de sintonia com J. J. Thomson na primeira estadia em Inglaterra (Cambridge, 1911), a influência do trabalho de Rydberg, etc., etc.

Em 1921 Bohr torna-se director do novo Instituto de Física Teórica de Copenhague, em Blegdamsvej 17. Esse viria a ser um endereço que sucessivas gerações de físicos teóricos saberiam de cor, pois Copenhague torna-se o local privilegiado de encontro dos obreiros da grande revolução dos anos 20 e 30: Heisenberg, Pauli, Dirac, Schroedinger, Mott, Landau, Rosenfeld, Peierls, Gamow, Oppenheimer, Weisskopf, etc. etc.

Em 1927 Bohr apresenta, no Congresso de Como, o conceito de «complementaridade» que viria a tornar-se o cerne da interpretação da Física Quântica identificada com a «Escola de Copenhague». Iniciam-se então (5.º Congresso Solvay) os debates, durante anos, com Einstein, sobre a interpretação da Física Quântica (que Bohr resumiu em «Discussions with Einstein on epistemological problems in atomic physics», dedicado a Einstein nos seus 70 anos). Em 1935 Einstein, Podolsky e Rosen publicam o trabalho sobre o «paradoxo» associado aos seus nomes; a «resposta» de Bohr não se faz esperar, mas para muitos não foi inteiramente convincente. Seria necessário esperar até aos anos 80 para ser possível realizar experiências *que provaram que a Natureza (neste caso) não se comporta como Einstein teria preferido! Como alguém escreveu «a Mecânica Quântica é magia»...*

Se bem que, a partir de 1927, questões epistemológicas tivessem constituído uma constante do pensamento e das publicações de Niels Bohr, muitos outros problemas — científicos e sociais — o viriam a ocupar. Ocorre citar os trabalhos sobre reacções nucleares, a cisão, a interacção de partículas carregadas com a matéria, a mensurabilidade de grandezas do campo electromagnético, etc. Por outro lado a sua influência no desenvolvimento da ciência e tecnologia do seu país, as preocupações reveladas na «Carta aberta às Nações Unidas» (1950), a intervenção na criação e desenvolvimento do CERN, são outros tantos índices da excepcional dimensão humana de Niels Bohr.

Armando Gibert (1914-1985)

Quando acabava de ser impresso o anterior fascículo da Gazeta de Física tomou a Comissão de Redacção conhecimento da morte do Professor Armando Gibert. Cumprindo um elementar dever de gratidão, a Gazeta de Física — que A. Gibert fundou há quase 40 anos, em circunstâncias nada fáceis — presta singela homenagem à sua memória, publicando a presente nota redigida pela Professora Lídea Salgueiro.

Armando Carlos Gibert nasceu em Lisboa, em 1 de Agosto de 1914.

Licenciou-se em ciências matemáticas em 1938, tendo sido assistente extraordinário vitalício da Fac. de Ciências de Lisboa desde 1937.

Dada a elevada classificação obtida nas cadeiras de Física (18 valores) foi contratado como assistente de Física da Faculdade de Ciências de Lisboa em 1938. Foi bolseiro do Instituto para a Alta Cultura (actualmente INIC) a partir desta data, dedicando-se ao ensino e à investigação científica, sob a orientação de Manuel Valadares.

No período decorrente de 1942 a 1947 foi bolseiro na Escola Politécnica Federal de Zurique (Suíça), tendo realizado o seu doutoramento em 1946, sob a orientação do Prof. Scherrer, com uma tese intitulada «Effet de la température sur la diffusion neutron-proton».

Dado que, na referida época, era obrigatório associar uma nota ao doutoramento, a Escola Politécnica Federal de Zurique sugeriu que lhe fosse atribuída a classificação de 20 valores.

Em 1944 foi-lhe concedido o prémio Artur Malheiros (Ciências Físico-Químicas) da Academia das Ciências de Lisboa, pela realização de um trabalho intitulado «Sobre um Liquefactor de Hidrogénio; Princípio e Funcionamento».

Em 1946 fundou a revista Gazeta de Física para onde escreveu vários artigos de divulgação. Fez parte da direcção da referida revista até ela ser integrada na Soc. Port. de Física.

Em Junho de 1947 foi demitido da função pública juntamente com vários professores universitários, por deliberação do Conselho de Ministros.

A secção de Física da Faculdade de Ciências de Lisboa, viu-se ainda privada, pela mesma razão, de outros dois professores: Aurélio Marques da Silva e Manuel Valadares. Armando Gibert trabalhou então como Físico até 1952, no Instituto Português de Oncologia, onde realizou trabalhos de investigação especialmente no domínio da Curieterapia.

De 1952 a 1962 trabalhou no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, tendo-se dedicado à investigação aplicada à Engenharia Civil, designadamente no domínio de isótopos (areias marcadas com prata radioactiva) para estudo do assoriamento do porto da Figueira da Foz.

De 1958 a 1964 fundou a Companhia Portuguesa de Indústrias Nucleares (CPIN) de cuja direcção fez parte como Administrador Delegado. Realizou aí importantes trabalhos técnico-económicos, relativos à implantação de centrais nucleares em Portugal.

Em 1959 colaborou, por convite, na enciclopédia técnica «Atome et Industrie» (Genève) compilando para a secção IV-C-17-1

o tema «Observation des mouvements du sable sous l'eau an moyen de l'argent 110».

Em 1960 fundou o Forum Atómico Português; foi Presidente de uma Secção do 1er Congrès de Foratom (Paris, 1962).

Desde 1947, mas em especial de 1965 a 1979, trabalhou em diversas firmas industriais e comerciais no campo técnico de mecânica de precisão, electrónica e automática, tendo sendo administrador das referidas firmas.

Em 1974 o seu doutoramento obtido na Suíça foi equiparado ao grau de Doutor em Física Nuclear, pelas Universidades Portuguesas.

Após a sua reintegração em 1975, nos termos do Decreto-Lei n.º 173/74, de 26 de Abril, regeu a cadeira de História da Física na Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (ano lectivo de 1975/6).

Em 1979 foi aposentado, por motivos de saúde, da Faculdade de Ciências de Lisboa.

A. Gibert participou em vários congressos científicos realizados em Portugal, Espanha e Suíça (Genève), onde apresentou comunicações.

Publicou dois livros de problemas para cadeiras universitárias e, mais recentemente, «Origens Históricas da Física Moderna — Introdução Abreviada», editado pela Fundação Calouste Gulbenkian (1982).

Os trabalhos publicados por A. Gibert abrangem a divulgação, a informação e a investigação científica. Neste domínio dedicou-se em especial à Física Nuclear, designadamente ao estudo de neutrões. Alguns dos trabalhos envolvem revisões de conjunto publicadas em revistas da especialidade.

O último trabalho realizado (1985) foi a biografia do Eng.º Manuel Rocha, a ser publicado durante o referido ano.

Apesar do seu precário estado de saúde manteve sempre um lúcida actividade intelectual, tendo até aos últimos dias da sua vida, elaborado um projecto de organização, preparação efectiva, produção e edição de um Vocabulário Técnico Científico e Profissional, abrangendo desde o início três línguas (português, inglês e francês).

Faleceu em Lisboa em 6 de Julho de 1985.

(Lídea Salgueiro)

ICARUS 85

2 a 7 de Dezembro 1985, Fac. Ciências do Porto

ICARUS 85 é uma exposição dedicada essencialmente à Astronautica e Astronomia relacionados com o Sistema Solar, incluindo aspectos de instrumentação como telescópios, lasers, hologramas e outros dispositivos.

É uma realização do Projecto ASTA (Astronomia Solar e Técnicas de Aproveitamento), iniciativa dos alunos de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências do Porto.

O Projecto ASTA está receptivo a todo o tipo de apoios e aberto àqueles que dele quizerem fazer parte.

Projecto ASTA, Apart. 975, 4016 Porto Codex

LASER-PORTUGAL; 25 ANOS DEPOIS!

Porto, 13 e 14 de Dezembro de 1985

Jornadas técnico-científicas cobrindo as actividades relacionadas com os lasers em Portugal, destinadas a investigadores, industriais e outros utilizadores de equipamentos laser; terão lugar nas instalações do Centro UNESCO do Porto, em 13 e 14 de Dezembro.

Trata-se de uma iniciativa, inserida nas Comemorações do 25.º Aniversário da descoberta do laser, da Divisão de Óptica da Sociedade Portuguesa de Física e patrocinada pelo Centro UNESCO do Porto, entre outras instituições. Com estas jornadas, foi organizado um inquérito para o levantamento da actividade laser em Portugal, cujos resultados serão divulgados.

Terão ainda lugar sessões informativas especiais, destinadas ao público não especializado, sobre tecnologias de largo impacto económico e social.

Para obter os boletins de inquérito, pré-inscrição (até 15 de Nov. 85) e outras informações os interessados devem dirigir-se a:

Centro UNESCO do Porto
Rua José Falcão, 100 r/c, 4000 Porto
Tel: 32 48 05-32 48 55; Tlx: 2727 8 UNESPO P

Gaz. Fis., Vol. 8 Fasc. 4, 1985

Da Grande Unificação à Superforça final

JORGE DIAS DE DEUS
Instituto Nacional de Investigação Científica/Instituto Superior Técnico

1. Introdução

Em Março de 1980 decorria na cidade do Porto o Encontro Nacional de Física da Sociedade Portuguesa de Física, organizado pela Delegação nortenha da Sociedade. O tema da primeira sessão, a ter lugar após os oficiais discursos de abertura, era o de: A Grande Unificação das Forças da Natureza.

Glashow, Weinberg e Salam tinham ganho o prémio Nobel da Física de 1979, poucos meses antes. O assunto da Unificação já era pois coisa da moda. De facto, a teoria da unificação das interacções electromagnéticas e fracas tinha um apelo estético irresistível. A que não resistiram, por exemplo, os membros da Comissão de atribuição do prémio Nobel. Se é verdade que a existência de correntes neutras — condição necessária para a validação da teoria — tinha ficado em 1974 experimentalmente demonstrada, e que as várias determinações do ângulo de Weinberg — que mede, digamos assim, o grau de mistura da corrente fraca com a corrente eléctrica — eram todas consistentes, também é verdade que não havia na altura a prova provada de que a teoria estava certa. A Comissão de atribuição do prémio Nobel correu pois um risco ao atribuir o prémio a Glashow, Weinberg e Salam. Se o risco foi pequeno ou grande é difícil de dizer. Para a comunidade de Física de Altas Energias era claro que a teoria tinha de ser aquela. Tão certa estava a comunidade que conseguiu convencer os países membros do Centro Europeu de Pesquisa Nuclear (CERN) a construir o acelerador e sistema de aniquilação protão-antiprotão com energia de 540 GeV (600 vezes a massa do protão) no centro de massa, que levou à demonstração física, isto é, experimental, do triunfo da teoria. A descoberta dos bosões W e Z em 1982/83, com massas iguais às previstas teoricamente, veio consagrar, sem vestígio de dúvidas, a teoria electro-fraca de Weinberg — Salam e veio provar também que a Comissão do prémio Nobel de 1979 não se enganara e que o gasto de milhões de francos suíços no acelerador SPS e no anel de colisões protão-antiprotão não fora inglório.

Em 1980, porém, nada disto era ainda claro. A unificação electro-fraca, embora não testada, estava praticamente aceite. Avançava-se rapidamente — com demasiada rapidez, como se verá — na via da Grande Unificação, englobando na unificação as interacções fortes. A gravitação, a interacção mais querida a Einstein, permanecia então ainda em estado de abandono, parecendo desligada do resto.

O que é que mudou e não mudou desde 1980?

Para responder, talvez seja melhor começar pelo princípio.

2. As interacções

No contacto com o mundo físico observamos uma quantidade infinitamente variada de fenómenos: a maçã que cai, a ave que voa, o cometa que passa, o planeta que roda e parece preso ao sol, a estrela que morre explodindo, a molécula que se forma, as moléculas que se encadeiam, o gelo que se funde, a bússola que se orienta, a onda que se propaga, a partícula que decai, o núcleo atómico que se desintegra. A lista de exemplos não tem fim. O que é notável é ter sido possível, no começo deste século, reduzir a física de toda essa infinidade de fenómenos à física de quatro interacções fundamentais: GRAVITACIONAL, ELECTRO-MAGNÉTICA, FRACA e FORTE. Enquanto toda a estrutura do Universo, nas grandes escalas de espaço e de tempo, nos fala da gravitação; a Química, a Biologia, a Biofísica constroem-se essencialmente com base no electromagnetismo; a estabilidade dos núcleos e de todas as coisas

com que lidamos revelam a presença da interacção forte; e o fluxo cósmico existente de neutrinos e a instabilidade de muitas partículas nos dizem que há ainda que acrescentar a interacção fraca.

O que é uma interacção? É uma força, uma força recíproca entre objectos materiais. Como se aprende aliás numa das leis de Newton. Supondo que as interacções resultam dum potencial V (Força = gradiente de V) podemos escrever:

$$V = -\alpha\, e^{-\mu r} / r$$

em que r é a distância entre os objectos em interacção. Este potencial é o chamado potencial de Yukawa e contém dois parâmetros α e μ. O parâmetro α mede a *intensidade* da interacção ou, dizendo doutra maneira, mede as cargas dos objectos em interacção. Existem cargas eléctricas, cargas gravitacionais mais conhecidas por massas, cargas fracas e cargas fortes. Quanto maior for α, com $\alpha > 0$, maior será a força atractiva. O parâmetro μ mede o *alcance* da interacção. O factor exponencial $e^{-\mu r}$, com $\mu > 0$, faz com que a interacção desapareça rapidamente quando a distância aumenta. Quanto maior é μ menor é o alcance da interacção. Para $\mu = 0$ o alcance é infinito e temos os conhecidos potenciais de Newton (gravitação) e Coulomb (electromagnetismo).

As interacções gravitacionais (G), electromagnéticas (EM), fracas (f) e fortes (F) diferem muito quanto aos parâmetros α e μ:

	G	EM	f	F
α	10^{-40}	10^{-3}	10^{-5}	10
$1/\mu$	∞	∞	10^{-16} cm	10^{-13} cm

Há interacções que são mais fortes, as interações fortes, e há outras que vão mais longe, como a interacção electromagnética. A física do átomo, envolvendo distâncias da ordem de 10^{-8} cm é determinada pelo electromagnetismo (átomo de Rutherford-Bohr), mas já a física do núcleo atómico, com distâncias da ordem de 10^{-13} cm, é controlada pela interacção forte (ver caixa).

A interacção electromagnética é de menor intensidade que a interacção forte, $\alpha_{EM} \ll \alpha_F$ mas é de muito maior alcance, $1/\mu_{EM} \gg 1/\mu_F$. Graficamente:

A curtas distâncias, $\lesssim 10^{-13}$ cm, domina a interacção forte. A distâncias maiores, $\gtrsim 10^{-13}$ cm, passa a dominar o electromagnetismo. A curtas distâncias temos a física nuclear, a distâncias maiores a física atómica.

A muito grandes distâncias, entre as grandes massas das galáxias, estrelas e planetas, já que estes objectos são feitos de matéria electricamente neutra, domina absolutamente a interacção mais débil, a gravitação.

Se as quatro interacções são tão diferentes umas das outras, umas vão longe outras são mais intensas, como dar sentido a uma unificação?

3. A ideia de unificação

Um primeiro aspecto a ter em conta, antes de se entrar propriamente na ideia de unificação, é o da universalidade das interacções. Quando se diz que maçãs, peras, laranjas, pessoas, aviões caiem devido à acção da gravidade está-se a fazer uma afirmação sobre a universalidade da gravitação. Um salto gigantesco no sentido da universalidade foi dado por Newton no século XVII ao propor que as forças terrestres gravitacionais (as que fazem cair à superfície da Terra maçãs e

outros objectos) tinham a mesma origem que as forças cósmicas responsáveis pela estabilidade e movimento no sistema solar (ver caixa junta).

Unificação das forças terrestres e cósmicas

A diferença de energia potencial entre um objecto de massa m à altura h e o mesmo objecto na superfície da Terra é

$$\Delta V = mg\ h$$

onde g é a aceleração da gravidade ($g \simeq 9{,}8\ m/s^2$).
Segundo a lei da gravitação universal

$$V = -\ GmM/r$$

onde G é a constante de gravitação universal, M a massa da Terra e r a distância do objecto ao centro da Terra: $r = R + h$, R sendo o raio da Terra ($R \simeq 6370$ km). Vem

$$\Delta V = -GmM/(R+h) + GmM/R$$

e, para alturas relativamente pequenas, $h/R \ll 1$,

$$\Delta V = GmM/R\ .\ [1-(1+h/R)^{-1}]$$

$$\Delta V \simeq GmMh/R^2$$

Finalmente $g = GM/R^2$.
Duas constantes, g e G, aparentemente sem ligação e obtidas com medições experimentais completamente distintas, estão relacionadas de forma muito simples graças à ideia de universalidade das forças terrestres e das forças cósmicas.

Com a unificação propriamente dita pretende-se tratar conjuntamente interacções que à partida pareciam ter origem diversa, correspondendo a físicas diferentes. O exemplo histórico mais importante é o da unificação da electricidade com o magnetismo. Ao longo dos séculos XVIII e XIX desenvolveram-se, de costas uma para a outra, duas ciências separadas, a electricidade e o magnetismo. Com os trabalhos de Ampere, Oersted, Faraday, ficou claro que os fenómenos eléctricos tinham uma correspondência em fenómenos magnéticos e vice-versa. Correntes eléctricas criavam campos magnéticos e as variações nos campos magnéticos criavam correntes eléctricas. De facto, a electricidade e o magnetismo são as duas faces duma mesma ciência: o electromagnetismo. O casamento unificador do magnetismo com a electricidade formalizou-se em definitivo com as famosas equações de Maxwell e viu a sua consagração com a descoberta por Hertz, no princípio do século, das ondas electromagnéticas.

A unificação das teorias electromagnética e fraca, realizada com a teoria electrofraca de Weinberg e Salam, corresponde a uma unificação equivalente à operada por Maxwell. O plano visionário de Einstein dum campo unificado está hoje, na década de 80, actual e podemos mesmo pensar num plano geral da unificação (ver caixa).

4. Os problemas essenciais da unificação

As questões que é preciso resolver para que a unificação faça sentido e tenha possibilidade de êxito são pelo menos as seguintes:

1 — Terão todas as interacções a mesma forma? Haverá um princípio unificador para todas as interacções? Tal princípio parece realmente existir: todas as interacções satisfazem o princípio de *invariância de padrão.*

2 — Como é que se podem unificar interacções com intensidades tão diferentes? Essa diferença nas intensidades poderá ser um acidente de «baixas» energias e temperaturas. À medida que se aumente a energia nos processos físicos assistir-se-á à convergência dos valores dos diferentes α. No passado do nosso Universo, quando as temperaturas eram da ordem dos milhões de graus, a unificação teria sido algo evidente (só que nenhum humano podia existir nessas condições para observar tal unificação!).

3 — Como é que se pode falar de unificação quando os alcances $1/\mu$ das interacções são tão diferentes? A resposta parece estar na possibilidade das partículas portadoras das interacções poderem, nalguns casos, adquirir massa. Tal massa, que é essencialmente proporcional a μ, controla o alcance da interacção, mas não afecta propriamente a natureza da interacção. Da mesma forma que, para uma mesma interacção, um magneto pode estar em dadas condições desmagnetizado (massa zero) ou, noutras condições, adquirir uma magnetização espontânea (massa diferente de zero). A este último fenómeno, que no caso das interacções fundamentais corresponde a potenciais de curto alcance, dá-se em geral o nome de *quebra espontânea de simetria.*

Vamos agora ver, em linhas gerais, como são tratados estes três problemas.

5. O princípio unificador: a invariância de padrão

Sempre que, relativamente a dada operação de simetria, a física não se altera diz-se que há uma invariância do sistema em estudo e que uma lei de conservação é obedecida. Invariância dum sistema físico no que respeita à translação espacial leva à conservação do momento linear. Invariância em relação a translação temporal conduz à conservação da energia.

Na descrição das interacções fundamentais há a necessidade de recurso a uma descrição em termos de campos físicos. A cada ponto x do espaço-tempo associa-se uma função ψ (x) que pode ter várias componentes ψ^i (x). Invariância de translação, por exemplo, significa que a física não se altera se se fizer nos campos a transformação $\psi(\mathbf{x}) \rightarrow \psi(\mathbf{x}+\mathbf{a})$. Uma transformação importante é a «transformação de fase» em campos complexos:

$$\psi \rightarrow \psi' = \psi\, e^{i\theta}.$$

e a invariância a ela associada. Esta transformação é o que se chama uma transformação de padrão («gauge»). O parâmetro θ, que pode ter várias componentes dependendo das componentes de ψ, pode depender ou não da coordenada espaço-temporal $x \equiv (x^0, x^1, x^2, x^3)$. Se θ = constante a transformação chama-se *global,* e é o equivalente a uma «rotação» do sistema em seu conjunto. Se θ depende de x, θ (x), a transformação diz-se *local* (ver quadro).

TRANSFORMAÇÃO GLOBAL E LOCAL

A transformação global deixa claramente o sistema invariante e isso conduz à conservação da carga (que está ligada ao parâmetro α). A transformação local introduz deformações que são compensadas por tensões, ou campos adicionais A, campos de padrão, necessários para assegurar que a física continue invariante.

O princípio unificador que buscávamos é o princípio que diz que todas as interacções são mediadas por campos de padrão, de «gauge», que asseguram a invariância de padrão.

Em conclusão: para além dos *campos materiais* ψ é preciso introduzir os *campos de padrão* A. Os campos ψ têm a ver com as cargas e o parâmetro α, os campos A têm a ver com a propagação e o alcance μ das interacções. Há partículas, que ao nível mais elementar são os electrões e os quarks, que são os portadores das cargas, e há outras como o fotão, que desempenham o papel de mensageiros da interacção.

Embora o princípio de invariância de padrão seja comum a todas as interacções fundamentais, há uma diferença importante entre o electromagnetismo, interacções fracas e forte, por um lado, e a gravitação, por outro. Nos primeiros casos o campo de «gauge» é vectorial (spin 1), na gravitação ele é tensorial (spin 2, gravitão). Nesta perspectiva é mais fácil pensar na unificação primeiro das interacções electromagnética, fraca e forte e só depois incluir a gravitação. Exactamente o que está a acontecer.

Um resumo da situação no que respeita às interacções electromagnética, fraca e forte é o que se segue:

Para cada interacção, como se disse, há campos materiais (partículas de spin 1/2) e campos de padrão (partículas de spin 1). As interacções são tais que existem invariâncias em determinadas transformações de grupo («rotações» num espaço complexo). O electrão ao emitir um fotão fica sempre electrão: isto corresponde a uma transformação no grupo U(1). Já nas interacções fracas, como há três campos de padrão, pode haver mudanças de identidade nas transformações, por exemplo, $d \rightarrow u + W^-$. O grupo de transformações que é gerado pelos três bosões fracos W^+, W^-, Z^o, é o grupo SU(2). No caso das interacções fortes deparamos com um espaço novo, o chamado espaço de cor, onde as interacções são mediadas por oito campos de padrão. Estas partículas são os gluões e o grupo é o SU(3).

SITUAÇÃO

INTERACÇÕES ELECTROMAGNÉTICA, FRACA E FORTE

	Campo material spin=1/2	Campo padrão spin=1	Grupo de transformação	Unificação	
EM	e electrão	1 fotão	U(1)	SU(2)×U(1) (Weinberg - Salam)	? SU(5) SO(10)
f	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} e \\ \nu \end{pmatrix}$ quarks leptões	3 bosões fracos W^+, W^-, Z^o	SU(2)		
F	$\begin{pmatrix} \text{azul} \\ \text{amarelo} \\ \text{vermelho} \end{pmatrix}$ quarks com cor	8 gluões G_i, i=1, ... 8	SU(3)		

6. A unificação das cargas

A carga eléctrica, por exemplo positiva, tende a provocar à sua volta a formação de dipolos, de tal maneira que a distância grande a carga parece ser menor (isto é o que se chama efeito de blindagem). Por outro lado, aumentar a energia nas interacções físicas corresponde a ser-se capaz de estudar o que se passa a distâncias cada vez mais pequenas. Basta pensar que aumentar a energia dum feixe é aumentar a frequência e aumentar a frequência é diminuir o comprimento de onde e, portanto, diminuir as distâncias exploradas por esse feixe. Nas interacções a carga α que é observada depende assim da energia E do processo: $\alpha = \alpha$ (E). No caso da carga eléctrica, devido ao efeito de blindagem, a carga medida aumenta com a energia (distâncias mais pequenas).

Porém, com as interacções fortes tudo se passa ao contrário. Não só os quarks com a sua carga de cor actuam criando um efeito de blindagem, mas os próprios gluões, e diferentemente do fotão que é electricamente neutro, têm uma carga de cor de tal forma que nas suas interacções entre si produzem um efeito, que é dominante, de anti-blindagem. Nas interacções fortes, a curta distância a carga de cor é muito menor do que a grandes distâncias. A dependência de α com E, α (E), é ao contrário; a função α (E) é decrescente. Nas interacções fortes há o que se diz «liberdade assimptótica», isto é, a distâncias muito curtas a carga tende para zero e deixam de se fazer sentir as interacções: os quarks embora aprisionados dentro dos protões comportam-se a curtas distâncias como se fossem livres.

Embora às energias actuais as várias cargas sejam muito diferentes, $\alpha_f \neq \alpha_{EM} \neq \alpha_F$, devido à maneira também diferente como as várias cargas dependem da energia, $\alpha_f(E) \neq \alpha_{EM}(E) \neq \alpha_F(E)$, é possível encontrar uma energia E_U tal que

$$\alpha_f(E_U) = \alpha_{EM}(E_U) = \alpha_F(E_U).$$

A energia a que a igualdade ocorre, E_U, é a energia de grande unificação: 10^{15} GeV. De notar que a massa do protão é $\simeq$ 0.9 GeV e que as máximas energias que deverão ser alcançadas em aceleradores até ao fim do século são da ordem de 10^5 GeV. A energia de unificação é uma energia extremamente elevada.

7. O problema dos diferentes alcances das interacções

Vimos que a energias muito elevadas as cargas elementares das interacções fundamentais f, EM e F podem de facto ser iguais, $\alpha_f(E_U) = \alpha_{EM}(E_U) = \alpha_F(E_U)$, e uma das dificuldades da unificação fica assim facilitada. Resta-nos ainda o problema dos diferentes alcances das várias interacções.

A resolução do problema dos diferentes alcances no caso das interacções electromagnéticas ($1/\mu = \infty$) e fracas ($1/\mu = 10^{-16}$ cm) constituiu o passo decisivo — passo que levou cerca duns 20 anos a ser dado — na construção da teoria electrofraca de Weinberg-Salam. Se o fotão (com massa zero) e os bosões fracos (com massas da ordem de 80 vezes a massa do protão) são tão diferentes como é possível unificar o electromagnetismo com a interacção fraca?

Imaginemos um problema físico onde se coloque o estudo dum potencial $V(\phi)$ nos dois casos representados:

O potencial, tanto num caso como no outro, possui claramente a simetria $\phi \to -\phi$, isto é, fica invariante nessa transformação. No primeiro caso, da esquerda, a solução mais estável, mínimo do potencial, corresponde a $\phi = 0$. Esta solução, tal como o potencial, é invariante na transformação $\phi \to -\phi$, pois zero fica sempre igual a zero. No caso da direita a solução $\phi = 0$ é instável. As soluções estáveis são duas: ou $\phi = +k$ ou $\phi = -k$. Tanto num caso como no outro, a solução escolhida viola a simetria do potencial.

Suponhamos uma bola que role no interior das paredes do potencial. No caso da esquerda a bola acaba por parar em $\phi = 0$. No caso da direita a bola acaba em $+k$ ou em $-k$. Não há razão especial para ir para uma solução ou para a outra, devido à simetria do problema. No entanto esta mesma simetria é violada na solução escolhida. Há o que se diz, violação espontânea de simetria.

Em teorias com invariâncias de padrão há soluções semelhantes à dos dois exemplos de potenciais acima indicados. Nuns casos, electromagnetismo, o estado mais estável corresponde ao caso em que os campos se anulam, $\phi = 0$ (o vácuo é um vácuo simples). Noutros casos, interacções fracas, o estado padrão de energia mais baixa acontece com $\phi \neq 0$ (o vácuo não tem a simetria da teoria). No primeiro caso o fotão não tem massa, no segundo caso os bosões vectoriais adquirem uma massa (que tem a ver com o parâmetro k). Mas nada disso é muito importante: o que é essencial é que a teoria, o potencial, mantém a simetria de padrão. É essa invariância da teoria, do potencial, que é essencial à unificação.

8. Escalas de massa e grande unificação

Devido ao fenómeno de quebra de simetria e ao facto das partículas dos campos de padrão adquirirem massa a descrição da teoria fica dependente da escala de energias e massas a que o estudo é feito. No caso das interacções fortes, como se supõe que os gluões não têm massa, e no caso do electromagnetismo, como o fotão tem massa zero, a teoria realiza-se plenamente a qualquer energia. No caso das interacções fracas só para energias da ordem da massa experimental dos $W^{\pm}$ e $Z \sim 10^2$ GeV/c², ela deixa de se comportar como uma teoria efectiva (teoria de Fermi) e aparece como teoria com invariância de padrão. Na grande unificação das interacções electromagnéticas, fracas e fortes outras partículas de padrão, com massas da ordem de $E_U \sim 10^{15}$ GeV/c², geradoras das transições partículas fortes (protão, pião) → partículas electromagnéticas (electrão, neutrino) devem surgir. Só acima de 10^{15} GeV/c² será a grande unificação das interacções electromagnéticas, fracas e fortes transparente.

Seja qual for o grupo de transformações da grande unificação (SU(5), SO(10)), ele contém com certeza os geradores das transições entre quarks (do protão) e o positrão (electrão de carga positiva). A partícula de padrão mediadora da transição é o bosão X de massa $M_X \sim 10^{15}$ GeV/c². Como o protão é mais pesado do que o electrão, o protão pode decair. Isto é: a grande unificação leva necessariamente ao problema do decaimento do protão. Por exemplo, segundo o esquema

O parâmetro essencial que controla este decaimento do protão é a massa da grande unificação $M_X \sim 10^{15}$ GeV/c² a que corresponde um tempo médio de vida do protão da ordem de 10^{30} anos (recordar que o tempo que passou desde o Big-Bang é *só* da ordem de 10^{10} anos). Até ao momento, e contrariando um optimismo reinante há 4 ou 5 anos atrás, não existe ainda qualquer evidência experimental para a morte do protão (ver caixa).

Medição experimental do decaimento do protão

Uma vez que todos os materiais com que tratamos são feitos à base de protões não parece à primeira vista grande problema detectar uma reacção de decaimento do protão (por exemplo: $p \rightarrow e^+ \pi^o$). Porém, como o tempo de vida é enorme, ~ 10^{30} anos, a probabilidade do decaimento ocorrer é muito pequena. O que se faz é estudar um enorme número de protões ao mesmo tempo. Na prática estuda-se um tanque com água (7000 toneladas de água no caso da experiência IMB) que contém um enormíssimo número de protões (quantos?). O segundo problema difícil de resolver é o da radiação cósmica que constantemente atravessa a Terra e que provoca reacções que podem simular o decaimento do protão. O que se faz é isolar o tanque de água o mais possível do fluxo dos raios cósmicos. A solução encontrada tem sido a de construir o tanque de água no fundo de minas abandonadas. Aí há uma protecção que pode ser de quilómetros de material da crosta terrestre. O decaimento $p \rightarrow e^+ \pi^o$ é então, em princípio, fácil de detectar pois o π^o transforma-se em dois fotões que são identificados com fotomultiplicadores.

Os resultados de duas experiências, IMB (numa mina de sal perto de Cleveland, Estados Unidos) e Kamioka (numa mina de zinco no monte Ikenayama, Japão) não são conclusivos.

Modo de decaimento	N.º de acontecimentos/Limite no tempo de vida (anos)			
	Kamioka		IMB	
$P \rightarrow e^+ \pi^o$	0	$> 3 \times 10^{31}$	0	$> 2 \times 10^{32}$
$P \rightarrow \mu^+ \pi^o$	0	$> 2 \times 10^{31}$	0	$> 1 \times 10^{32}$
$P \rightarrow \mu^+ K^o$	1	$> 1 \times 10^{31}$	1	$> 6 \times 10^{31}$
$P \rightarrow \mu^+ \eta$	1	$> 8 \times 10^{30}$	0	$> 9 \times 10^{31}$
$P \rightarrow \nu K^+$	2	$> 7 \times 10^{30}$	3	$> 1 \times 10^{31}$

Quando se aumenta ainda mais a escala de energias, até aos 10^{19} GeV/c^2, coloca-se imediatamente a questão da suprema unificação com a gravidade. Nos anos recentes, de 1980 até agora, grande parte dos esforços dos crentes nas virtudes da unificação têm ido no sentido de englobar desde já a gravitação. Nasceram assim as supersimetrias e as modernas ideias sobre as dimensões «escondidas» de espaço-tempo (teorias de Kaluza-Klein).

9. Supersimetrias

Até agora, sempre que nos referimos às várias interacções, temos falado por um lado em partículas de «matéria» (de spin 1/2) e por outro lado em partículas de «campo» (de spin 1). As partículas de spin semi-inteiro chamam-se fermiões e as partículas de spin inteiro chamam-se bosões. Em geral fermiões e bosões têm físicas bem distintas, (ver discussão ao lado).

Funções de onda de bosões e fermiões

A maneira como bosões e fermiões se distribuem no espaço é bem distinta. A função de onda ψ de dois bosões ou dois fermiões, que dá a probabilidade de encontrar as duas partículas a uma distância relativa **r**, é muito diferente. A função de onda de bosões é simétrica e a função de onda de fermiões é anti-simétrica na troca das duas partículas, isto é, na mudança $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$.

Em consequência, os bosões podem ocupar a mesma posição (r=0) e os fermiões não. Esta propriedade dos fermiões é essencial na estrutura electrónica dos elementos do quadro periódico.

Com a supersimetria tem-se a ambição de colocar no mesmo pé bosões e fermiões, «campo» e «matéria», tratando unificadamente propriedades do espaço-tempo e propriedades internas das partículas. Os geradores das transformações super-simétricas naturalmente que irão poder transformar bosões em fermiões e vice-versa. Se a supersimetria fosse realizada exactamente, sem quebras, então cada fermião teria o seu parceiro bosónico e cada bosão o seu parceiro fermiónico. Por exemplo:

Partícula	Parceiro supersimétrico
quark, spin 1/2	squark, spin 0
leptão, spin 1/2 (electrão)	sleptão, spin 0
bosões de «gauge» γ, W^+, Z, spin 1	gauginos, spin 1/2 $\tilde{\gamma}$, $\tilde{W}^+$, $\tilde{Z}$
gravitão, spin 2	gravitino, spin 3/2

Esta duplicação de partículas tem grandes vantagens do ponto de vista técnico (extrema simplificação nos cálculos, tempo de vida do protão mais longo) mas coloca o problema de onde encontrar tantos parceiros. Pode-se argumentar, recorrendo a mais uma quebra de simetria, que eles serão muito mais pesados do que as partículas usuais (massas de ordem de 100 GeV/c^2) e propostas tem havido de os identificar nas colisões protão-antiprotão com o anel de colisões do CERN a energias de 540 GeV e, muito recentemente (Maio de 1985), 900 GeV. Não há até agora evidência para a existência de parceiros supersimétricos e a unificação bosões-fermiões continua a ser só uma bela ideia especulativa.

10. As dimensões escondidas (Kaluza-Klein)

Com a Relatividade Geral, em 1915, Einstein introduziu a ideia de geometrização da Física e, em especial, da gravitação. À noção de força da gravidade Einstein contrapôs a noção de deformação do espaço-tempo. Duma forma simplificada: enquanto ausência de corpos materiais e da força gravitacional neles centrada correspondente a um espaço simples, linear, plano; a presença de corpos materiais e força gravitacional implica a existência de deformações, curvaturas, rugas no espaço-tempo. De algum modo, portanto, Einstein reduziu o estudo da interacção gravitacional ao estudo da geometria do espaço-tempo quadridimensional com as 3 dimensões de espaço e 1 de tempo.

Mas não há só a interacção gravitacional. Como geometrizar as outras interacções?

Nos anos 20 a outra interacção que estava bem identificada era a interacção electromagnética. Em 1921 um físico polaco pouco conhecido, Theodor Kaluza, inspirado no programa de geometrização da gravitação de Einstein, imaginou uma forma de geometrizar o electromagnetismo. O que ele sugeriu é que num «espaço-tempo» a 5 dimensões (4 dimensões de espaço mais 1 dimensão de tempo) a «gravitação» geometrizada contém de facto as equações da gravitação usual de Einstein (4 dimensões) mais as equações de Maxwell do electromagneismo (1 dimensão). As interacções electromagnéticas, no esquema de Kaluza, são dobras, curvaturas na quinta dimensão.

Porém, toda a experiência humana nos diz que vivemos num mundo com três dimensões de espaço e uma dimensão de tempo. Onde está a extra-dimensão de Kaluza?

O físico sueco Oscar Klein em 1926 sugeriu a resposta à pergunta: a quinta dimensão está lá, só que não somos ainda capazes de nos apercebermos dela (ver esquema).

As dimensões que não se vêm

(Linha a 1 dimensão) (Linha ampliada: 1+1=2 dimensões)

As escalas de observação que temos não nos permitem observar a 5.ª dimensão. Da mesma forma que um risco num papel parece ter 1 dimensão, quando observado com uma lupa surge com 2 dimensões. A quinta dimensão está comprimida, ou enrolada e essa é a razão pela qual não nos apercebemos dela.

A teoria de Kaluza-Klein permaneceu como curiosidade durante 50 anos com pouco interesse para a física, sem que grande atenção lhe fosse prestada. De facto, com o reconhecimento da existência de outras interacções fundamentais, as interacções fraca e forte que na primeira metade do século ficaram estabelecidas, a unificação a partir da gravitação e electromagnetismo, com que Einstein sonhara, perdeu interesse. Só no fim dos anos 70, quando pareceu ficar claro que era a altura de voltar à gravitação, é que a comunidade científica se lembrou de ir desenterrar, as ideias de Kaluza e Klein.

Hoje em dia o problema é não o da geometrização da gravitação e do electromagnetismo, mas o da geometrização das quatro interacções fundamentais. Quanto à ideia base, ela não é mais do que a ideia original de Kaluza posta em dia. Para incluir as interacções adicionais há que acrescentar mais dimensões ao espaço tempo usual. Todas elas escondidas, claro. Assim se chega a um Universo com 11 dimensões 7 delas enroladas e, até agora, invisíveis. Tal como em relação às massas das partículas de padrão, o Universo sofreu quebras de simetria (ligadas a diferentes escalas de energia) que deixaram só quatro dimensões transparentes às escalas de energia hoje alcançadas. Para penetrar nas dimensões escondidas energias muito mais elevadas e aceleradores muito mais potentes seriam necessários. Só assim, possivelmente, se chegará à super-força super-unificadora final. Ou, talvez esteja fora do nosso alcance a capacidade de reproduzir os momentos altamente energéticos que sucederam o esplendoroso instante do big-bang. O Universo, na sua infância tinha as escalas de energia necessárias para a super-unificação de todas as forças. Só que a existência de seres vivos e inteligentes requereu primeiro que esse Universo se expandisse e arrefecesse. E hoje, a super-unificação talvez seja só, afinal, um sonho perdido da Humanidade, sonho que nunca realmente existiu.

BIBLIOGRAFIA

GERARD'T HOOFT — «Gauge Theories of the Forces Between Elementary Particles», Scientific American, June 1980, pp. 104-137.

HOWARD GEORGI — «A Unified Theory of Elementary Particles and Forces», Scientific American, April 1981, pp. 48-63.

STUART RABY, RICHARD SLANSKY, GEOFFREY WEST — «Particle Physics and the Standard Model», Los Alamos, Science, 11, 2, 1984.

RICHARD SLANSKY — «Toward a Unified Theory: An Essay on the Role of Supergravity in the Search for Unification», Los Alamos, Science, 11, 72, 1984.

L. M. SIMMONS, JR. — «Science Underground-The Search for Rare Events», Los Alamos, Science, 11, 160,1984.

PAUL DAVIES — «Superforce: The Search for a Grand Unified Theory of Nature», Simon and Schuster Edts., New York, 1984.

Conferência GIREP-86:

COSMOS-an educational challenge

A Conferência GIREP (Groupe International de Recherche sur l'Enseignement de la Physique) será dedicada, em 1986, ao tema «COSMOS — um desafio educacional».

A Conferência terá lugar em Elsinore (Dinamarca), de 18 a 23 de Agosto de 1986. O número de participantes é limitada a 150, sendo dada preferência a membros do GIREP; o custo por participante é de 2.500 coroas dinamarquesas (abrangendo todas as despesas de participação, alimentação e alojamento em quarto duplo).

Exemplos de tópicos que serão tratados: Cosmologia e visão científica do Universo; Estrelas e Galáxias; Sistema Solar (cometa Halley); Laboratórios espaciais, e uso para fins educativos; Materiais para ensino (haverá uma exposição de material e demonstração de equipamento para planetário); etc. A língua utilizada será o inglês.

Endereço: GIREP 86, The Royal Danish School of Educational Studies Department of Physics, Emdrupvej 115 B, DK-2400 Copenhagen NV, Dinamarca.

Gaz. Fis., Vol. 8 Fasc. 4, 1985

Gerador de funções

VALTRUDES S. OLIVEIRA e J. SOUSA LOPES
Departamento de Física, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1700 Lisboa

Neste trabalho apresenta-se um gerador de funções, apropriado a fins didácticos, que fornece simultaneamente duas ondas quadradas, uma onda triangular e duas sinusoidais. Estas ondas são síncronas e a sua frequência é ajustável de 5Hz a 50kHz. A amplitude das ondas triangular e sinusoidais é ajustável entre 0 e 10V; a fase de uma das ondas sinusoidais pode variar-se, a frequências vizinhas de 1kHz, entre 10° e 180° relativamente às restantes ondas. As ondas quadradas são de amplitude fixa, variando uma entre níveis simétricos de aproximadamente ±5V e a outra entre 0,1 e 4,5V. O nível médio de tensão das ondas sinusoidais pode ajustar-se continuamente entre os extremos em que a onda é sempre positiva ou sempre negativa. A frequência pode ser controlada por tensão exterior, permitindo que o gerador funcione como um gerador de varrimento.

Descrição geral do gerador

O esquema de blocos do gerador está indicado na Fig. 1 e o esquema eléctrico completo na Fig. 2. Em cada um dos blocos indicam-se alguns dos componentes que o constituem para facilitar a sua identificação na Fig. 2.

O bloco «motor» é o gerador de onda triangular; é um circuito oscilador cuja frequência, ajustável através do potenciómetro R2, é controlada por uma tensão. A onda triangular obtém-se fazendo fluir num condensador uma corrente constante (o que provoca uma variação em forma de rampa, da tensão nos terminais do condensador de acordo com a

Fig. 1

equação $\Delta v = i\Delta t/c$), e invertendo periodicamente o sentido dessa corrente. A inversão ocorre quando a amplitude da onda iguala um ou outro de dois valores simétricos, $v_{máx}$ e $v_{min} = -v_{máx}$; o circuito comparador que verifica essa igualdade produz a onda quadrada simétrica e, a partir desta, uma outra variando entre níveis de tensão compatíveis com as normas definidas para os circuitos lógicos integrados TTL. O amplificador de saída da onda triangular permite ajustar a respectiva amplitude entre 0 e 10V através do potenciómetro R27.

O conversor triângulo-seno é um circuito não linear que produz uma atenuação do sinal aplicado à sua entrada; essa atenuação é função da amplitude do sinal, podendo assim arredondar um sinal triangular para uma forma aproximadamente sinusoidal. O andar de saída fornece potência suficiente para se actuar directamente sobre altifalantes ou outros vibradores electromecânicos de baixa impedância; a amplitude e o nível de saída são ajustáveis através dos potenciómetros R54 e R47.

O bloco desfasador recebe a onda da saída anterior e fornece uma outra onda sinusoidal

Gerador de funções

Fig. 2

desfasada relativamente à primeira. A diferença de fase ϕ é dada pela expressão $\phi = 2\,\mathrm{tg}^{-1}\,(1/wCR)$ onde C=C6 e R é o valor da resistência introduzida pelo potenciómetro R59; como o valor máximo de R é 100kΩ, o desfasamento mínimo é função da frequência. Os valores de C6 e R59 são convenientes para trabalhar na vizinhança de 1kHz.

Oscilador triangular

O oscilador triangular é constituído por um circuito integrador, um comparador, um comutador e uma fonte de tensão para controlo da frequência.

Considere-se primeiro o comparador (CI-2). Quando a entrada — tem uma tensão superior à da entrada +, a saída do integrado tem uma tensão próxima da alimentação negativa. No terminal de R18 oposto ao integrado, a tensão é determinada pelos díodos D3 e D4 (cerca de −5V), estando D4 a conduzir como um díodo zener e D3 como um díodo ordinário. Quando a entrada — tem uma tensão inferior à da entrada +, a tensão no ponto comum de R18 e D3 é ainda determinada pelos díodos, comportando-se agora D3 como um zener. A tensão aos terminais da série D3-D4 varia entre valores nominalmente simétricos dado que os díodos têm características nominais idênticas. É esta tensão que depois de atenuada no divisor R15-R17 serve de tensão de referência para os valores $v_{máx}$ e v_{min} da onda triangular.

A saída do comparador comanda o comutador constituído pelo transistor de efeito de campo T1. Durante a alternância negativa da onda quadrada, o transistor está ao corte; durante a alternância positiva, T1 conduz com uma resistência equivalente de cerca de 50Ω entre dreno e fonte, efectivamente ligando à massa um dos terminais de R11.

A variação linear da tensão obtém-se fazendo fluir uma corrente constante num condensador (C4 ou o paralelo de C4 e C3), ligado entre a saída e a entrada inversora do amplificador operacional CI-1B. No ponto comum de R8 e R9 é aplicada uma tensão positiva constante, v; o divisor R9, R10 aplica na entrada + do operacional a tensão v/2. A realimentação através de C4 (ou C4//C3) força o mesmo valor da tensão, v/2, na entrada —, e em R8 flui uma corrente com a intensidade de v/20 mA dado que R8 = 10kΩ. Se T1 está cortado, esta corrente flui para C4 (ou C4//C3) e a tensão no terminal do condensador ligado à saída do operacional desce a uma taxa constante. Se T1 conduz, passa nele uma corrente com a intensidade de v/10 mA (R'11 é escolhida por forma a igualar a 5kΩ o valor da resistência entre o terminal — e a massa). Metade desta corrente é a que atravessa R8; a outra metade é fornecida pelo condensador que assim debita uma corrente com intensidade igual àquela que recebe quando T1 está cortado. A tensão à saída do operacional sobe, a uma taxa constante. Note-se que T1 conduz quando a entrada + do comparador está em $v_{máx}$; quando a tensão à saída do operacional atinge $v_{máx}$ o comparador dispara, mudando a tensão na sua entrada + para $v_{min} = -v_{máx}$ e cortando T1. A tensão à saída do operacional vai então descer até v_{min}; instante em que o comparador volta a disparar, repetindo-se o ciclo. A frequência é controlada pela tensão aplicada ao ponto comum de R8 e R9. Esta tensão obtida a partir de uma tensão de referência fornecida pelo zener D1, dividida no potenciómetro R2 é amplificada no operacional CI-1A. A tensão aplicada a este operacional pode também ser obtida a partir de uma fonte exterior utilizando a entrada designada por varrimento. Quando a tensão exterior varia no tempo, a frequência do oscilador segue essa variação; por exemplo, quando essa tensão tem a forma de uma onda quadrada, a frequência do oscilador comuta entre dois valores distintos, um para cada alternância.

Conversor triângulo-seno

Uma sinusoide pode ser aproximada por uma linha poligonal. Com poucos segmentos por ciclo pode obter-se uma aproximação suficientemente boa para a generalidade das aplicações, desde que a origem e a inclinação dos vários segmentos sejam convenientemente esco-

lhidas. Considere-se uma sinusoide inscrita numa onda triangular; razões de simetria tornam evidente que os segmentos que aproximam os troços da sinusoide que atravessam o eixo dos tempos devem coincidir com a onda triangular, e que aqueles que correspondem aos máximos e mínimos da sinusoide devem ser paralelos a esse eixo.

A primeira destas condições determina a relação entre as amplitudes das ondas sinusoidal e triangular, que se escrevem na forma $A_S = A_{Smáx} \cdot \text{sen}2\pi t$ e, no intervalo $-1/4 < t < 1/4$, $A_T = A_{Tmáx} \cdot 4t$ (tempo em unidades de período de onda). Da igualdade das derivadas nos pontos em que as curvas cruzam o eixo dos tempos, $dA_S/dt = 2\pi A_{Smáx}$ e $dA_T/dt = 4A_{Tmáx}$, obtém-se a relação entre as respectivas amplitudes: $A_{Smáx} = (2/\pi)\ A_{Tmáx}$.

Se além do segmento que cruza o eixo dos tempos se usarem «n» outros segmentos para aproximar a onda sinusoidal no intervalo de 0 a $\pi/2$ do seu argumento (dada a simetria da onda basta referir este intervalo) pode mostrar-se que a escolha que minimiza a distorção é aquela em que esses segmentos têm origem nos pontos de amplitude A_{SK} correspondentes aos valores $2K/(2n+1) \cdot \pi/2$ do argumento do seno ($1 \leqslant K \leqslant n$), e têm inclinação C_K igual à da tangente à sinusoide no ponto médio do troço de curva que aproximam, $C_K = 4A_{Tmáx} \cos [2K + 1/(2n+1) \cdot \pi/2]$. Com $n = 3$, como no circuito da fig. 2, obtém-se o seguinte quadro de valores para $A_{Tmáx} = 2{,}5V$ ($C_0 = 10V$/período, inclinação da onda triangular):

K	A_{SK}	C_k	C_K/C_0
1	0,691	7,820	0,782
2	1,244	4,340	0,434
3	1,552	0	

A razão C_K/C_0 dá o valor da atenuação a impor à onda triangular no intervalo de amplitude correspondente aos valores k e k+1. Esta atenuação pode obter-se com um divisor resistivo em série com um díodo ligado a uma tensão $A_{SK} - 0{,}5V$ admitindo que o díodo começa a conduzir significativamente apenas quando a tensão ánodo-cátodo excede 0,5V. No circuito da fig. 2 os díodos D6, D8, D10 estão associados à atenuação da alternância positiva, D7, D9, D11 à negativa; o valor da atenuação é determinado por $R/(R+R')$ com $R = R32//R45$ como se indica adiante e $R' = R34$ para C_1/C_0 e $R' = R34//R37$ para C_2/C_0. As tensões $A_{SK} - 0{,}5V$ são fornecidas a partir de T3 e T4 com impedâncias que se podem desprezar face aos valores de R e R'.

A onda triangular é fornecida ao conversor pelo operacional CI-3A através de F32; o terminal de R45 oposto a R32 está ligado a um ponto que, por força da realimentação aplicada ao amplificador CI-3B, constitui uma massa virtual. Assim a onda triangular é vista por R34 e R37 sob uma impedância de $R = R32//R45$. Os potenciómetros R16 e R21 ajustam a amplitude e o nível médio da onda triangular por forma a minimizar a distorção da sinusoidal. Refira-se ainda que o facto de os díodos reais entrarem em condução de uma forma não brusca também contribui para minimizar a distorção.

Construção do circuito

O circuito foi construído sobre uma placa de circuito impresso com as dimensões de 14×10 cm. Os cinco potenciómetros de controlo contínuo (frequência, fase, amplitude triangular, amplitude sinusoidal e nível sinusoidal) e o comutador de controlo de frequência estão montados directamente sobre a placa impressa, bem como as fichas de saída e de entrada (varrimento). O circuito foi projectado para ser utilizado nesta forma, o que do ponto de vista didáctico tem a vantagem de expor o circuito e, além disso, permitir observar os sinais em pontos interiores quando se pretende fazer um estudo pormenorizado do instrumento.

A placa impressa e os componentes para a montagem do circuito (ou o gerador já montado), juntamente com instruções apropriadas, poderão ser fornecidas pelo Departamento de Física, FCUL.

Gaz. Fis., Vol. 8 Fasc. 4, 1985

Difracção na Matéria Condensada

Parte II — Difracção de neutrões

M. MARGARIDA R. R. COSTA
Departamento de Física, Universidade de Coimbra

1. Introdução

Cerca de 50 anos decorreram desde a descoberta do neutrão por J. Chadwick em 1932 e a realização das primeiras experiências (1936) que demonstraram as características ondulatórias de um feixe de neutrões (em movimento) e a possibilidade de estes serem difractados pela matéria condensada.

A rápida evolução dos reactores nucleares nas últimas quatro décadas tornou possível a utilização de feixes de neutrões com fluxos da ordem de 10^{15} s^{-1} cm^{-2} [1] e originou o desenvolvimento de uma técnica de difracção de neutrões, em muitos aspectos semelhante à da difracção de raios X (ver parte I) (1).

São as propriedades específicas do neutrão que conferem à referida técnica possibilidades únicas, permitindo-lhe fornecer informação valiosa e complementar da que é obtida por difracção de raios X e electrões, acerca da matéria condensada, em particular no domínio do magnetismo (2).

De facto, sendo o neutrão uma partícula praticamente neutra, ele não sofre interacção coulombiana com as partículas carregadas — electrões e protões — constituintes da matéria, podendo por isso penetrar profundamente nela (ao contrário do que acontece com um feixe de electrões).

Por outro lado, os feixes de neutrões produzidos nos reactores nucleares têm comprimentos de onda típicos de 0,5-20 Å, isto é, da ordem de grandeza das distâncias interatómicas nos sólidos, o que faz com que estes sejam «boas redes de difracção» para os neutrões. Como veremos em breve, um feixe de neutrões é difractado pelo conjunto de núcleos atómicos, dispostos regular e periodicamente na estrutura cristalina.

Além disso, o neutrão possui um momento magnético que interactua com os momentos magnéticos atómicos (com origem no movimento orbital de alguns dos electrões e nos respectivos spins). É esta sensibilidade dos neutrões a campos magnéticos que os torna tão úteis na investigação de estruturas magnéticas.

Finalmente, os neutrões térmicos têm energias (3) da ordem de grandeza das de muitas excitações que podem estar presentes num sólido (por exemplo, as vibrações térmicas dos átomos) o que torna particularmente vantajosa a sua utilização — em processos de difracção inelástica — no estudo da dinâmica de sólidos.

2. Interacção dos neutrões com a matéria: difracção nuclear e magnética

2.1 Aspectos físicos

Ao contrário do que acontece com a radiação electromagnética (raios X) que interactua com *todos* os electrões de cada átomo, um feixe de neutrões que incide numa porção de matéria interactua com:

(i) — os núcleos atómicos;
(ii) — os electrões *mais exteriores* de cada átomo (ou ião), com spins desemparelhados.

---

(1) Actualmente existem outras «fontes» de neutrões, além dos já tradicionais reactores nucleares. Muito recentemente, entrou em funcionamento a primeira «Spallation Neutron Source», construída no Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Inglaterra [2].

(2) Podem apontar-se como desvantagens da difracção de neutrões em relação à de raios X, os elevados custos da produção e utilização de feixes de neutrões, bem como os baixos fluxos conseguidos (comparados com o de feixes de raios X) que forçam à utilização de amostras de grandes dimensões, quase sempre difíceis de obter.

(3) Cerca de 0,08 eV, para feixes com comprimento de onda de 1 Å. Feixes de raios X e de electrões com idênticos comprimentos de onda têm energias de 12 keV e 150 eV, respectivamente.

No primeiro caso, trata-se de uma interacção (nuclear) forte, de curto alcance, que está na origem do processo da difracção *nuclear*. No segundo, a interacção processa-se entre momentos magnéticos e origina a difracção *magnética*.

Estas diferenças nos aspectos físicos da difracção de raios X e de neutrões tornam-se evidentes quando se considera o poder de difracção de cada átomo, expresso pelo factor atómico de difracção (1), ou «factor de forma», na terminologia correntemente usada ao tratar-se a difracção de neutrões.

Assim — e uma vez que a intensidade da interacção nuclear varia irregularmente com o número atómico — o poder de difracção de elementos vizinhos no quadro periódico pode ser consideravelmente diferente, ao contrário do que sucede para a difracção de raios X. Além disso a difracção nuclear é isotrópica (2) — o poder de difracção de um dado núcleo não varia com a direcção de difracção, isto é, com o ângulo θ de Bragg — e por isso a chamada «amplitude de difracção», *b*, é constante para um dado núcleo.

Daqui ressaltam, de imediato, algumas das vantagens da difracção de neutrões sobre a de raios X, no que respeita às possíveis aplicações: por exemplo, devido à variação irregular de *b*, os neutrões «distinguem», na estrutura cristalina, elementos com números atómicos muito

(1) Ver Parte I deste trabalho.

(2) Notar que as dimensões do núcleo ($\sim 10^{-13}$ cm) — o «objecto» que difracta — são muito inferiores ao comprimento de onda do feixe de neutrões ($\sim 10^{-8}$ cm); por isso a onda difractada tem simetria esférica.

Fig. 1 — Representação esquemática da secção eficaz dos diferentes elementos para a difracção de neutrões (i) e de raios X (ii). O raio dos círculos é proporcional a $|b|$, em (i) e a $f(\sin\theta = 0)$ em (ii). Círculos negros correspondem a valores negativos de b.

próximos, o que não acontece com um feixe de raios X, como pode inferir-se da fig. 1; por outro lado, átomos com poucos electrões (o hidrogénio, o carbono, o oxigénio) têm poderes de difracção consideravelmente maiores para os neutrões do que para os raios X.

A difracção nuclear torna-se, pois, particularmente útil no estudo estrutural de materiais constituídos por átomos leves ou de ligas metálicas desordenadas constituídas por átomos de elementos vizinhos no quadro periódico.

No que respeita à difracção magnética — que pela sua importância merece ser tratada a seguir mais detalhadamente — o poder de difracção de cada átomo, traduzido por um factor de forma, f, decresce com o ângulo θ de um modo semelhante ao já conhecido para a difracção de raios X (1). A fig. 2 mostra a variação de f com $(\sin\theta)/\lambda$ para a difracção de raios X e de neutrões por um mesmo átomo.

2.2 Aspectos geométricos

A geometria de uma experiência típica de difracção de neutrões, esquematizada na fig. 3, é idêntica — salvo no que respeita a dimensões — à da experiência de difracção de raios X. Entre os neutrões emergentes há os

Fig. 2 — Factor atómico de difracção e factor de forma (normalizados) para o mesmo elemento.

(1) Quer num caso quer no outro, as entidades que difractam são electrões distribuídos num volume de dimensões não desprezáveis em relação ao comprimento de onda da radiação.

Fig. 3 — (i): Geometria da difracção de neutrões; (ii): Difractómetro de neutrões (Difractómetro de 2 eixos para neutrões polarizados, Instituto Laue-Langevin, Grenoble, França).

que perderam ou ganharam energia (em processos de difracção inelástica) e os que foram difractados elasticamente pela amostra [1]. Cada feixe emergente numa dada direcção pode resultar da difracção nuclear ou da magnética (ou de ambas simultaneamente).

Tal como foi referido para a difracção de raios X (Parte I), das intensidades observadas para os vários feixes difractados pode inferir-se um conjunto de factores de estrutura (nucleares e magnéticos) que dependem:

(*a*) — das posições atómicas na rede cristalina — através de um factor geométrico idêntico ao definido para a difracção de raios X;

(*b*) — da amplitude de difracção, *b*, ou do factor de forma magnético, f (sin θ/λ), que traduz a distribuição espacial do momento magnético atómico (ou iónico) [2].

São hoje conhecidos, com precisão, os valores de *b* para a maioria dos elementos e seus isótopos. Assim, e uma vez separada a contribuição nuclear da magnética, as intensidades das reflexões nucleares levam ao conhecimento da estrutura cristalina. O processo de análise e tratamento dos dados é idêntico ao descrito para a difracção de raios X.

Analisaremos em seguida, com maior detalhe, a contribuição magnética que origina «reflexões magnéticas».

3. A difracção magnética de neutrões

3.1 Factor de estrutura magnético

A grandeza e distribuição espacial dos spins $\mathbf{s}_j$ assocados a cada átomo ou ião j, determinam a densidade de spin [3] $\mathbf{M}(\mathbf{r})$ numa célula unitária do sólido:

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}) = \sum_j \mathbf{s}_j \, f_j \, (\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \qquad (1)$$

O índice j refere-se a cada um dos N átomos de spin $\mathbf{s}_j$ numa célula unitária, e $f_j(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j)$ traduz a distribuição espacial do spin atómico.

A transformada de Fourier de $\mathbf{M}(\mathbf{r})$ é por definição o factor de estrutura magnético, $\mathbf{F}_M(\mathbf{K})$ [4]:

$$\mathbf{F}_M(\mathbf{K}) = \sum_j f_j(\mathbf{K}) \, \mathbf{s}_j \, \exp\,(i\,\mathbf{K}\,.\,\mathbf{r}_j) \qquad (2)$$

ou

$$\mathbf{F}_M(hkl) = \sum_j f_j \, \mathbf{s}_j \exp 2\pi i\,(hx_j + ky_j + lz_j) \qquad (3)$$

onde o factor de forma, $f(\mathbf{K})$, é a transformada de Fourier de $f(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j)$.

As intensidades das reflexões magnéticas medidas na experiência, $I_M(hkl)$, estão directamente relacionadas, não com o factor de estrutura magnético mas com o chamado «vector interacção magnética»:

$$\mathbf{Q}(\mathbf{K}) = \hat{\mathbf{K}} \wedge \mathbf{F}_M(\mathbf{K}) \wedge \hat{\mathbf{K}} \qquad (4)$$

onde $\hat{\mathbf{K}}$ é o versor de $\mathbf{K}$; sendo

$$I_M(hkl) \propto |\,\mathbf{Q}(\mathbf{K})\,|^2 \qquad (5)$$

Note-se que $\mathbf{Q}(\mathbf{K})$ representa a projecção de $\mathbf{F}_M(\mathbf{K})$ num plano perpendicular ao vector difracção, $\mathbf{K}$ (ver fig. 4). Frequentemente escolhe-se a geometria da difracção de tal modo que $\mathbf{F}_M(\mathbf{K}) \perp \mathbf{K}$; nestas condições é $\mathbf{F}_M(\mathbf{K}) \equiv \mathbf{Q}(\mathbf{K})$.

Fig. 4

---

[1] Em geral, são diferentes os difractómetros usados para detectar e medir as intensidades dos feixes difractados elástica e inelasticamente, o que permite tratar estes dois processos separadamente.

[2] Considerá-lo-emos devido apenas ao spin dos electrões desemparelhados. Em muitos casos de interesse esta é, se não a única, pelo menos a contribuição mais significativa para o momento magnético atómico (ou iónico).

[3] Quando os momentos magnéticos são devidos exclusivamente aos spins electrónicos, esta densidade é proporcional à densidade de momento magnético ou magnetização.

[4] $\mathbf{K}$ é o vector difracção já definido na Parte I. Recorde-se que ele é perpendicular aos planos (hkl) que originam a reflexão (hkl).

3.2 Estruturas ferro e antiferromagnéticas

A fig. 5 ilustra algumas estruturas magnéticas simples dentre a enorme variedade que ocorre na natureza.

Fig. 5 — Algumas estruturas magnéticas: A, B, C — estruturas antiferromagnéticas; D — estrutura ferromagnética; E — estrutura ferrimagnética.

Considerem-se, como exemplo, as estruturas antiferromagnéticas A e B: em ambas, a orientação de spins em átomos consecutivos ao longo de determinadas direcções é antiparalela; no caso (B) a célula unitária «magnética» (definida não só pelas posições atómicas mas também pela orientação dos spins) coincide com a cristalográfica (determinada apenas pela distribuição espacial dos átomos); no caso (A) a célula unitária magnética difere da cristalográfica.

Para estas estruturas, o factor de estrutura magnético (3), escrito em unidades apropriadas, é:

$$F_M(hkl) = (e^2\ \gamma/me^2) \sum_j 1/2\ \mu_j\ \sigma_j\ f_j \exp 2\pi i\ (hx_j + ky_j + lz_j) \qquad (6)$$

onde σ_j é um «indicador de spin» que, nas posições atómicas das estruturas consideradas, toma os valores ± 1, conforme a orientação do spin $\mathbf{s}_j$, e $\mu_j = 2s_j$ representa o momento magnético em unidades «magnetão de Bohr»; γ é o momento magnético do neutrão expresso em unidades «magnetão nuclear» e os restantes símbolos tem o significado usual. O factor de estrutura nuclear é:

$$F_N(hkl) = \sum_j b_j \exp 2\pi i\ (hx_j + ky_j + lz_j) \qquad (7)$$

Tendo em conta as expressões (6) e (7) é fácil verificar que $F_M(hkl)$ se anula quando $h+k+l=2n$ e $F_N(hkl)$ só é diferente de zero nestas condições. Ou seja:

(i) — as reflexões nucleares ocorrem quando $h+k+l=2n$;

(ii) — as reflexões magnéticas ocorrem quando $h+k+l=2n+1$.

Umas e outras observam-se pois para valores de $(\sin\theta)/\lambda$ distintos, podendo as respectivas intensidades ser medidas separadamente, na mesma experiência.

Os diagramas de difracção correspondentes podem ver-se nas figs. 6 (A) e (B).

Analisemos agora a estrutura ferromagnética D da fig. 5: átomos vizinhos têm spins alinhados paralelamente [1].

A célula unitária cristalográfica coincide sempre com a magnética, nestas estruturas. Considerações análogas às que foram feitas atrás permitem concluir que as reflexões magnéticas e nucleares ocorrem para os mesmos valores de h, k e *l*, e portanto de $(\sin\theta)/\lambda$. Num diagrama de difracção as correspondentes intensidades sobrepõem-se (fig. 6D), tornando-se necessário encontrar um processo de medir *com rigor* cada uma das contribuições. Este problema põe-se com maior acuidade para a contribuição magnética que é, em geral, muito menor que a nuclear e decresce rapidamente com θ, atendendo à variação típica de $f(\sin\theta/\lambda)$.

[1] Supõe-se aqui que este alinhamento se mantém em toda a amostra, isto é, que ela é constituída por um só domínio.

Nestes casos, recorre-se à difracção de neutrões polarizados (1), que permite medir, para cada reflexão «mista», a razão $(F_M+F_N)^2/(F_M-F_N)^2$, da qual se pode inferior, com erro muito inferior ao cometido usando neutrões não polarizados (2), o factor de estrutura magnético F_M (supondo F_N conhecido com precisão).

Fig. 6 — Diagramas de difracção de neutrões: M—reflexão nuclear; N—reflexão magnética.

4. Alguns exemplos da utilização da difracção magnética

A variedade de aplicações da difracção de neutrões hoje conhecida [4] impede que este assunto seja aqui tratado extensivamente. Citam-se, por isso, apenas dois exemplos:

(a) *Estruturas magnéticas e diagramas de fase*

Como se sabe, as reflexões magnéticas só ocorrem se existir ordenação dos momentos magnéticos (spins) em átomos consecutivos ao longo da estrutura. Esta ordenação mantém-se a temperaturas inferiores a uma temperatura crítica mas desaparece a temperaturas superiores.

A observação das reflexões magnéticas num espectro de difracção e a determinação das direcções (θ) em que ocorrem os correspondentes feixes difractados, permite conhecer o tipo de estrutura magnética da amostra.

Medindo pois as intensidades de uma ou várias reflexões magnéticas a diferentes temperaturas pode determinar-se a temperatura crítica para a amostra e traçar-se o diagrama de fases magnético para o material em estudo.

Fig. 7 — Diagrama de fases (magnético) para ligas de Cr-Ge.

A fig. 7 ilustra esta situação: as ligas de Cr com diversos outros elementos (Al, Si, Fe, Co, Ga, Ge, etc.) apresentam estruturas antiferromagnéticas diversas que podem distinguir-se através da presença ou ausência, quer da

(1) Como leitura complementar sugere-se a referência [3], cap. 6.

(2) Neste caso, a intensidade medida é proporcional a $(F_M^2+F_N^2)$.

reflexão magnética (100), quer de reflexões de menor intensidade que ocorrem para valores de θ próximos do da referida reflexão. A observação de espectros de difracção para amostras de diferentes composições, a diferentes temperaturas, permite traçar o diagrama de fases representado na fig. 7 [5].

(b) *Distribuição espacial do momento magnético*

Supondo conhecida a estrutura cristalina, o conjunto de factores de estrutura magnéticos observados, colocados numa escala absoluta, depois de corrigida a absorção, a extinção e os efeitos térmicos permite inferir:

(i) — o factor de forma magnético para os átomos constituintes da amostra;

(ii) — a densidade de momento magnético (ou de spin), na forma de mapas de densidade — obtidos de um modo semelhante ao referido na Parte I para os de densidade electrónica.

Na fig. 8 pode ver-se um destes mapas que traduz uma nítida asfericidade na distribuição de spin do Ni [6].

Fig. 8 — Densidade de spin no plano (100) da estrutura cúbica do níquel.

Os factores de forma observados para o gadolínio [7], bem como os calculados para um modelo postulado da distribuição de spin podem ver-se na fig. 9.

Fig. 9 — Factor de forma do gadolínio.

O modelo postulado contém, em geral, um determinado número de parâmetros que pretendemos conhecer — grandeza do momento magnético, ocupação e forma das orbitais de electrões magnéticos — e que são ajustados sucessivamente, até que os valores calculados de f(sin θ/λ) coincidam, dentro do erro experimental, com os observados.

REFERÊNCIAS

[1] PYNN, R. and FENDER, B. E. F. — «Neutron Scattering in Europe». *Phys. Today*, Jan./1985, 46.

[2] LANDER, G. H. and PRICE, D. L. — «Neutron scattering with spallation sources», *Phys. Today*, Jan./1985, 38.

[3] BACON, G. E. — «Neutron Diffraction», 1975, Clarendon Press, Oxford.

[4] AXE, J. D. and NIEKLOW, R. M. — «Neutron scattering in condensed matter physics», *Phys. Today*, Jan./1985, 27.

[5] BOOTH, J. G., COSTA, M. M. R. and ZIEBECK, K. R. A. — *Journal of Mag. and Mag. Mat.*, **31-34** (1983), 285.

[6] MOOK, H. A. — *Phys. Rev.*, **148** (1966), 495.

[7] MOON, R. M., KOEHLER, W. C., CABLE, J. W. and CHILD, H. R. — *Phys. Rev.* B, **5**, (1972), 997.

Gaz. Fis., Vol. 8 Fasc. 4, 1985

Paradoxo da vara e do celeiro e invariância relativista

A. A. GONÇALVES DA SILVA, P. M. ARAÚJO SÁ
Departamento de Engenharia Electrotécnica, F.E.U.P.

Estuda-se um paradoxo clássico sobre comprimento em relatividade. As equações de Lorentz parecem não o resolver: observadores inerciais diferentes tiram conclusões diferentes. Esclarece-se que tal não contradiz o princípio da invariância e ilustra-se fisicamente por meio de duas «experiências de pensamento».

I. Introdução

Um corredor segura uma vara com comprimento próprio l_0 e move-se com velocidade $v=(\sqrt{3}/2)\,c=0{,}866\,c$ (*) em direcção a um celeiro com comprimento próprio $(3/4)\,l_0$ (v. Fig.). Em repouso encontra-se um agricultor

(T — Traseira; F — Frente; E — Entrada; S — Saída).

que afirma que a vara se contrairá e caberá no celeiro, afirmando o corredor que o celeiro contrairá e não poderá conter a vara. Quem tem razão? Será esta uma pergunta com sentido?

Este problema foi colocado aos alunos do 1.º ano do Curso de Engenharia Electrotécnica da F.E.U.P., numa das cadeiras de Física. Constatou-se que a sua interpretação era mais difícil do que o previsto e não completamente satisfatória na literatura disponível. O estudo que se segue é feito àquele nível.

II. A transformação de Lorentz

Considerando um refencial fixo, S, em relação ao qual se move com velocidade $\mathbf{v}=v\,\mathbf{i}$ um referencial S′, as equações de transformação de Lorentz podem escrever-se (além de $\Delta y=\Delta y'$; $\Delta z=\Delta z'$):

$$\text{(I)}\quad \begin{aligned}\Delta x &= \gamma\,(\Delta x' + v\,\Delta t')\\ \Delta t &= \gamma\,(\Delta t' + v/c^2\,.\,\Delta x')\end{aligned}$$

ou

$$\text{(II)}\quad \begin{aligned}\Delta x' &= \gamma\,(\Delta x - v\,\Delta t)\\ \Delta t' &= \gamma\,(\Delta t - v/c^2\,.\,\Delta x)\end{aligned}$$

sendo, respectivamnte, Δx, Δt, $\Delta x'$, $\Delta t'$ intervalos de espaço e de tempo em S e S′ entre os mesmos dois acontecimentos. A equivalência matemática dos dois sistemas é clara (inversão), correspondendo fisicamente a poder considerar-se que S′ está parado e S se move com velocidade $\mathbf{v}=-v\,\mathbf{i}$ (invariância).

Para calcular intervalos é necessário definir cuidadosamente os acontecimentos em questão. Estes podem ser escolhidos como se segue, para o nosso problema.

Acontecimento 1. Frente ≡ Entrada

$$x'_1 = l_0\,,\ t'_1 = 0\,;\ x_1 = 0\,,\ t_1 = 0$$

Acontecimento 2. Traseira ≡ Entrada

$$x'_2 = 0\,,\ \Delta x'_{21} = -\,l_0\,;\ x_2 = 0\,,\ \Delta x_{21} = 0$$

Das equações (I) ou (II) resulta:

$$\Delta t_{21} = l_0/(2v)\,;\ \Delta t'_{21} = l_0/v$$

Acontecimento 3. Frente ≡ Saída

$$x'_3 = l_0\,,\ \Delta x'_{31} = 0\,;\ x_3 = 3/4\ l_0\,,\ \Delta x_{31} = 3/4\ l_0$$

Das equações (I) ou (II) resulta:

$$\Delta t_{31} = 3l_0/(4v)\,;\ \Delta t'_{31} = 3l_0/(8v)$$

Assim, segundo S′ a traseira chega à entrada após a frente ter chegado à saída e a vara não cabe, enquanto que segundo S a traseira chega à entrada antes de a frente atingir a saída e a vara cabe. Para quem esperasse resolver o «paradoxo», o resultado é uma desilusão!

Mas não dizia Einstein que o movimento (inercial) é relativo, não dependendo as conclu-

(*) $\gamma = (1-v^2/c^2)^{-1/2} = 2$.

sões do referencial em que nos colocamos? Não! Einstein diz que é indiferente considerar S com $\mathbf{v} = o$ e S′ com $\mathbf{v} = v\,\mathbf{i}$ ou S′ com $\mathbf{v} = o$ e S com $\mathbf{v} = -v\,\mathbf{i}$ não sendo por isso possível distinguir se se está em repouso ou com velocidade constante não nula — e isso está confirmado pois os sistemas (I) e (II) fornecem as mesmas conclusões. Mas não diz que observadores em referenciais inerciais diferentes medem o tempo e o espaço da mesma maneira: pelo contrário, foi aqui que ele revolucionou os conceitos da Mecânica. As equações I transformam a frase «não cabe» na frase «cabe» — funcionam assim como operadores. Mas mesmo estas frases são polémicas: o que é «caber»? O agricultor argumenta: meço as extremidades do celeiro ($\Delta x = 3/4\ l_0$) simultaneamente ($\Delta t = o$) e constato que nesse instante a vara está no interior daquele. Mas o corredor sorrirá perante tal ingenuidade, pois nessas condições é $\Delta t' = -\gamma \,.\, v/c^2$, $\Delta x = -\gamma \,.\, v/c^2 \,.\, 3/4\ l_0$ ($<o$), isto é, para ele o que se passou foi que o agricultor mediu primeiro à saída e só *depois* à entrada — e daí o seu «erro»! Daí também uma interpretação física para o desacordo.

É igualmente assim que um observador que vê uma carga eléctrica em movimento mede um campo eléctrico e um campo magnético, enquanto que um segundo movendo-se com ela mede apenas um campo eléctrico. Ambos têm razão! As equações de Lorentz transformam este campo eléctrico no campo electromagnético do primeiro referencial.

III. Uma experiência com parede. Elasticidade

Apesar das explicações anteriores, é grande a tentação no sentido de fechar ambas as extremidades do celeiro «quando» o agricultor considera que a vara lá está contida e verificar o que acontece. Se o agricultor, que não ouve nenhum barulho, não vê as portas ou a vara a partir, etc., parar a experiência logo após ter demonstrado que tinha razão, como poderá o corredor ver coisas partidas, apesar de para ele não ser possível fechar as portas? Aqui tem de haver acordo: ou há «explosão» ou não, admitindo-se apenas que se situe diferentemente no espaço-tempo. Mais uma vez estamos a ser enganados pelas palavras! E estamos também a omitir um aspecto físico essencial. Façamos a experiência.

Suponhamos que à saída do celeiro existe um muro [1],

$$\text{Muro} \equiv \text{Saída},$$

que aguentará todos os tratos a que vai ser submetido; e que à entrada existe uma porta que se pode fechar.

A inclusão do muro vai alterar por completo a situação: vamos ver que assim o corredor também «verá» a vara dentro do celeiro! Coloquemo-nos no seu referencial: os comprimentos (bem medidos, isto é, com $\Delta t' = o$) da vara e do celeiro são respectivamente l_0 e $3/4 \,.\, l_0/\gamma = 3/8\ l_0$ e quando Frente $\equiv$ Muro existe um comprimento $5/8\ l_0$ de vara fora do celeiro. Mas nenhum efeito físico se faz sentir na Traseira enquanto a onda elástica, orginada no choque, não chega lá, e o corredor continua a corrida com a mesma velocidade e a mesma facilidade! E se a onda se propagasse instantaneamente (pergunta de um estudante desatento)? Aqui entra de novo a relatividade: nenhuma interacção se pode propagar com velocidade superior a c. Vamos considerar a situação mais desfavorável: a onda de choque propaga-se com velocidade c (corpo rígido em relatividade [2]) levando um tempo l_0/c até atingir a Traseira. Mas o celeiro continua a mover-se à velocidade de $-v\,\mathbf{i}$ e para que engula a vara decorre um tempo de apenas $5/8\ l_0/v = 0{,}72\ l_0/c < l_0/c$: só depois de a vara estar totalmente contida no celeiro é que a sua traseira sente o choque. O corredor sentirá então um enorme «coice relativista», proveniente da expansão da vara — expansão elástica, tal como a contracção elástica resultante do choque — e, se a porta da entrada se tiver fechado o sistema «explodirá» também. O corredor e o agricultor concordarão quanto aos resultados da experiência: a vara cabe; o sistema «explode»!

Pode verificar-se que mesmo que o celeiro tivesse um comprimento próprio de apenas $(2-\sqrt{3})\ l_0 = 0{,}268\ l_0$ *ou* que se movesse com uma velocidade de 0,28 c ainda a vara caberia nele.

IV. Uma experiência com guilhotina

E se accionarmos uma guilhotina colocada na Entrada quando Frente ≡ Muro e estão 5/8 l_0 de vara fora do celeiro? A vara é cortada (corredor) ou não (agricultor)? É outra questão mal colocada. Retomemos os acontecimentos 1, 2 e 3. Suponhamos agora que o acontecimento 3 (Frente ≡ Muro) é também caracterizado por:

«Emissão, em Frente ≡ Muro, de uma ordem de disparo da guilhotina colocada na Entrada» (note-se de passagem que tal emissão é feita em instantes diferentes em S e S′, como se viu). Consideremos ainda:

Acontecimento 4.: «Ordem de Disparo Atinge a Entrada»

$$\Delta x_{41} = 0 \; ; \; \Delta t_{41} = 3/4 \; l_0 \; (1/c + 1/v)$$

Das equações (I) ou (II) resulta:

$$\Delta x'_{41} = -2{,}80 \; l_0 \; ; \; \Delta t'_{41} = 3/2 \; l_0 \; (1/c + 1/v) \, ,$$

isto é, para S′ a guilhotina atravessa o eixo (2,8 l_0) atrás da Traseira e não corta a vara, concordando com S. O desacordo será quanto ao ponto do espaço-tempo em que a guilhotina cai e não quanto à integridade da vara.

É também evidente que o instante em que se sincronizam os relógios nada altera (mas a sincronização só pode ser feita uma vez...).

V. Conclusão

A linguagem corrente e os conceitos do dia-a-dia são fecundos na formulação de questões sem sentido. Em particular, não deve confundir-se invariância relativista, que garante que todas as leis da Física são as mesmas em referenciais inerciais diferentes, com «Invariância nos resultados das medidas». E também não podemos impor condições físicas impossíveis (e.g. interacções instantâneas) quando se realiza uma experiência de pensamento.

Agradecemos ao Prof. E. Lage (Laboratório de Física, FCUP) pela útil discussão sobre aspectos essenciais e à Dr.ª F. Mota (idem) pela interessada leitura e comentários.

REFERÊNCIAS

[1] RINDLER, W. — Essential Relativity: Special, General, and Cosmological, Revised Second Edition, 1979, Springer-Verlag.

[2] BROTAS, A. — «A Necessidade duma Elasticidade Relativista dos Corpos Rígidos», 2.ª Conferência Nacional de Física, Porto, 1980.

Ponto de Física do 12.º ano

Soluções «oficiais» e soluções correctas

C. RAMALHO CARLOS, EDUARDO MARTINHO, JORGE VALADARES
Divisão de Educação da Sociedade Portuguesa de Física

No passado mês de Julho decorreram as chamadas provas de aferição do 12.º ano de escolaridade, as quais tiveram este ano um peso muito importante na nota de candidatura para os pretendentes ao ingresso no ensino superior.

A prova escrita de Física da 1.ª fase/1.ª chamada (Ponto 73) teve dois casos: um no problema do «satélite», outro no problema do «balão». Na presente nota faz-se uma breve análise desses casos.

Problema do satélite

O enunciado do problema II.2 era o seguinte:

«2. Um satélite de massa 2000 Kg descreve uma órbita de raio igual a 9000 Km em volta da Terra com velocidade de módulo constante. Calcule:

2.1 O trabalho que seria necessário realizar para afastar o satélite até uma distância infinita da Terra.

2.2 A grandeza do momento angular do satélite suposto um ponto material, em relação ao centro da Terra».

No tocante a este enunciado, e a outros do mencionado ponto, percebe-se mal que se

deixe passar em claro os erros de escrita dos símbolos de quilograma (kg, e não Kg) e de quilómetro (km, e não Km). Esta falta de cuidado constitui um mau exemplo e prejudica o esforço dos professores de Física no sentido de que os seus alunos escrevam correctamente os símbolos das unidades.

Todavia, o caso neste problema diz respeito à discrepância entre a solução «oficial» fornecida pelo Ministério da Educação para a classificação da questão 2.1 e a solução correcta.

A solução «oficial» baseia-se na relação seguinte:

$$W = 0 - \left(-G\frac{Mm}{r}\right) = G\frac{Mm}{r}$$

em que G designa a constante de gravitação, M a massa da Terra, m a massa do satélite e r o raio da órbita do satélite.

A solução correcta da questão 2.1 é dada pela relação seguinte:

$$W = 0 - \left(-\frac{1}{2}G\frac{Mm}{r}\right) = \frac{1}{2}G\frac{Mm}{r}$$

em que os símbolos têm o mesmo significado que em cima.

Como se vê, para o Ministério seria preciso mais energia do que a realmente necessária, concretamente o dobro! A validade da solução «oficial» implicaria que a energia cinética do satélite fosse nula, o que é incompatível com a situação de satélite em órbita que o enunciado explicita.

Problema do balão

O enunciado do problema III.1 era o seguinte:

«1. Num autocarro que transporta alunos para uma Escola, um deles prende por um fio, ao encosto de um dos bancos, um balão de massa desprezável e volume V, cheio de um gás mais leve que o ar. Em dado momento, repara que o fio deixa de estar vertical, afastando-se dele no sentido do movimento, de modo a formar um ângulo de 45° com aquela direcção.

1.1 Indique, justificando, se o condutor acelerou ou travou nesse momento.

1.2 Calcule a grandeza da aceleração, sabendo que as massas volúmicas do ar e do gás no balão são, respectivamente, $\rho = 1{,}293\ kg/m^3$ e $\rho' = 1{,}00\ Kg/m^3$».

No que se refere ao enunciado, constata-se que são utilizados dois símbolos distintos para a mesma unidade de massa volúmica, reincidindo-se no erro de escrever Kg em vez de kg. Por outro lado, utiliza-se a expressão «gás mais leve que o ar», a qual seria substituída com vantagem por «gás menos denso que o ar».

Também aqui, porém, o caso diz respeito à discrepância entre a solução «oficial» e a solução correcta das questões 1.1 e 1.2.

Na solução «oficial» para a questão 1.1, pode ler-se: «Se o balão se afastou da vertical no sentido do movimento (foi para a frente) é porque o autocarro travou». Para a questão 1.2, na solução «oficial» chega-se à seguinte expressão para a grandeza da aceleração do autocarro:

$$a = \frac{\rho - \rho'}{\rho'}\, g = 2{,}93\ m/s^2$$

em que o significado dos símbolos é dado no enunciado.

A solução correcta para a questão 1.1 corresponderia à seguinte afirmação: «Se o balão se afastou da vertical no sentido do movimento (foi para a frente) é porque o autocarro acelerou». Para a questão 1.2, a solução correcta conduz ao seguinte resultado:

$$a = g = 10\ m/s^2.$$

No que se segue, justifica-se sucintamente a solução correcta.

Consideremos um referencial cartesiano OXY, com origem no ponto de fixação do balão, cujos vectores unitários são $\mathbf{u}_x$ e $\mathbf{u}_y$, coincidindo $\mathbf{u}_y$ com a vertical do lugar e estando $\mathbf{u}_x$ contido no plano horizontal. Admitamos que a velocidade e a aceleração do autocarro têm a direcção e o sentido do vector unitário $\mathbf{u}_x$ (cf. figura).

No referencial do autocarro, as forças aplicadas ao balão, que se consideram em equilíbrio, são as cinco seguintes:

1. Peso do gás do balão:

$$\mathbf{P} = -\rho'\ V\ g\ \mathbf{u}_y$$

A velocidade e a aceleração do autocarro têm a direcção e o sentido do eixo OX, por hipótese. À direita, em cima, estão representadas as forças aplicadas ao balão. O balão inclina-se para a frente, no sentido da aceleração do autocarro.

2. Impulsão devida ao campo gravítico, associada à diferença de pressão entre a parte inferior e a parte superior do balão (a pressão é maior na parte inferior):

$$\mathbf{I}_{gr} = + \rho \ V \ g \ \mathbf{u}_y$$

3. Força de inércia:

$$\mathbf{F}_{in} = - \rho' \ V \ a \ \mathbf{u}_x$$

4. Impulsão devida ao campo de forças de inércia do ar, associada à diferença de pressão entre a parte de trás e a parte da frente do balão (1) (a pressão é maior na parte de trás):

$$\mathbf{I}_{in} = + \rho \ V \ a \ \mathbf{u}_x$$

5. Tensão do fio: **T**.

Considerando a fig., verifica-se o seguinte:

(a) O balão está para cima do eixo OX porque $|\mathbf{I}_{gr}| > |\mathbf{P}|$, dado que $\rho > \rho'$;

(b) O balão está para a direita do eixo OY porque $|\mathbf{I}_{in}| > |\mathbf{F}_{in}|$, pela mesma razão;

(c) O balão exerce sobre o fio uma força cujas componentes algébricas são ambas positivas.

Em consequência, conclui-se que o balão se inclina no sentido da aceleração do movimento do autocarro. Ou seja, o balão «foi para a frente» porque o autocarro acelerou.

No tocante à grandeza da aceleração do autocarro, dado que a inclinação do fio vale 45°, verifica-se que as componentes da força equilibrante de **T** são iguais:

$$|\mathbf{P} + \mathbf{I}_{gr}| = |\mathbf{F}_{in} + \mathbf{I}_{in}|$$

ou seja

$$(\rho - \rho') \ V \ g = (\rho - \rho') \ V \ a$$

donde

$$a = g = 10 \ m/s^2. \ (2)$$

(1) De notar que, quando o autocarro acelera, o ar tende a concentrar-se preferencialmente na parte de trás do veículo, onde, portanto, a pressão será maior.

(2) O leitor poderá reconhecer que, sendo uma aceleração a segundo $\mathbf{u}_x$ equivalente a um campo gravitacional $-a$ (segundo $\mathbf{u}_x$), o facto de o campo resultante equivalente estar dirigido segundo a bissectriz dos eixos implica $a = g$. Quanto à pressão no interior do autocarro a sua expressão será $p = p_0 - \rho \, g \, (x + y)$, com p_0 constante.

Conclusões

1. Verifica-se que houve falta de cuidado na elaboração do ponto em apreciação.
2. O Ministério forneceu instruções erradas para a correcção das questões II.2.1, III.1.1 e III.1.2.
3. Mais grave, porém, é o facto de o Ministério não ter reconhecido, ainda que alertado, que as soluções «oficiais» estavam erradas, tudo indicando que a análise dos recursos interpostos foi abusivamente feita numa base incorrecta.

BOLSAS DA DIVISÃO DE FÍSICA NUCLEAR E PARTÍCULAS

Com o objectivo de subsidiar a vinda e estadia em Portugal de cientistas estrangeiros das áreas de Física Nuclear e Partículas Elementares, a divisão técnica F.N.P. da S.P.F. promove anualmente um concurso público para a atribuição de bolsas.

Regulamento do concurso:

1 — Objectivo da(s) bolsa(s) — pagamento das despesas de estadia em Portugal de investigadores das áreas de Física Nuclear e Partículas Elementares por períodos mínimos de 1 mês.

2 — O quantitativo global da bolsa será fixado anualmente pela divisão F.N.P. de acordo com o rendimento do seu fundo próprio SPF/EPS. Desde já se considera que para 1986 a bolsa terá o valor global de Esc. 240 000$00, correspondente a 3 meses × 80 000$00 / mês.

3 — Podem concorrer os investigadores portugueses ou grupos de investigadores com trabalhos publicados nas áreas referidas anteriormente. As candidaturas ao concurso devem ser enviadas para:

Divisão de Física Nuclear e Partículas, SPF
Av. República, 37-4.°, 1000 Lisboa

Serão consideradas para o concurso de cada ano as candidaturas recebidas durante o ano anterior e até 15 de Janeiro do mesmo ano (*).

4 — A selecção das candidaturas será feita pelo coordenador e vogais da divisão F.N.P. e por um representante do Conselho Directivo da SPF, sendo o resultado divulgado até 31 de Janeiro.

5 — Na selecção das candidaturas serão tidos em conta os seguintes critérios:
   i) Curriculum *científico* do(s) proponente(s) e trabalho de investigação nas áreas a que respeita o concurso desenvolvido nos 3 anos anteriores;
   ii) Integração do cientista a convidar em projectos de investigações nacionais.

6 — Do processo de candidatura deve constar:
   a) Nome(s) do(s) proponente(s);
   b) Lista dos trabalhos científicos do(s) proponente(s) *publicados em revistas internacionais* nos últimos 3 anos;
   c) Nome ou nomes dos visitantes a convidar, indicando para cada um deles a instituição a que pertencem e a duração da sua estadia em Portugal;
   d) Descrição sumária do projecto de investigação em que se enquadra a visita;
   e) Breve curriculum do(s) cientista(s) a convidar.

7 — No final do ano deverá ser enviado à divisão F.N.P. da S.P.F. um relatório sobre a actividade desenvolvida durante a visita (**).

(*) O prazo do próximo concurso termina, assim, a 15 de Janeiro de 1986.

(**) Em 1985 foram atribudas bolsas a J. Carvalho Soares (D. Sink, Berlin, RFA), J. Dias de Deus (G. Rupp, Nejmegen, Holanda) e G. Castelo Branco (R. Peccei, DESY, Hamburgo, RFA).

OLIMPÍADAS DE FÍSICA

Com o presente trabalho concluiu-se a publicação das provas regionais organizadas pelas diferentes delegações da SPF (vide Gaz. Fis. **8**, 111, Julho 1985).

Delegação de Lisboa (Zona Sul)

A. Introdução

Ao publicar na Gazeta as provas teórico-experimentais do 9.° e do 11.° ano das 1.as Olimpíadas de Física realizadas no passado dia 15 de Junho não quisemos fazê-lo sem que fossem acompanhadas de:

cotações e alguns esclarecimentos sobre as provas; uma análise sumária de ítens; comentários dos júris; comentários dos alunos que participaram nas diferentes provas;

por julgarmos serem um contributo útil para a reflexão sobre as Olimpíadas com vista à preparação e realização das próximas.

B. Provas teórico-experimentais

9.° ano (75 + 75 min)

ACTIVIDADE 1: PILHAS E LÂMPADAS (*)

I PARTE

1. Dispõem de algum material em cima da mesa de trabalho. Com esse material vão executar o que é pedido nas questões 1, 3 e 4 da 1.ª parte. Em certos casos, o material está em excesso, mas poderá então servir para que dois membros da equipa possam experimentar, simultaneamente, duas tentativas de resposta.
   - 1.1 São capazes de fazer com que uma lâmpada se acenda usando apenas uma pilha e um fio (sem o cortar)? Façam o esquema respectivo.
   - 1.2 Têm outros processos de conseguir acender a lâmpada apenas com uma pilha e um fio (sem o cortar)? Façam o(s) esquema(s) respectivo(s).
2. Indiquem:
   - 2.1 Se a lâmpada tem ou não de estar contacto com a pilha para acender com um só fio.
   - 2.2 Que pontos da lâmpada devem ser ligados para que ela acenda.
   - 2.3 A que pontos da pilha deve ser ligada a lâmpada para que acenda.
   - 2.4 Uma regra para acender a lâmpada com um só fio.
3. São capazes de montar um circuito no qual uma lâmpada brilha mais do que outra? Esquematizem.
4. Conseguem montar um circuito, com mais de uma pilha, em que a lâmpada não acende? Esquematizem.

II PARTE

Nos esquemas incompletos desenhe os fios que farão com que cada lâmpada acenda.

(*) Adaptado, em parte, de «Elementary Science Study, Batteries and Bulbs», Educational Services Inc., Watertown, Ma., U.S.A.

Indique em quais dos esquemas acende a lâmpada, colocando um S naqueles que acendem e um N nos que não acendem.

ACTIVIDADE 2: TRABALHO EXPERIMENTAL

Dispõem, na vossa mesa de trabalho, do seguinte material:

duas roldanas; uma barra metálica; um corpo A; um suporte com respectiva base; um fio; nozes e ganchos de fixação; massas marcadas.

Pretende-se que:

1. Utilizem todo o material e indiquem os dados recolhidos e cálculos efectuados.
2. Efectuem a montagem de um sistema em equilíbrio que inclua simultaneamente: uma alavanca inter-resistente (atenção: não alterem a posição do fulcro que está situado a meio da barra); um corpo A suspenso de uma roldana móvel; uma roldana fixa cujo fio vai exercer a potência na alavanca; massas marcadas a servirem de resistência.
3. Representem esquematicamente o sistema.
4. Determinem o peso do corpo A. Não desprezem a massa das roldanas.

11.º ano (75 + 75 min)

ACTIVIDADE 1: TRABALHO EXPERIMENTAL

Dispõem, na vossa mesa de trabalho, do seguinte material:

um plano inclinado de madeira; um dinamómetro de mola em hélice; um cronómetro; uma régua graduada; um corpo C (cilindro de madeira com um gancho).

Para todos os dados e cálculos use o Sistema Internacional de Unidades.

1. Determinem, experimentalmente, as forças necessárias para:
   a) fazer subir o corpo ao longo do plano inclinado com velocidade praticamente constante;
   b) elevar o corpo verticalmente com velocidade praticamente constante.
2. Descrevam os processos utilizados nas determinações experimentais anteriores.
3. Calculem os valores dos trabalhos realizados nos dois percursos de subida até ao ponto mais alto do plano inclinado e analisem os resultados obtidos.
4. Considerar o movimento de subida do corpo no plano inclinado.
   4.1 Calculem o valor da reacção normal do plano inclinado sobre o corpo.
   4.2 Representem todas as forças que actuam no corpo quando ele sobe o plano com velocidade constante.
5. Repitam a experiência de fazer subir o corpo ao longo do plano inclinado com velocidade praticamente constante, determinado o valor desta velocidade. Descrevam o processo utilizado.
6. Partindo do valor da velocidade obtido na alínea anterior, calculem a potência dinâmica da força que exerceram para fazer subir o corpo com essa velocidade.

ACTIVIDADE 2: «CAIXA MISTÉRIO»

O trabalho consiste em investigar as propriedades eléctricas da caixa (*) com a ajuda do material fornecido (uma pilha e dois fios condutores) e da vossa imaginação!

Devem registar na folha de resposta, uma a uma, todas as conclusões que forem alcançando acerca das ligações existentes na caixa.

No final, devem ser capazes de fazer um esquema da montagem que está escondida no interior da caixa.

C. Cotações e alguns esclarecimentos sobre as provas teórico-experimentais

Os júris atribuíram as seguintes cotações:

9.º ano — Actividade 1 — **200 pontos**

I parte — **120 pontos**

(1.1 **15**, 1.2 **20**, 2.1 **5**, 2.2 **5**, 2.3 **5**, 2.4 **10**, 3 **30**, 4 **30**)

II parte — **80 pontos** (4 × 20)

9.º ano — Actividade 2 — **200 pontos**

(Representação esquemática **100**

Determinação do peso do corpo **100**)

11.º ano — Actividade 1 — **200 pontos**

(1 **15+15**, 2 **20**, 3 **15+15+15**, 4.1 **20**, 4.2 **30**, 5 **25**, 6 **30**)

11.º ano — Actividade 2 — **200 pontos**

O júri utilizou sempre, para seriar as provas, além da cotação atrás referida, uma alternativa que consitia em determinar a percentagem de respostas correctas em relação ao número total de perguntas. Verificou-se que independentemente do sistema utilizado a seriação final era sempre a mesma.

Segue-se o esquema das ligações existentes no interior da «caixa mistério».

É de salientar que para não haver disparidades entre as diversas equipas as caixas eram rigorosamente iguais.

D. Análise de Itens

Numa primeira abordagem tentámos fazer uma análise sumária das provas teórico-experimentais do 9.º e 11.º anos, a fim de permitir uma reflexão sobre a adequação de cada actividade e uma orientação para próximas provas.

Comentário (9.º ano): Em relação à Actividade 1 a análise de ítens revela que as perguntas 1.1, 2.1 e 4 foram de realização demasiado fácil para todas as equipas.

As perguntas 1.2, 2.2, 2.3, 2.4 e 3 podem ser consideradas como de dificuldade média.

Quanto ao índice de descriminação as perguntas 2.1. e 4 revelam um índice de descriminação nulo e não ajudaram, portanto, a distinguir as melhores equipas.

A pergunta 1.1, assim como a 2.3, apresenta um índice de descriminação negativo o que nos leva a pensar na necessidade de reflectirmos sobre o modo como deveria ser reformulada.

As perguntas 1.2, 2.2 e 2.4 apresentam um índice de descriminação positivo e superior ou igual a 0,5 permitindo-nos distinguir de forma adequada as melhores equipas.

A pergunta 3 tem um índice de descriminação positivo mas baixo (0,2) o que sugere a necessidade de uma reformulação.

A II Parte da Actividade 1 revela ter sido considerada difícil e possui um índice de descriminação baixo, embora aceitável.

Em resumo pelo menos metade das perguntas têm um índice de descriminação positivo e razoável permitindo-nos assim distinguir de forma adequada as melhores equipas.

Na Actividade 2 qualquer uma das perguntas não foi considerada demasiado difícil revelando, no entanto, um índice de descriminação que se pode considerar satisfatório.

(*) Cada caixa tinha visíveis 3 terminais e 2 pequenas lâmpadas, *iguais*. Em princípio as caixas distribuídas às diferentes equipas *podiam* não ser idênticas; abrir a caixa implicaria, naturalmente, a desclassificação da equipa.

9.º ano

PROVA TEÓRICO-EXPERIMENTAL

ESCOLA	PERGUNTAS										
	ACTIVIDADE 1									ACTIVIDADE 2	
	1ª parte								2ª parte	A	B
	1.1	1.2	2.1	2.2	2.3	2.4	3	4			
A	+	0	+	–	+	–	–	+	0	0	+
B	+	0	+	–	+	+	–	+	0	+	+
C	0	0	+	+	+	+	+	+	+	0	–
D	+	+	+	0	0	+	0	+	+	+	+
E	+	0	+	+	+	+	–	+	0	+	+
F	+	0	+	0	0	–	+	+	+	+	+
G	+	+	+	0	+	+	–	+	0	+	+
H	+	0	+	0	+	–	+	+	0	+	+
I	+	+	+	0	+	0	+	+	0	0	0
J	+	0	+	–	+	0	+	+	0	+	+
L	+	–	+	+	+	+	+	+	0	+	+
M	+	+	+	+	0	+	+	+	0	+	+
N	+	+	+	+	+	+	–	+	0	+	+
Nº total de respostas correctas	12	5	13	5	10	8	7	13	3	10	11
Nº total de respostas incorrectas	0	1	0	3	0	3	5	0	0	0	1
Nº total de respostas parcialmente correctas	1	7	0	5	3	2	1	0	10	3	1
índice de dificuldade	0,9	0,3	1	0,4	0,8	0,6	0,6	1	0,3	0,8	0,8
índice de descriminação	-0,2	0,8	0	0,7	-0,2	0,5	0,2	0	0,2	0,5	0,3

+ indica resposta correcta, — incorrecta, 0 parcialmente correcta.

Comentário (11.º ano): Em relação à Actividade 1 é de salientar que as perguntas 2, 4.1, 5 e 6 foram de dificuldade média para os participantes enquanto que as perguntas 3 e 4.2 foram demasiado difíceis.

As perguntas 2 e 4.1, apesar de terem sido consideradas de dificuldade média também não contribuíram para distinguir as equipas possuindo melhores conhecimentos.

A pergunta 6 necessitaria de ser reformulada pois apresenta um índice de descriminação negativo.

A pergunta 3, considerada difícil pelos participantes, apresenta um índice de descriminação baixo o que sugere a necessidade de ser reexaminada já que tanto as equipas melhores como as outras tiveram dificuldade em completar a sua execução.

As perguntas 4.2 e 5 contribuíram de forma eficaz para distinguir as melhores equipas.

Podemos afirmar que a Actividade 2 é uma actividade de dificuldade média com um índice máximo de descriminação. Só acertaram as equipas que obtiveram melhores resultados globais.

E. Comentários dos júris

As equipas podiam participar num dos tipos de provas mencionados no regulamento (ou sugerir outro). Como é óbvio só se realizaria um determinado tipo de prova se houvesse número de equipas inscritas que o justificasse. Verificou-se que os temas escolhidos pelos alunos foram:

11.º ano

PROVA TEÓRICO-EXPERIMENTAL

ESCOLA	ACTIVIDADE 1							ACTIVIDADE 2
	1	2	3	4.1	4.2	5	6	
A	+	0	0	+	0	–	+	–
B	+	+	0	+	–	0	+	–
C	+	+	+	+	0	+	+	–
D	+	+	0	+	0	+	+	–
E	+	+	0	+	–	+	+	–
F	+	–	–	0	0	0	–	+
G	+	+	0	0	+	+	0	+
H	+	+	0	+	+	+	+	+
I	+	0	0	+	0	–	–	+
J	+	+	0	+	0	+	+	+
L	+	+	–	–	0	0	–	0
Nº total de respostas correctas	11	8	1	8	2	6	7	5
Nº total de respostas incorrectas	0	1	2	1	2	2	3	5
Nº total de respostas parcialmente correctas	0	2	8	2	7	3	1	1
índice de dificuldade	1	0,7	0,1	0,7	0,2	0,6	0,6	0,5
índice de descriminação	0	0,0	0,2	0,0	0,4	0,4	-0,2	1

+ indica resposta correcta, — incorrecta, 0 parcialmente correcta.

audiovisuais; cartazes e/ou painéis; programa de computador sobre tema de Física;
em que 73 % escolheu o último tema.

Sendo um dos objectivos das Olimpíadas incentivar o interesse pela Física conseguiram estas provas, pelas suas características, que participassem muitos alunos que de um modo mais formal não o fariam e não se empenhariam tanto. Esta foi a opinião expressa por alguns membros dos júris e pelos professores que acompanharam mais de perto estas provas.

Todas as provas foram consideradas pelos júris bastante criativas e interessantes.

Considera-se, no entanto, que devido à sua especificidade a prova de computador sobre um tema de Física merece uma análise detalhada sobre as condições de inscrição, de prestação das provas e do próprio conteúdo das mesmas, a fim de se definirem, desde já, normas mais rígidas para esse tipo de provas.

F. **Comentários dos alunos**

Durante a realização das provas tentou-se obter por escrito e de um modo informal o maior número possível de sugestões e críticas.

Duma primeira leitura ressaltam os seguintes aspectos:

boa organização; desejo de virem a ser um espaço de convívio mais amplo; necessidade de informações prévias mais detalhadas;

mas acima de tudo:
uma experiência interessante e agradável, com um carácter prático e diferente do habitual; a constatação de ser um momento privilegiado de contacto entre jovens das mesmas áreas escolares e de diferentes locais do país; o desejo sempre explícito de que a experiência se repita ou, como escreveu alguém: «Continuem e terão o nosso apoio!»

Noticiário SPF

Delegação Regional de Coimbra

● À semelhança do que tem sido feito em anos anteriores, pretende a Delegação Regional de Coimbra da SPF prestar a sua colaboração e apoio a professores do Ensino Secundário, nomeadamente através da realização, nas respectivas Escolas, de palestras, conferências, mesas-redondas, em que participem professores e/ou alunos.

Nesse sentido, pedimos que nos sejam enviadas até 15 de Dezembro sugestões de temas a tratar, com indicação do grupo a que se destinam e de algumas datas possíveis.

● Pela primeira vez, e a título experimental, vai esta Delegação criar um «Serviço de Correspondência», aberto a todos os sócios, através do qual cada um possa apresentar dúvidas ou pedir esclarecimentos sobre questões de Física.

Aguardamos, a partir de 1 de Janeiro de 1986, os contactos de todos os interessados.

Delegação Regional de Lisboa

Cursos de actualização

Com o apoio financeiro da Fundação Calouste Gunbenkian, teve lugar de 1 a 5 de Julho último, um curso de actualização para professores do ensino secundário sobre o tema Trabalho e Energia. O curso constou de sessões de exposição teórica seguidas de discussões, na parte da manhã, e de sessões de trabalhos práticos na parte da tarde; decorreu no Departamento de Física da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. O curso, que teve a frequência da mais de 20 professores, foi regido pelo Prof. J. Marat Mendes da Universidade Nova de Lisboa e pelo Dr. Jorge A. Valadares do Colégio Militar e contou ainda com a colaboração do Eng.º Físico Carlos Dias, assistente da U. N. L.

Decorreu na Faculdade de Ciências da Universidade Clássica de Lisboa de 30 de Setembro a 4 de Outubro de 1985, um curso de actualização em Estática, para professores do ensino secundário. Foi regido pela Prof. Teresa Gonçalves e pelo Dr. Vítor Ferreira (Esc. Sec. Machado de Castro), incluindo sessões teóricas e teórico-práticas bem como actividades experimentais.

Situação das quotas dos sócios

Dado que o processamento das quotas dos sócios da Delegação Regional de Lisboa está a ser feito por computador e a sua actualização é feita todos os três meses, antes do envio da Gazeta de Física, podemos informar qual a situação do pagamento de quotas em 31 de Julho de 1985.

Sócios com as quotas pagas até 1985	345
Sócios com as quotas pagas até 1984	230
Sócios com as quotas pagas até 1983	57
Sócios com as quotas pagas até 1982	61
Sócios com as quotas pagas até 1981	40
Sócios com quotas mais atrasadas	159
TOTAL DE SÓCIOS	892

A todos os sócios com as quotas em dia ou em atraso até 1982 tem sido enviada a Gazeta de Física com periodicidade. Àqueles que têm as quotas em atraso para lá de 1982 enviaremos todos os números publicados, desde o início de 1985, sempre que nos enviem o quantitativo correspondente às quotas em atraso.

A próxima actualização processar-se-á no mês de Novembro a fim de podermos incluir a situação dos sócios da Delegação no relatório anual a publicar no início de 1986.

Palestras sobre temas de actualidade

A Delegação Regional de Lisboa, na sequência do programa que organizou nos primeiros meses de 1985, está a planificar um conjunto de palestras na sede da Sociedade para os últimos meses de 1985 e para o ano de 1986. Aproveita-se esta oportunidade para alertar os sócios para o cartaz que será oportunamente divulgado com os temas e datas e

solicita-se ainda sugestões sobre assuntos que os sócios queiram ver debatidos.

Delegação Regional do Porto

● A Delegação do Porto anuncia as seguintes palestras (14 ½, Anfiteatro de Física da Faculdade de Ciências do Porto):

«O Efeito Hall Quantificado — O Prémio Nobel de Física de 1985» (João Lopes dos Santos, 11 de Dezembro de 1985).

«Óptica experimental no Ensino Secundário» (Flora Pedrosa e Isabel Magalhães, 8 de Janeiro de 1986).

«O centenário de Niels Bohr» (J. Moreira Araújo, 15 de Janeiro de 1986).

● Os cursos temáticos sobre matérias do ensino secundário e sobre aplicação de microcomputadores no ensino, previstos para o corrente ano lectivo (Gaz. Fis. **8**, Abril 85, 80), senão anunciados oportunamente.

(n) nucleon

Av. Columbano B. Pinheiro, 57-A Tel. 724748 LISBOA
Av. Sá da Bandeira, 62 Tel. 33778 COIMBRA

FIRMA ESPECIALIZADA HÁ MAIS DE 30 ANOS EM FORNECIMENTOS A TODOS OS ESTABELECIMENTOS ESCOLARES

Principais representadas:

P. HARRIS — Equipamento Didáctico

W. P. A. - WALDEN PRODUCTS — Equipamento para Laboratórios de Física e Química

UNILAB — Equipamento para Ensino de Electricidade e Electrónica

SWIFT — Microscópios

CIRRUS — Sonómetros

G. BOSCH — Balanças Eléctricas e Electrónicas

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

Periocidade — 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)

COMERCIAL LABORUM

MATERIAL PARA LABORATÓRIO-INDÚSTRIA, LDA.

- *Aparelhagem de Electroóptica*
- *Bombas de Vácuo*
- *Equipamentos de Criogenia*
- *Osciloscópios e Multímetros*
- *Computadores e Impressoras*
- *Mesas de Balanças e outro mobiliário*

CONTACTE-NOS:

Rua da Restauração, 83-2.º • 4000 PORTO
Telefs. 695767-699382 - Telex 23156

Rua Arco do Carvalhão, 59-6.º Dto. • 1000 LISBOA
Telef. 659793

Edwards

VENDIDO POR:
MENDES DE ALMEIDA, LDA.

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

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

CRIOLAB

EQUIPAMENTO CRIOGÉNICO
E DE LABORATÓRIO, LDA.

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

GAZETA DE FISICA

SOCIEDADE PORTUGUESA DE FÍSICA

VOL. 8 • FASC. 4 • OUTUBRO 1985

SUMÁRIO

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 126
Jorge Dias de Deus

Conferência Girep - 86 135

Gerador de funções 136
Valtrudes S. Oliveira, J. Sousa Lopes

Difracção na Matéria Condensada - II 140
M. Margarida R. R. Costa

Paradoxo da vara e do celeiro e invariância relativista 147
A. A. Gonçalves da Silva, P. M. Araújo Sá

Ponto de Física do 12.º ano - Soluções «oficiais» e soluções correctas 149
C. Ramalho Carlos, Eduardo Martinho, Jorge Valadares

Bolsas da Divisão de Física Nuclear e Partículas 152

Olimpíadas de Física 153

Noticiário da Sociedade Portuguesa de Física 158