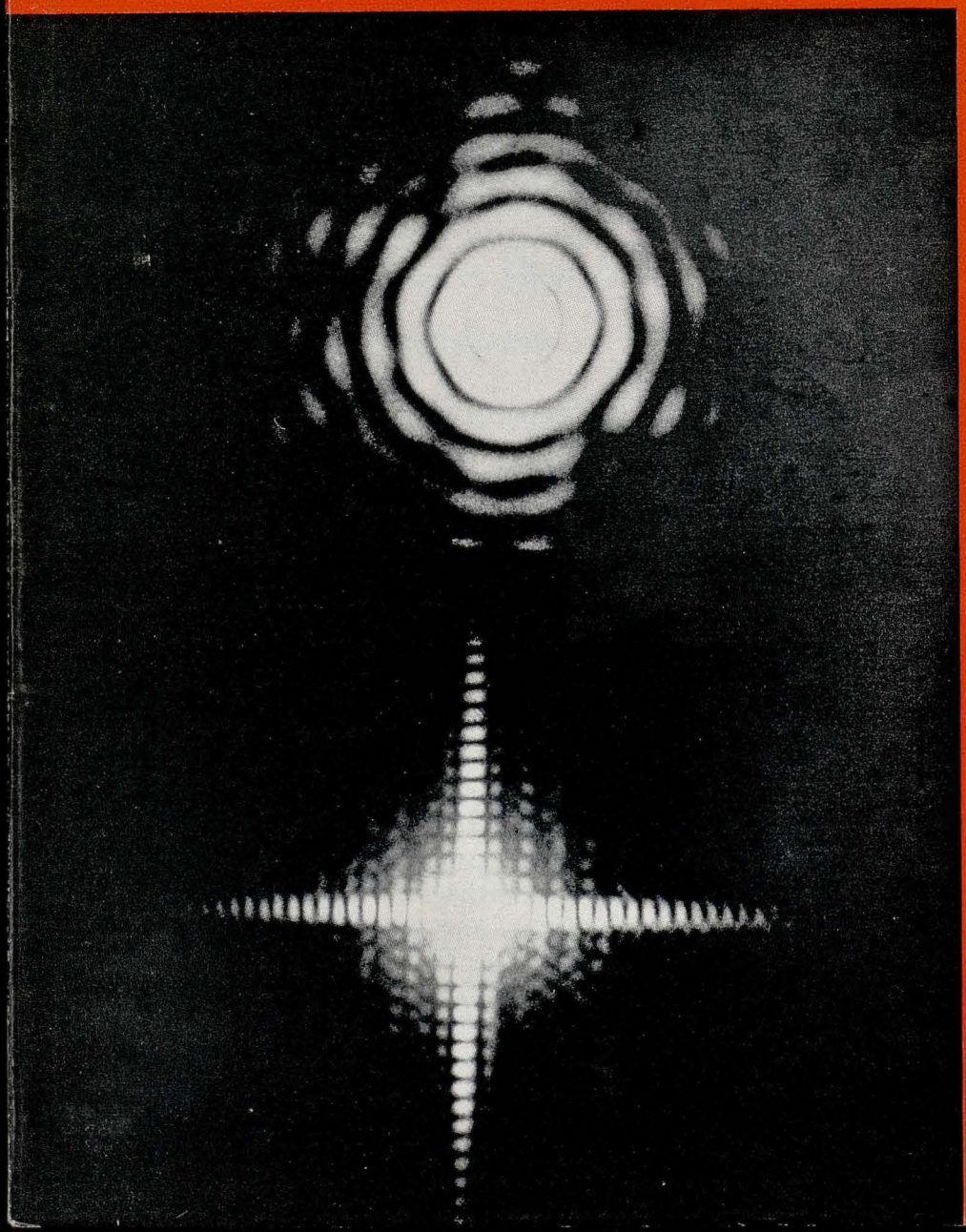
GAZETA DE FISICA

REVISTA DOS ESTUDANTES DE FÍSICA
E DOS FÍSICOS PORTUGUESES



VOL. V, FASC. 7
DEZEMBRO 1972

Figuras de difracção obtidas com um feixe laser

(Ver contra-capa)

VOL. V

FASC. 7

DEZEMBRO — 1972

GAZETA DE FÍSICA

Fundador: ARMANDO GIBERT

PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL DESTINADA AOS ESTUDANTES DE FÍSICA E AOS FÍSICOS PORTUGUESES

SUMÁRIO

«ESCA, a new experimental approach to understanding of chemistry», *by E. Bodenstedt* . . 201

Experiências escolares com o osciloscópio de raios catódicos em que não se utiliza a base de tempo (continuação dos números 5 e 6), *por Rómulo de Carvalho* 211

O uso do laser em Telecomunicações — Moduladores electroópticos, *por M. A. R. P. de Barros* 220

A Física fora do Laboratório — Convite ao leitor, *por C. Marciano* 230

Noticiário 231

COMISSÃO DE REDACÇÃO: Rómulo de Carvalho — Lídia Salgueiro — J. Gomes Ferreira — F. Bragança Gil — J. Sousa Lopes — Maria Teresa Gonçalves — Frederico Gama Carvalho — Rui Namorado Rosa — José C. Soares — João Bessa e Sousa — Mário Trigueiros

PROPRIEDADE E EDIÇÃO: GAZETA DE MATEMÁTICA, LDA. * CORRESPONDÊNCIA: GAZETA DE FÍSICA — LABORATÓRIO DE FÍSICA DA FACULDADE DE CIÊNCIAS DE LISBOA — RUA DA ESCOLA POLITÉCNICA — LISBOA * NÚMERO AVULSO: ESC. 15$00 * ASSINATURA DE 3 NÚMEROS: ESC. 45$00 (À COBRANÇA ESC. 50$00); PARA ESTUDANTES, ESC. 30$00 (À COBRANÇA ESC. 35$00)

Publicação subsidiada pelo Instituto de Alta Cultura e pela Junta de Energia Nuclear

Composto e impresso na Tipografia Matemática Lda. — Rua do Diário de Notícias, 131-1.º-Esq. — Lisboa

GAZETA DE FÍSICA

Vol. V, Fasc. 7 Dezembro de 1972

«ESCA, a new experimental approach to understanding of chemistry»(*)

by E. Bodenstedt

(Institut für Strahlen und Kernphysik der Universität Bonn)

Refere-se a importância que a ESCA tem no estudo de estruturas químicas e expõe-se resumidamente o fundamento do método ESCA, apresentando-se espectros do óxido de magnésio, cloreto de sódio, etc., obtidos por este processo.

Estudam-se algumas aplicações do método ESCA, com particular relevância para a investigação da natureza das ligações químicas, mostrando-se a partir da equação de Schrödinger que as riscas do espectro ESCA, correspondentes a órbitas electrónicas internas, são muito sensíveis à natureza dessa ligação.

Conclui-se fazendo referência a possíveis desenvolvimentos tecnológicos da ESCA.

Since I am a physicist and the title of my talk contains the word chemistry, I should like to start with some general remarks about chemistry. I realized that the students of physics in our physics department usually hate chemistry or, at least, are afraid of chemistry, and I should like to analyze why this is the case.

I believe that the reason is the fact that still today a large fraction of chemical research is done in the chemistry laboratories just by mixing together some strange materials in the oldfashioned way and observing what happens. I oversimplify now, but one has indeed accumulated a tremendous knowledge about chemical reactions and compounds and their physical and chemical properties in a completely empirical way.

Modern physics and modern quantum mechanics, especially, has lead to an understanding of the atom and to a complete understanding of the chemical bond; in principle everything about chemistry could be calculated and predicted now; only the complexity of the subject is the reason, why up to now «computer chemistry» played only a minor role. The exact calculation of the electronic orbitals in large molecules and the derivation of all physical and chemical properties of these molecules from the shape of these orbitals is still an unsolved computer problem.

In this situation the direct experimen-

(*) Conferência de seminário pronunciada no Laboratório de Física da Universidade de Lisboa.

tal investigation of electronic orbitals has a tremendous importance.

A few tools are well-known, the most important ones being electron spin resonance (ESR) and Mössbauer spectroscopy. ESCA is quite a new additional tool for microscopic investigations which promisses to contribute a lot to the understanding of chemical structures in solid or gaseous substancies.

Let me start with a short description of the principle of ESCA. The word ESCA is the abbreviation of *e*lectron *s*pectroscopy for *c*hemical *a*nalysis. This name is somewhat misleading because it neither characterizes the experimental technique sufficiently nor describes the most important field of applications. The principle is explained schematically in fig. 1. The characteristic radiation of an X-ray tube hits a probe and photo-absorp-

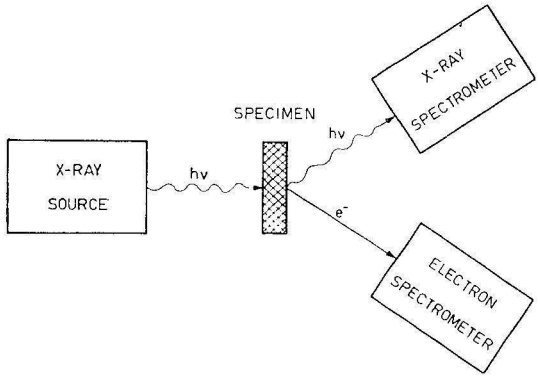


Fig. 1 — Schematic diagram illustrating the principles of X-ray spectroscopy and ESCA.

tion processes take place. The X-ray fluorescence as well as X-ray absorption spectra can be investigated by the well-known X-ray spectroscopy techniques. A similar information could be obtained, however, by observing the energy spectra of the primarily emitted photoelectrons. The kinetic energy of the photoelectrons is determined by the photoelectric equation:

$$E_{kin}(e^-) = h \cdot \nu - BE(e^-)$$

The binding energies BE of electrons are shown schematically in form of an X-ray level scheme in fig. 2.

The discussion which we made here is more than fifty years old. The scien-

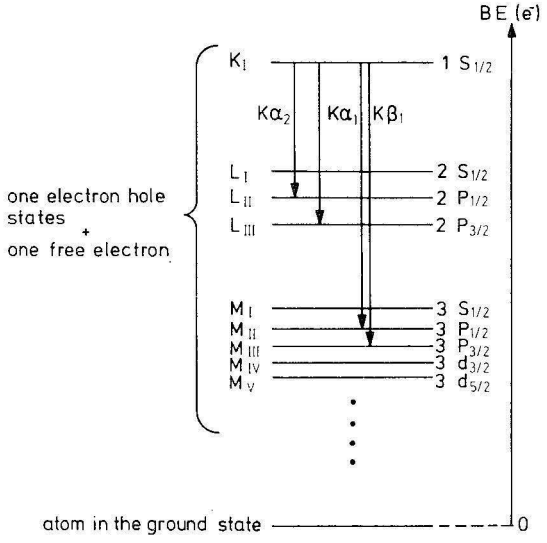


Fig. 2 — X-ray level scheme.

tific world believed for about fifty years, however, that only the X-ray spectroscopy is a valuable method whereas the photoelectron spectroscopy seemed not to be feasible because of inelastic scattering processes of the electrons on their way through the target. The nuclear physicists have developped electron spectroscopy especially for the study of the energies of conversion electrons. These conversion lines show always a long tail on the low energy side, which is produced by energy losses of the electrons by many excitation and scattering processes in the source material. The cross-section for these processes is so large that a tail is observed even if extremely thin sources are used. Fig. 3a shows as an example a conversion electron spectrum, which was measured in our laboratory about ten years ago in the decay of lutetium 177 m; the spectrum was taken with a

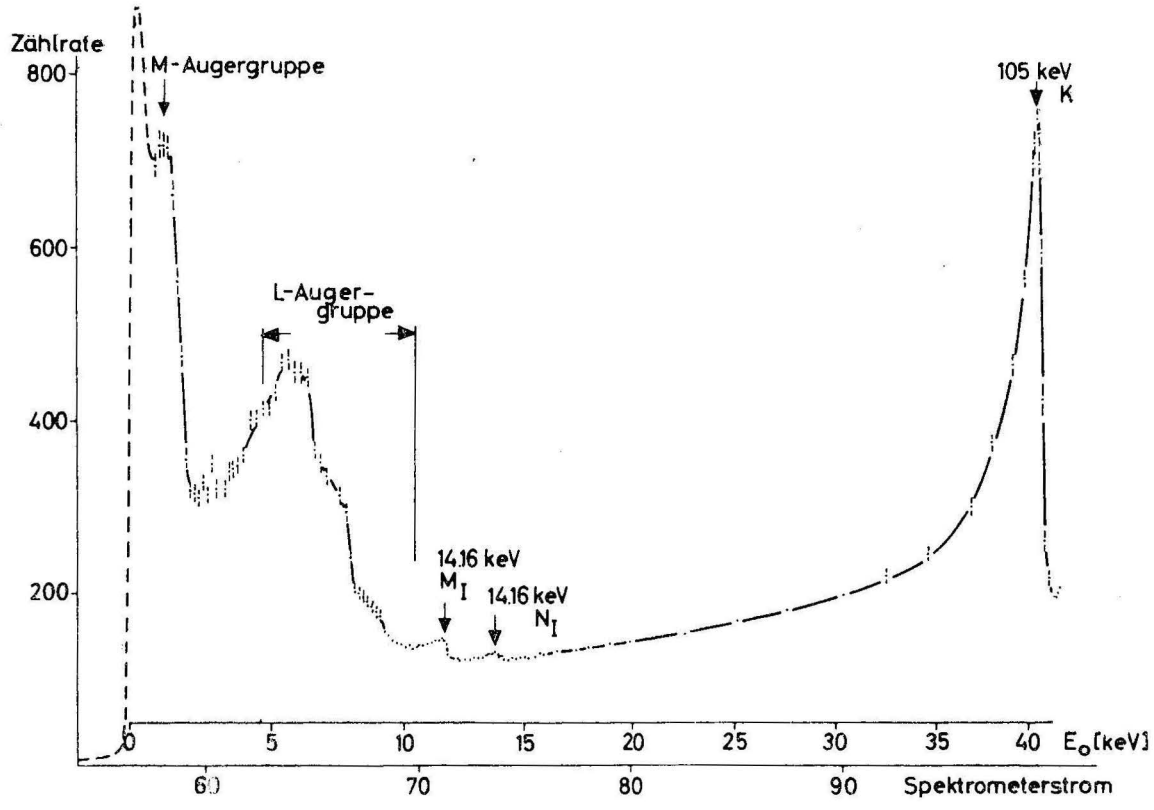


Fig. 3a — Conversion electron spectrum of ^{177m}Lu between 0 and 40 keV. This figure is taken from ref. 1.

double focussing magnetic spectrometer. The tail on the left side of the 105 keV K-conversion line is typical. Fig. 3a shows in addition two interesting low energy conversion lines between 10 and 15 keV. They are shown on a larger scale in fig. 3b. When we had observed these spectra we had some discussions about the shape of these lines. Especially for the 14.16 keV M_1-line we observed that the last points on the right-hand side of the peak were higher than expected. If the resolution of our spectrometer would have been a little better we probably would have realized that there was a sharp extra-line of electrons which had not lost any energy when passing through the source material.

These extra lines, the so called ESCA-lines, were first observed by K. Siegbahn and coworkers in Uppsala. This group had developped especially high resolution spectrometers (2) (3) for low energy elec-

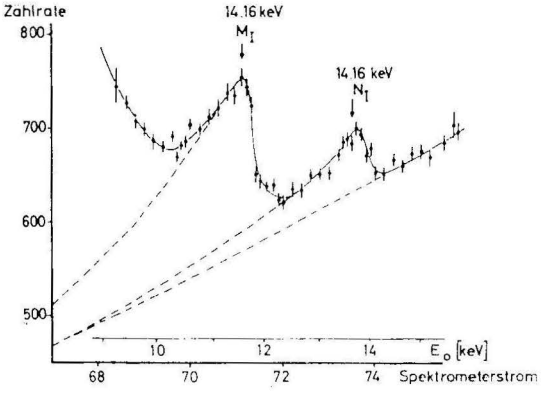


Fig. 3b — Conversion lines between 10 and 15 keV of the spectrum of fig. 3a in an enlarged scale.

trons. When they studied photoelectrons, produced by low energy X-rays they found immediately in addition to the usual broad lines extremely sharp electron lines which could only be due to electrons which had not lost any energy. The existence of these ESCA-lines is understood by quantum mechanics, as the mechanism of energy losses in solid material consists exclusively of quantum processes. Since only finite amounts of energy can be transferred to other electrons of the lattice, there must be a finite probability always for photoelectrons leaving the probe without any energy transfer.

A typical example is shown in fig. 4. A magnesium oxide target is bombarded by the Cu K_α-emission line. At the right corner of the figure one of the ESCA--lines is plotted at a larger scale. This plot shows that the width of the line is only between 1 and 2 electron volts. This width is still larger than the natural line width of the cupper K_α-emission line; on the other hand this width is already small enough to make precise measurements of the binding energies of electrons possible, even in outer orbits of atoms or molecules.

In the following figures a few examples are shown: fig. 5 demonstrates the typical conduction band structure of metals. In this case the target is gold and the photoelectrons are produced by the 1,2536 keV magnesium K_α-line. The conduction band has a width of about 10 eV and consists of 5 d and 6 s electron orbitals. It must be mentioned that it was very difficult before, to get experimental information about the exact position and structure of conduction bands. Precise ESCA-measurements make it possible, now, to derive also the density of states

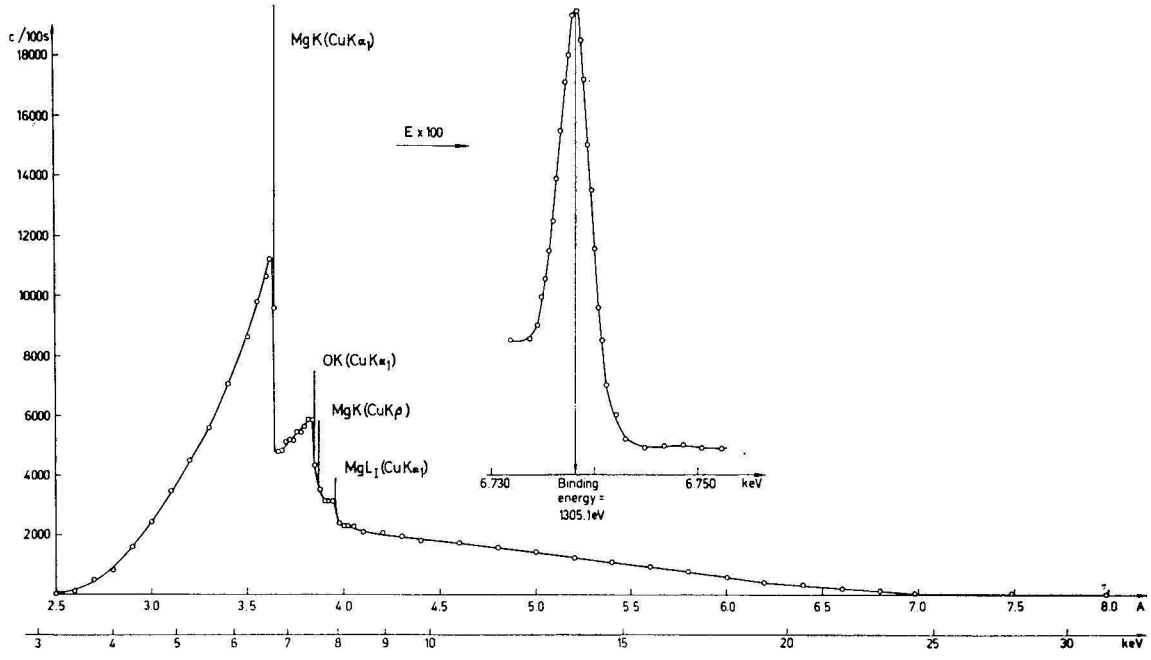


Fig. 4 — Electron spectrum obtained from magnesium oxide with copper X-radiation. This figure is taken from ref. 4.

within the conduction bands. This is quite an important information for the understanding of the structure of metals and the metallic conductivity.

A second example shows a typical ESCA-spectrum for an ionic crystal, i. e. NaCl (see fig. 6). The electron configuration of atomic sodium and chlorine are:

Na: $KL(3s)^1$

Cl: $KL(3s)^2(3p)^5$.

In the ionic crystal NaCl the single (3 s)-electron of sodium is split off and fills the 3 p-shell of chlorine. The measured ESCA-spectrum shows the 3 p- and 3 s-orbits of chlorine and the 2 p-orbit of sodium No 3 s-line of sodium can be detected.

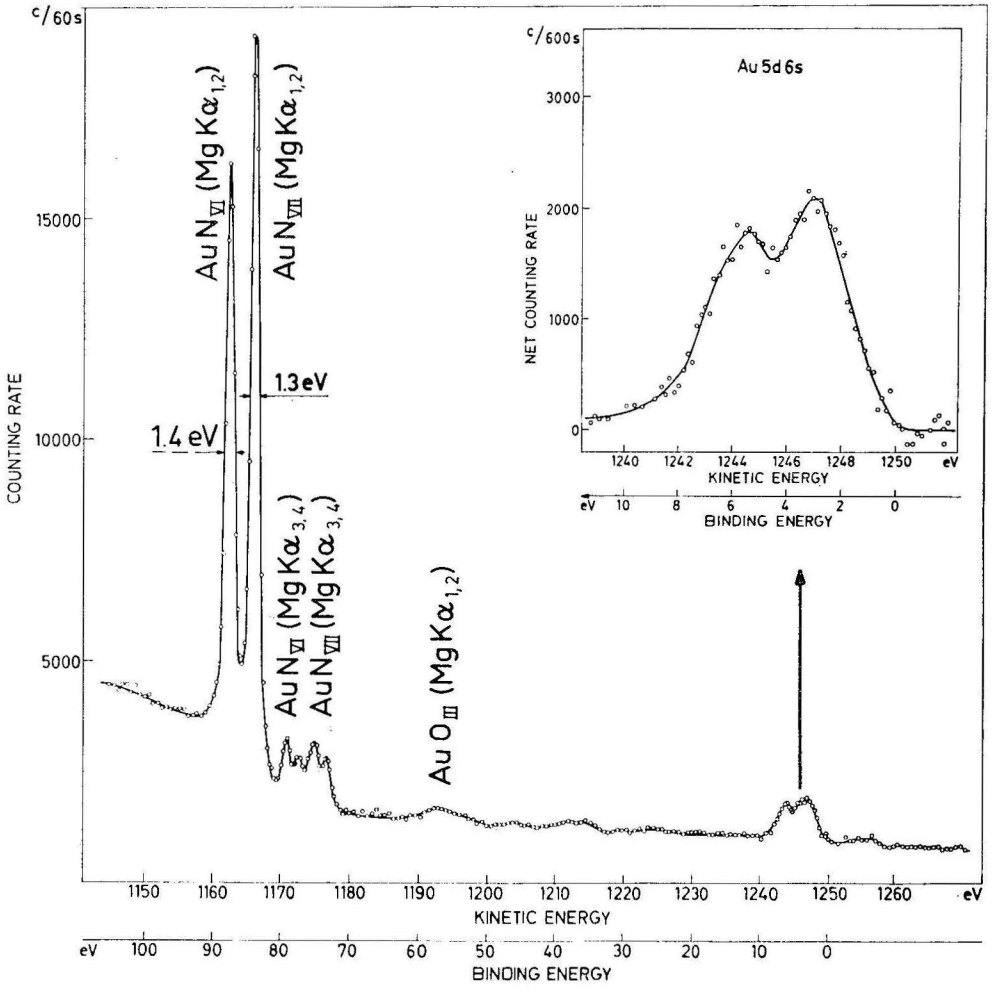


Fig. 5 — ESCA-spectrum of the outer levels of gold. At the right corner the conduction band is shown separately at an enlarged scale. This figure is taken from ref. 4.

For purpose of chemical analysis the characteristic binding energies of the K-electrons can be used. Fig. 7 shows, as an example, the K-lines of the elements between Li and F, measured by use of the aluminum K_α-radiation; the nice separation of these intense lines allows an

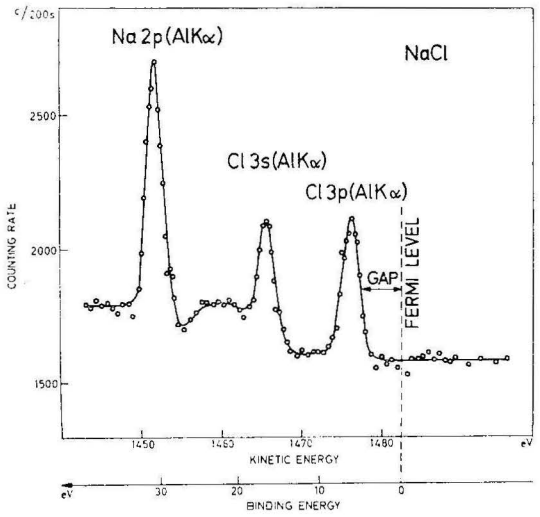


Fig. 6 — ESCA-spectrum of NaCl by use of the Al K_α-radiation. This figure is taken from ref. 4.

easy and reliable complete chemical analysis of even quite complex substances. One must take into account, however, that the ESCA-lines are emitted only from the surface layer of the target up to an depth of about 20 Å. For solid probes it is therefore essential to work in ultra-high vacuum and to apply very careful cleaning procedures in order to get rid of all impurities on the surface of the probe. If sufficient care is applied in the preparation of the target, the ESCA-method is indeed a unique method for chemical analysis. Fig. 8 shows, e. g., ESCA-lines of cobalt observed in a target of vitamin $B_{1,2}$. One molecule of this vitamin contains 1 cobalt atom within 180 other atoms (C, H, N, and O).

The most interesting applications of ESCA for chemical studies is the investigation of the nature of chemical bonds. Let us discuss the principal ideas in the example of the chemical bonds of iodine in the molecules NaI and $NaIO_3$. In fig. 9 the electron configurations of the three atoms is shown and the chemical structure is symbolized. Never a chemical bond is absolutely pure heteropolar or pure covalent, the truth is always between the two extrema.

In the first case of NaI the nature of the bond is rather pure heteropolar. The 3 s-electron of sodium is transferred to

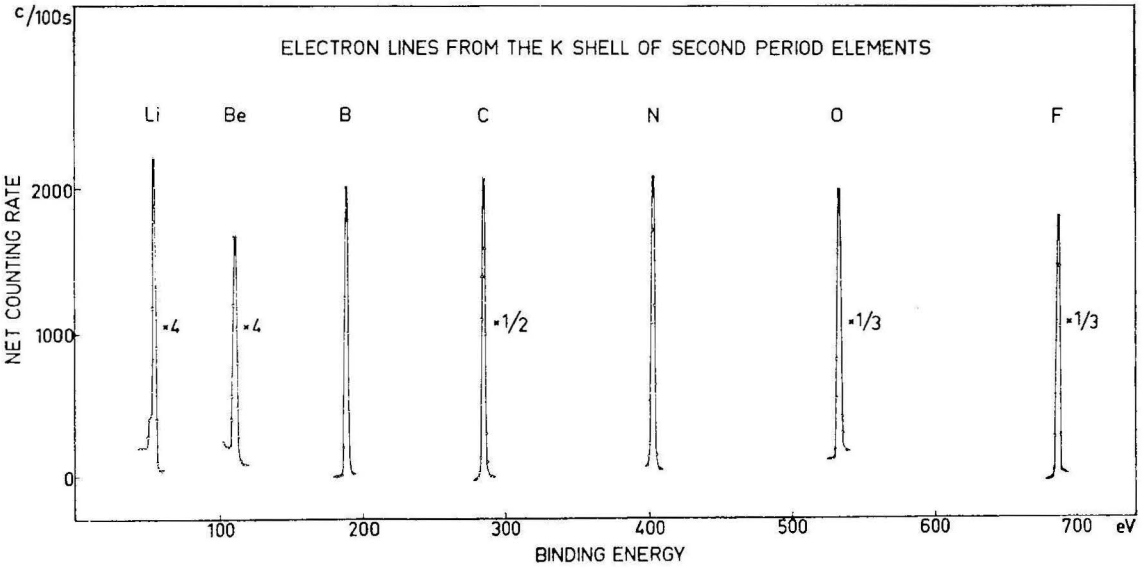


Fig. 7 — K-shell electron lines of light elements produced by the Al K_α-radiation. The figure is taken from ref. 4.

the iodine atom and there it fills the 5 p shell. By this way two ions with electron shells like those of nobel gases are produced. The chemical binding forces are produced by the coulomb attraction between a single positive charge of the sodium ion and a single negative charge of the iodine ion.

2 p-shells; this would mean a heteropolar bond between iodine and the oxygen atoms. The other possibility is that these six electrons participate in both atomic shells, i. e. in the iodine (5p)-orbit and the oxygen (2 p)-orbit; in the latter case one would call the bond between the iodine and the three oxygen atoms covalent.

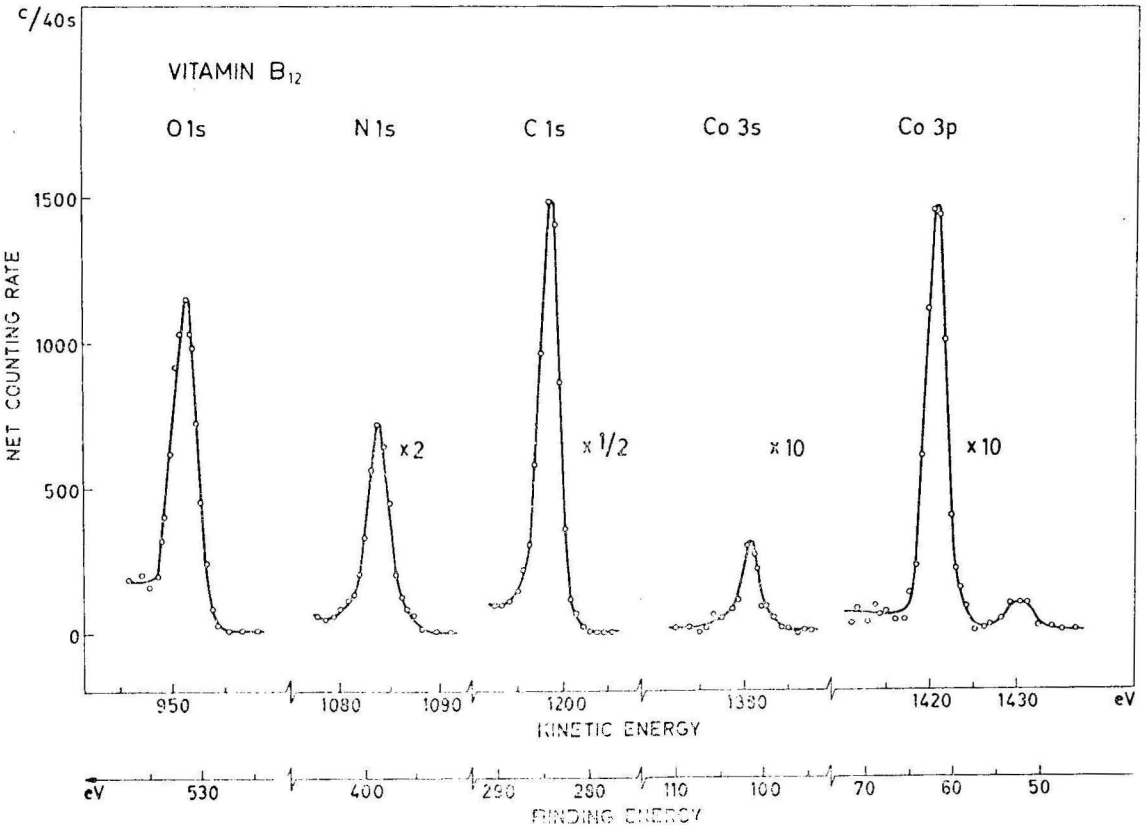


Fig. 8 — ESCA lines of cobalt detected in a probe of vitamin B_{12}; taken from ref. 4.

In the second case the sodium-iodate crystal contains a rather pure heteropolar bond between a positive sodium ion and a negative IO_3 ion. The situation for the chemical bond between the iodine atom and the three oxygen atoms, however, is not so clear. The six (5 p)-electrons, (including the one which comes from the sodium) could be transferred completely to the oxygen atoms, thus filling their

The ESCA-lines of inner electron orbits are very sensitive to the nature of the chemical bond. This can be understood in the following way:

The eigenfunctions and energy eigenvalues of inner electrons in an atom are the solutions of the Schrödinger equation:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \cdot (E - V(r)) \cdot \psi = 0 .$$

The essential part of this equation is the effective potential energy of the electrons $V(r)$. Without any shielding by the other electrons this potential would be given by:

$$V(r) = -\frac{z e^2}{4 \pi \varepsilon_0 r}.$$

The negative charge distribution of the electron shell reduces the strength of this

Na: K L, $(3s)^1$
I : K L M, $(4s)^2 (4p)^6 (4d)^{10}$, $(5s)^2 (5p)^5$
O : K, $(2s)^2 (2p)^4$

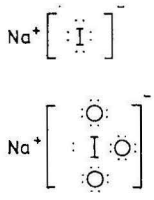


Fig. 9 — Structure of NaI and $NaIO_3$.

potential. Now the electrons which are responsible for the chemical bond participate, of course, also in this shielding. This shielding is not-at-all negligibly small, since it is well known from Hartree-Fock calculations that the radial wave-functions, even of electrons, even of electrons of outer orbits, penetrate quite deep into the interior of the atom. If now the valence electrons of iodine are transferred to the oxygen atoms, this shielding is reduced and therefore the binding energy of inner orbitals in iodine is increased. This effect is actually observed for sodium iodate as one can see in fig. 10, where the ESCA M_V-and M_{IV}-electron lines of iodine for an NaI- and $NaIO_3$-target are shown. The increase of binding energy amounts to about 5 electron volts.

This effect is an example for the so-called chemical shift. Quite a number of chemical shifts investigations have been performed in the past by use of the Mössbauer effect. In this method the chemical shift is produced by the monopole term of the electric hyperfine interaction with the nuclear charge distribution. The Mössbauer technique is limited to a few suitable Mössbauer nuclei. On the other hand the information obtained by the ESCA-method is more valuable, since chemical shifts can be observed simultaneously for many different atomic orbits. A careful theoretical analysis of these data should give quite detailled information about the real wave functions of the valence electrons.

Two other examples for chemical shift measurements are shown in fig. 11 and fig. 12. Fig. 11 shows the chemical shift observed for different oxidation states of sulfur and in fig. 12 similar results are plotted for different oxidation states of chlorine. It is interesting to note that the chemical shift observed for the K-electrons is in the same order of magnitude as that which one measures for L-electrons. The accuracy obtained is quite high and these measurements demonstrate that

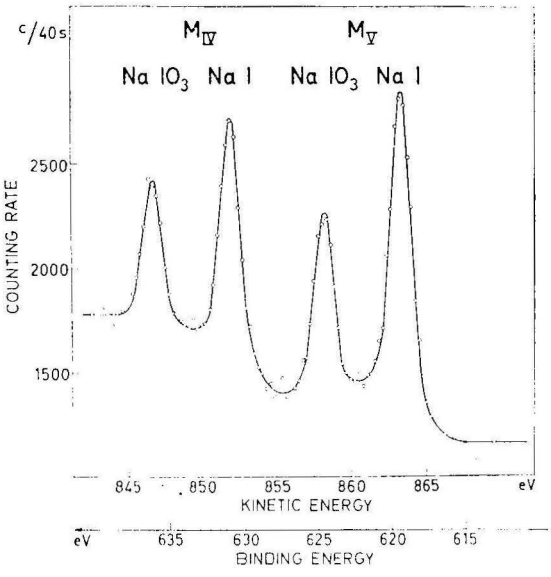


Fig. 10 — Chemical shift of the iodine M_{IV}- and M_V-ESCA-lines observed in a mixture of $NaIO_3$ and NaI. This figure is taken from ref. 4.

the ESCA-technique is indeed a unique tool for chemical structure studies.

Finally I should like to make a few remarks about further technological developments of ESCA. It was shown already, produced by the continuous X-ray bremsstrahlung-spectrum. An essential improvement is therefore the use of an X-ray monochrometer which selects the interesting characteristic X-ray line out of the

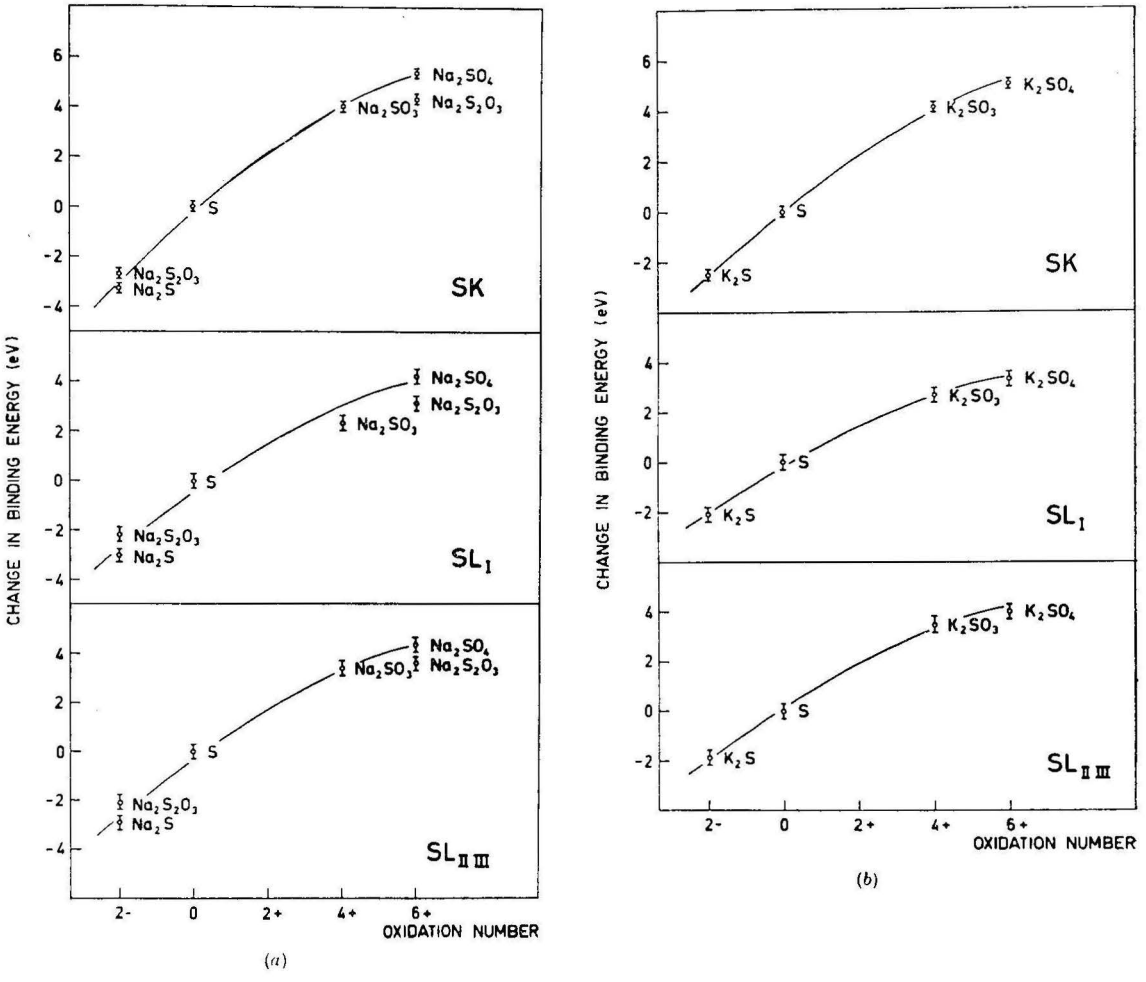


Fig. 11 — Chemical shifts of various sulfur ESCA-lines between different oxidation states, taken from ref. 4.

that the finite width of characteristic X-rays, used for the photoemission process, limits the linewidth observed in the electron spectra. In addition it is sometimes quite a disadvantage that sotelites are observed which are caused by other characteristic X-rays and in addition one has always the background of electrons background. Fig. 13 shows schematically the construction of a commercial ESCA-machine, built by the firm Hewlett-Packard. This apparatus contains already a bent-crystal X-ray-monochrometer and the following interesting solution was found applied in order to overcome the intensity problem. Instead of selecting

just the inner part of a characteristic X-ray line by use of a small exit slit the whole X-ray line irradiates the target. A system of electric lenses is used to obtain an image of the target at the entrance of the electrostatic electron-spectrometer. The left-hand side of the target image is that part which was irradiated by X-ray quanta of the low energy side of the X-ray line and on the right hand side the high energy quanta of the X-ray line had emitted the photoelectrons. Now the dispersion of the electron-spectrometer has been adjusted in such a way that all photoelectrons of the same electronic level are focussed to one line at the exit of the spectrometer. This exit again does not contain a window. Instead a multichannel-detector system is used which registers simultaneously the whole spectrum. The data are accumulated in a multichannel analyzer.

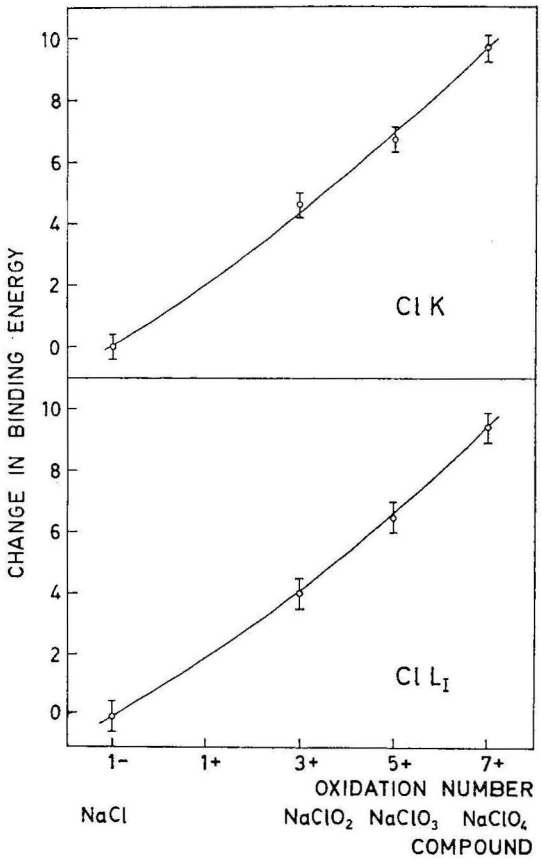


Fig. 12 — Chemical shifts of the K- and the L_I-ESCA-lines of chlorine between different oxidation states, taken from ref. 4.

With this arrangement a linewidth of the electron lines smaller the 1eV is reached. Furthermore the peak to background ratio of the ESCA-lines is increased appreciably compared to conventional ESCA-machines.

Finally it should be mentioned that there does not exista suitable X-ray source for energies between the 1.2 keV Mg K--line and ultraviolett light sources. It has been suggested, however, to use the continuous bremsstrahlung-spectrum of large electron accelerators for ESCA-purposes. Experiments of this type have been started at the 6 GeV electron-synchrotron in Hamburg as well as at the 2.3 GeV machine at Bonn. Here one can select, in principle, any energy wanted by use of a crystal-monochrometer. The main problem is that the intensity is not as high

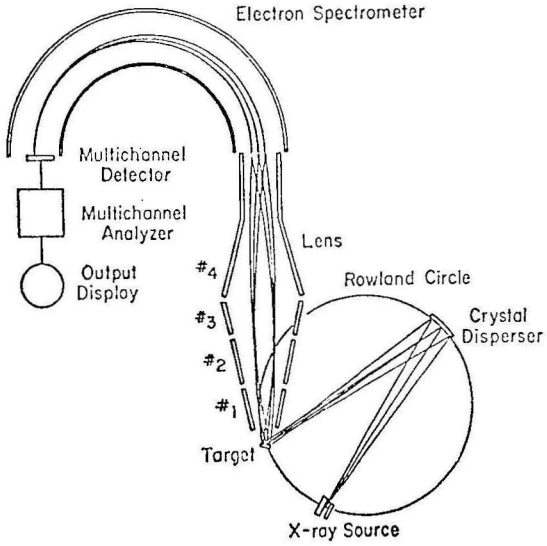


Fig. 13 — Scetch of the ESCA- apparatus, constructed by Hewlett-Packard.

as one would like to have. Therefore the application of the synchrotron radiation for ESCA-purposes will be limited in the near future at least, to experiments which cannot be performed by conventional X-ray and ultra-violett-light sources.

The ESCA-technique is still in a state where a great deal of technological developments have to be done. One can expect, though, that it will become quite soon a routine instrument of chemical and solid state research like NMR or electron spin resonance etc..

REFERENCES

[1] E. BODENSTEDT, J. RADELOFF, N. BUTTLER, P. MEYER, L. SCHÄNZLER, M. FORKER, H. F. WAGNER, K. KRIEN, und K. G. PLINGEN; *Z. f. Physik* **190**, 60 (1966).

[2] K. SIEGBAHN, and K. EDVARSON; *Nucl. Phys.* **1**, 137 (1956).

[3] A. FAHLMANN, S. HAGSTRÖM, K. HAMRIN, R. NORDBERG, C. NORDLING, and K. SIEGBAHN; *Arkiv Fysik* **31**, 479 (1966).

[4] K. SIEGBAHN et al., *Nova Acta Regial Soc. Scient. Upsaliensis,* Ser IV, **20** (1967).

I — Experiências escolares com o osciloscópio de raios catódicos em que não se utiliza a base de tempo

B) — *Estudo das relações entre os valores de algumas grandezas físicas*

por RÓMULO DE CARVALHO

Sumário das experiências:

7. Queda de tensão ao longo de um circuito em série.

8. Força electromotriz de indução.

   8. 1. Indução provocada pelo deslocamento de um íman.

   8. 2. Indução provocada por uma bobina percorrida por uma corrente.

      8. 2. 1. Variação da f. e. m. induzida com a intensidade da corrente indutora.

      8. 2. 2. Variação da f. e. m. induzida com o número de espiras da bobina que sofre a indução.

      8. 2. 3. Variação da f. e. m. induzida com o ângulo que fazem entre si os eixos das bobinas indutora e induzida.

      8. 2. 4. Variação da f. e. m. induzida com a permeabilidade magnética do núcleo da bobina indutora.

9. Estudo das variações do campo magnético criado por uma bobina.

   9. 1. Influência do número de espiras da bobina sobre o valor do campo magnético criado por ela.

   9. 2. Influência da intensidade da corrente que percorre a bobina sobre o valor do campo magnético criado por ela.

9.3. Influência do comprimento da bobina sobre o valor do campo magnético criado por ela.

10. Estudo das relações entre os valores das tensões aplicadas nos terminais de uma resistência e os valores das intensidades das correntes que a percorrem (Lei de Ohm).

10.1. O condutor em estudo é uma resistência óhmica e a corrente que a percorre é contínua.

10.2. O condutor é uma resistência óhmica e a corrente que o percorre é alternada.

10.3. O condutor possui indutância e a corrente que o percorre é alternada.

11. Estudo dos transformadores estáticos.

11.1. Variação da tensão no secundário com o número de espiras da respectiva bobina.

11.2. Desfasamento entre os valores da tensão e da intensidade da corrente no primário do transformador.

11.3. Desfasamento entre os valores das intensidades das correntes no primário e no secundário.

11.4. Desfasamento entre os valores da tensão e da intensidade da corrente no secundário.

7. Queda de tensão ao longo de um circuito em série.

Se num circuito em série instalarmos um voltímetro em derivação, poderemos, por meio desse instrumento, medir os valores das diferenças de potencial entre quaisquer dois pontos do circuito. Recordando que o osciloscópio pode servir de voltímetro (2.1.1 e 4.1.1) torna-se fácil utilizá-lo na observação e medição daquelas diferenças de potencial.

No circuito representado na figura 26 utiliza-se a tensão de 18,9 V alternados (12,6 + 6,3) do bloco de alimentação *Phywe* (fig. 7) e faz-se passar a respectiva corrente por um conjunto de cinco

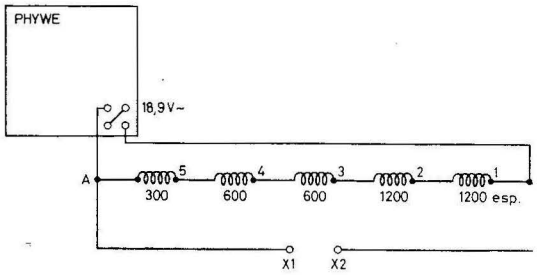


Fig. 26 — Montagem para o estudo da queda de tensão ao longo de um circuito em série.

bobinas, em série, cujos números de espiras são de 300, 600, 600, 1200 e 1200. As bobinas devem estar ligadas entre si por fios de bananas com derivação.

Liga-se um dos terminais da fonte (A) à placa X1 do osciloscópio, e liga-se X2 a pontos sucessivos (1, 2, 3, 4, 5) da série de resistências. Notar-se-á que o traço luminoso do alvo vai diminuindo de comprimento, segundo a ordem indicada.

8. Força electromotriz de indução.

Um trabalho de muito interesse para os alunos do ensino liceal é o estudo da indução electromagnética por meio do osciloscópio.

Se ligarmos os terminais de uma bobina às placas XX do osciloscópio e provocarmos uma variação de fluxo magnético através das espiras dessa bobina, criar-se-á uma tensão entre aquelas placas em consequência da força electromotriz provocada pela indução. As modificações então observadas no sinal luminoso, no alvo do osciloscópio, permitem apreciar, qualitativa e quantitativamente, as variações dos valores dessa força electromotriz.

8.1. Indução provocada pelo deslocamento de um íman.

Liga-se uma bobina de grande número de espiras (por exemplo de 12 000) às placas XX do osciloscópio em cujo alvo se obteve prèviamente o sinal pontual luminoso, e introduz-se, na bobina, um dos pólos de um íman em barra. Observe-se o deslocamento do sinal num certo sentido que depende do pólo que foi utilizado para a indução e também de ter sido introduzido ou retirado.

Repita-se a introdução do íman mas agora com maior ou menor rapidez. Notar-se-á que o desvio do sinal é tanto maior quanto mais rápido for o movimento do íman ou, por outras palavras, quanto menor for o intervalo de tempo, Δt, durante o qual se provocou a variação de fluxo magnético através da bobina.

Substitua-se a bobina por outra com diferente número de espiras (por exemplo uma de 2×18000 espiras que faz parte do material distribuído aos Liceus). Notar-se-á que os desvios do sinal luminoso são maiores quando o número de espiras da bobina utilizada for maior, supondo constantes todas as outras condições em que a experiência se executa.

Podemos assim estudar experimentalmente as relações expressas pela fórmula

$$E = n \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

em que E, n, $\Delta \phi$ e Δt são, respectivamente, a força electromotriz de indução, o número de espiras da bobina, a variação de fluxo provocada através de cada uma das suas espiras e o intervalo de tempo dessa variação.

8.2. Indução provocada por uma bobina percorrida por uma corrente.

8.2.1. Variação da f. e. m. induzida com a intensidade da corrente indutora.

Monte-se o circuito representado na figura 27 em que se utiliza a tensão alternada de 6,3 V do bloco *MAE* (ou os 12,6 V do bloco de alimentação do modelo *Phywe* pois o 6,3 está ocupado na ligação entre esse bloco e o da base de tempo).

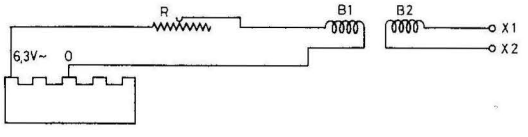


Fig. 27 — Montagem para o estudo da variação da f. e. m. induzida (na bobina B_2) com a intensidade da corrente indutora que percorre a bobina B_1.

As experiências foram efectuadas com um reóstato, R, de cursor, de 23,5 Ω e 4,3 A e bobinas indutoras, B_1, de diferentes números de espiras. O circuito induzido consistiu numa bobina, B_2, de grande número de espiras (2×18000) cujos terminais se ligam às placas XX.

Usando uma bobina indutora de 300 espiras e introduzindo no circuito a máxima resistência do reóstato, obteve-se um traço luminoso de 6 mm (com o modelo *MAE*). Diminuindo progressivamente a resistência, o traço aumentou até 90 mm.

Conclui-se que a f. e. m. induzida depende da intensidade da corrente indutora, aumentando ou diminuindo conforme esta aumenta ou diminui.

8.2.2. Variação da f. e. m. induzida com o número de espiras da bobina que sofre a indução.

Substituindo a bobina induzida ($2 \times 18\,000$ espiras) por outra (por exemplo, de 12 000 espiras) verifica-se que os comprimentos dos traços luminosos são menores quando o número de espiras é menor, para as mesmas condições do circuito indutor. Se o traço media 6 mm para o indutor de 300 espiras, com o reóstato no máximo da resistência, quando o induzido tinha $2 \times 18\,000$ espiras, mede 2 mm quando o induzido tiver 12 000 espiras.

8.2.3. Variação da f. e. m. induzida com o ângulo que fazem entre si os eixos das bobinas indutora e induzida.

Colocando as duas bobinas defronte uma da outra e muito próximas entre si (como se procedeu nas experiências anteriores), o traço luminoso apresenta certo comprimento; rodando uma das bobinas, mas mantendo-a sempre próxima da outra e de modo que os seus eixos façam, entre si, ângulos sucessivamente menores, ver-se-à o traço aumentar de comprimento.

Numa experiência em que se utilizou uma bobina indutora de 600 espiras e uma induzida de 2×18000 espiras colocada defronte e junto da primeira, o traço do alvo media 50 cm. Rodando a bobina indutora de modo a que o seu eixo fizesse ângulos sucessivos de 60°, 45° e 30° com o eixo da induzida, os comprimentos do traço foram, respectivamente, 20 mm, 24 mm e 30 mm.

8.2.4. Variação da f. e. m. induzida com a permeabilidade magnética do núcleo da bobina indutora.

Em todas as experiências anteriores a bobina indutora está mergulhada no ar. Se introduzirmos nela um núcleo de ferro provocaremos grande aumento no valor da f. e. m. induzida.

Utilizando o mesmo circuito da figura 27, com uma bobina indutora de 300 espiras e o cursor do reóstato em certa posição, obteve-se um traço luminoso de 2 cm de comprimento. Introduzindo um núcleo de ferro laminado na bobina, o traço luminoso alongou-se até exceder o alvo.

9. Estudo das variações do campo magnético criado por uma bobina.

Nas experiências dos números anteriores (§ 8) o que se tem estado a apreciar experimentalmente, sem se declarar, é a dependência entre os valores de B do campo magnético indutor e os valores das forças electromotrizes induzidas. Como aqueles valores dependem do valor da intensidade da corrente que percorre o circuito indutor, do número de espiras da bobina indutora, etc., o que estivemos a apreciar, por intermédio do osciloscópio, foi a influência das variações destas grandezas sobre a força electromotriz induzida. Podemos, porém, estudar a influência dessas grandezas sobre os valores de H, ou de B, sem recorrer à indução electromagnética mas por acção directa do campo magnético sobre o feixe electrónico do osciloscópio.

Para as experiências que se seguem convém utilizar um suporte (S, fig. 28) onde se instale uma placa horizontal que sirva de mesa (ou qualquer coisa que faça o mesmo efeito como até uma pilha de livros) onde se possa apoiar uma bobina numa altura tal que o seu eixo fique ao nível do eixo longitudinal do tubo catódico. A bobina deverá ficar situada defronte da parte mais estreita do tubo, muito próxima dele, de modo que o eixo da bobina fique normal à trajectória do feixe electrónico. De qualquer modo de-

ver-se-ão marcar referências na superfície em que assenta a bobina para que, quando convier, se possa substituir uma bobina por outra que vá ocupar exactamente o lugar em que a anterior se encontrava.

O circuito utilizado nas experiências poderá ser, conforme mostra o esquema da figura 28, constituido por uma fonte de alimentação (6,3 V~ da caixa *MAE*), um

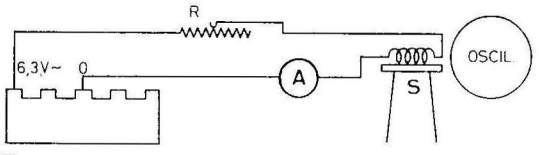


Fig. 28 — Montagem para o estudo das variações do campo magnético criado por uma bobina.

amperímetro com alcance de 1A~, um reóstato de cursor e a bobina cujo campo magnético vai ser estudado.

9. 1. Influência do número de espiras da bobina sobre o valor do campo magnético criado por ela.

Para que o único factor variável a influir no valor do campo seja o número de espiras das bobinas, será necessário que a corrente no circuito tenha sempre a mesma intensidade quando se substitui uma bobina por outra. As bobinas das colecções que existem nos liceus têm todas o mesmo comprimento, o que se traduz numa constante para este estudo.

Coloque-se no circuito uma bobina de 300 espiras, na posição indicada na figura 28, sobre o suporte S, e regule-se o reóstato para que o amperímetro acuse 300mA. Numa experiência realizada, nestas condições, com o modelo *MAE*, o comprimento do traço luminoso foi de 10 mm.

Substituindo a bobina por outra de 600 espiras, e depois por outra de 1200 espiras, e regulando o reóstato em cada caso para manter a corrente de 300 mA, observaram-se traços com os comprimentos de 21 mm e 40 mm. Concluiremos que os valores de B são proporcionais a n (número de espiras) quando a intensidade (I) da corrente e o comprimento (l) das bobinas se mantém constante.

A experiência pode ser realizada doutro modo que permite evitar a regulação do reóstato para que a intensidade da corrente seja a mesma ao substituirem-se as bobinas. Para isso instalam-se logo de início, em série, no circuito, as bobinas cujos efeitos magnéticos vão ser apreciados (três, no caso da experiência citada). Assim já fica assegurado que a intensidade da corrente que as percorre tem o mesmo valor em todas elas. As ligações entre as bobinas deverão ser feitas com fios bastante compridos para que qualquer delas se possa colocar, à vontade, sobre o suporte S, uma de cada vez, e afastadas entre si para se influenciarem mùtuamente o menos possível.

9. 2. Influência da intensidade da corrente que percorre a bobina, sobre o valor do campo magnético criado por ela.

Para a execução desta experiência utiliza-se uma só bobina, variando o valor da resistência introduzida no réostato para que a intensidade, no circuito, tenha valores diferentes. Assim, para uma bobina de 300 espiras, regulou-se o reóstato de modo que a intensidade da corrente apresentasse os seguintes valores: 300 mA, 600 mA e 900 mA. Os comprimentos do traço luminoso no alvo, no modelo *MAE*, foram, respectivamente, 10 mm, 21 mm e 31 mm, o que permite admitir que os valores de B sejam directamente proporcionais às intensidades das correntes que percorrem a bobina.

A experiência repetida com uma bobina de 600 espiras, percorrida por correntes de 300 mA, 600 mA e 900 mA sucessiva-

mente, deu, para comprimento dos traços no alvo, os valores de 29 mm, 58 mm e 88 mm, o que concorda com a conclusão anterior.

9. 3. Influência do comprimento da bobina sobre o valor do campo magnético criado por ela.

Para este estudo será necessário utilizar bobinas de comprimentos diferentes mas com o mesmo número de espiras, percorridas por correntes da mesma intensidade. Poderemos, para isso, instalar, em série, no circuito, duas bobinas de 300 espiras e uma de 600, ligando-se entre si as duas primeiras com fios curtos, e a segunda à terceira com fios compridos. Como estão em série a intensidade da corrente que as percorre terá o mesmo valor em qualquer delas. Colocando as duas bobinas de 300 espiras (total 600) sobre o suporte S, encostadas uma à outra como se fossem uma só bobina, mede-se o comprimento do traço no alvo. Substituindo-as pela bobina única de 600 espiras, que tem metade do comprimento das outras duas associadas, o traço terá o dobro do comprimento, aproximadamente.

Numa experiência realizada com duas bobinas de 300 espiras, associadas, percorridas por 300 mA, obteve-se, no modelo *MAE*, um traço luminoso de 18 mm de comprimento; com uma bobina, única, de 600 espiras, percorrida por uma corrente da mesma intensidade, obteve-se um traço de 32 mm de comprimento.

Os valores obtidos não permitem concluir seguramente que os valores de B sejam inversamente proporcionais aos comprimentos das bobinas quando o número das suas espiras é o mesmo e a corrente que as percorre tem igual intensidade. Trabalhando com duas bobinas de 600 espiras que depois se substituem por uma só de 1200 espiras, os resultados obtidos são ainda menos concludentes, o que deve ser consequência dos valores diferentes das indutâncias das bobinas.

O conjunto das experiências citadas em 9.1., 9.2. e 9.3. permitirá ilustrar, experimentalmente, as relações traduzidas na expressão $B = k\frac{nI}{l}$.

10. Estudo das relações entre os valores das tensões aplicadas nos terminais de uma resistência e os valores das intensidades das correntes que a percorrem (Lei de Ohm).

Colocada certa resistência num circuito, e fazendo-a percorrer por correntes eléctricas, pretende-se estudar a relação numérica entre os valores das tensões nos terminais da resistência e os respectivos valores das intensidades das correntes que a percorrem. O estudo experimental consistirá, portanto, em efectuar medidas de tensões e de intensidades de corrente.

Como já vimos, pode-se utilizar o osciloscópio como voltímetro (2. 1. 1 e 4. 1. 1) e como amperímetro (2. 1. 2), o que, em princípio, permitiria realizar fácilmente o trabalho proposto mas, recordando o modo como dissemos poder o osciloscópio servir de amperímetro, notaremos que o processo se baseia no conhecimento prévio da lei de Ohm, ou seja da própria relação numérica que se procura. O caminho a seguir terá, portanto, que ser outro.

Consideremos então um circuito, como o da figura 29, onde se encontrem uma resistência (R) e uma bobina (B) em série. A bobina está colocada muito perto do tubo catódico, numa posição em que o seu eixo é normal à direcção do feixe electrónico (anàlogamente à disposição

indicada nas experiências do n.º 9). Fazendo passar uma corrente no circuito, o campo magnético criado pela bobina irá provocar um movimento do sinal luminoso segundo a vertical (Experiência 1.2). Como a intensidade do campo magnético é directamente proporcional à intensidade da corrente que percorre

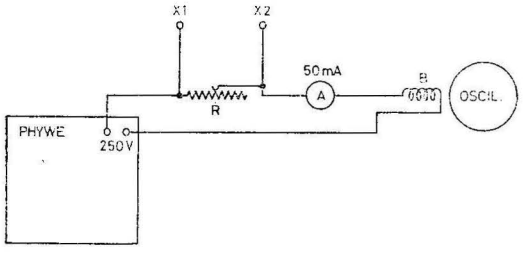


Fig. 29 — Montagem para o estudo da lei de Ohm.

a bobina (Experiência 9.2), o desvio sofrido pelo ponto luminoso (se a corrente for contínua) ou o comprimento do traço no alvo (se a corrente for alternada) serão função do valor da intensidade dessa corrente.

Se afastássemos a bobina das proximidades do tubo catódico e ligássemos os terminais da resistência R às placas XX do osciloscópio, veríamos o ponto luminoso deslocar-se segundo uma linha horizontal, ou então formar-se um traço luminoso horizontal, conforme a corrente fosse contínua ou alternada.

Procedendo simultâneamente dos dois modos, isto é, colocando a bobina perto do tubo catódico na posição indicada e ligando a resistência R às placas XX do osciloscópio, o sinal luminoso ficará sujeito à acção de duas forças rectangulares que o colocarão, no alvo, numa posição que depende, simultâneamente, dos valores de V e de I relativos à resistência em estudo. Variando os valores de V, para a mesma resistência, variarão também os valores de I, e da comparação dessas variações poderemos estabelecer a lei de Ohm.

10.1. O condutor em estudo é uma resistência óhmica e a corrente que o percorre é contínua.

A experiência pode ser feita de acordo com o esquema já referido, representado na figura 29, em que figuram, como fonte de tensão, os terminais de 250 V contínuos do bloco de alimentação *Phywe*; um amperímetro com alcance de 50 mA; uma resistência variável (caixa de resistência) R; e uma bobina de indução B. Dos terminais de R partem dois fios para as placas $X1$ e $X2$.

Usando o modelo *MAE* a bobina utilizada nesta experiência será uma das três a que já nos referimos na experiência 1.2 cujas resistência e indutância já têm valores apropriados para o que se pretende. Qualquer das três bobinas se pode retirar da posição em que está instalada, fazendo ângulos de 120° entre si, e ser colocada de modo a ficar com o seu eixo horizontal. O modelo *Phywe* não tem bobinas para este efeito.

Obtido o ponto central, luminoso, no alvo, introduzida uma resistência na caixa (por exemplo 500 Ω) e fechado o circuito, roda-se o botão do potenciómetro do bloco para se ir aumentando o valor da tensão aplicada a R, dando atenção ao amperímetro porque o bloco não admite uma intensidade superior a 50 mA. No alvo do osciloscópio o sinal desloca-se numa direcção oblíqua em relação aos eixos coordenados e caminha ao longo dessa direcção à medida que se aumenta o valor da tensão. Desse deslocamento em linha recta se conclui que há proporcionalidade directa entre os valores das tensões aplicadas aos terminais de R e os valores das intensidades respectivas.

Para uma resistência de 500 Ω a obliquidade da recta descrita pelo ponto luminoso tem certo valor; para uma resistência maior, por exemplo de 1000 Ω, a recta é mais inclinada sobre o eixo horizontal.

10.2. O condutor é uma resistência óhmica e a corrente que o percorre é alternada.

Aproveitando o circuito anterior, utiliza-se a corrente alternada de 4 V do bloco *Phywe*, retirando o amperímetro por não ser agora necessário acautelar o bloco contra os excessos de intensidade de corrente.

Introduzam-se 500 Ω na caixa de resistências. Se esta não estiver ligada às placas XX, vê-se no alvo um traço luminoso vertical. Ligando R às placas, o traço dispõe-se obliquamente. Passando de 4 V para os 12,6V do mesmo bloco, e mantendo a resistência com o mesmo valor, o traço luminoso conserva a mesma obliquidade mas aumenta de comprimento.

Repetindo as experiências com resistências mais elevadas (600 Ω, 700 Ω, etc.) vê-se o traço luminoso diminuir de comprimento e inclinar-se cada vez mais sobre o eixo das tensões.

Como os traços luminosos são rectilíneos concluiremos ser constante, para cada valor da resistência, a razão entre os valores das tensões que lhe são aplicados e as intensidades das correntes que a percorrem (Lei de Ohm).

10.3. O condutor possui indutância e a corrente que o percorre é alternada.

A experiência pode ser efectuada utilizando a montagem da figura 30, que inclui a bobina de indução, B, uma resistência de 500 Ω e uma outra bobina, $B1$, relativamente à qual se vão estudar as relações entre os valores das tensões que lhe são aplicadas e os valores das intensidades das correntes respectivas. A tensão que utilizaremos em primeiro lugar é a de 4 V~ do bloco Phywe.

Comecemos por colocar no circuito uma bobina ($B1$) de $2 \times 18\,000$ espiras (150 Ω, 0,3 H). Fechando o circuito, e antes de ligar a bobina às placas XX, vê-se no alvo um traço luminoso, vertical de 14 mm de comprimento. Fazendo a ligação às placas, a figura do alvo inclina-se um pouco e toma a forma de um anel bastante fechado, em vez do traço que era antes.

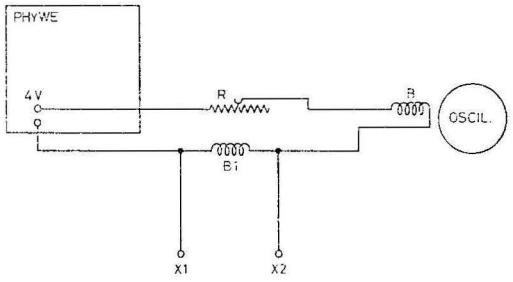


Fig. 30 — Montagem que permite verificar que as tensões aplicadas nos terminais de uma bobina (B_1), não estão em fase com as respectivas intensidades das correntes que a percorrem.

Usando sucessivamente as tensões 6,3 V e 12,6 V alternados, da caixa *Phywe*, o anel aumenta de comprimento (45 mm e 88 mm) e apresenta-se mais aberto.

A formação do anel significa que os valores das tensões nos terminais da bobina não estão em fase com os respectivos valores das intensidades das correntes que a percorrem. As diferenças de fase são pequenas visto que as aberturas dos aneis observados também são pequenos (para um desfasamento de $\frac{T}{4}$ o anel seria circular).

A experiência repetida com uma bobina de indutância maior (12 000 espiras, 3 000 Ω, 2,6 H) produz, para as mesmas tensões da fonte (4 V~, 6,3 V~, 12,6 V~), aneis de comprimentos muito menores (respectivamente 12 mm, 18 mm, e 30 mm) e muito mais inclinados sobre o eixo horizontal.

Concluíremos que no caso de uma resistência com indutância não há propor-

cionalidade entre os valores das tensões que lhe são aplicadas e os das respectivas intensidades de corrente.

11. Estudo dos transformadores estáticos.

11. 1. Variação da tensão no secundário com o número de espiras da respectiva bobina.

Monte-se um transformador estático com o material corrente nos laboratórios de Física dos liceus, utilizando duas bobinas, uma de 12000 espiras e outra de 1200, instaladas num núcleo de ferro em *U*, fechado pela respectiva armadura. As duas bobinas servem, respectivamente, de primário e secundário.

Ligue-se o primário à tomada da corrente da rede pública (220 V~), e o secundário às placas XX do osciloscópio. Obter-se-á no alvo um traço luminoso, horizontal (de 6 cm de comprimento, na experiência efectuada), que permitirá conhecer o valor da tensão no secundário (cerca de 10 vezes menor do que a do primário).

Usando como secundário, sucessivamente, bobinas de 600 e de 300 espiras, o traço luminoso terá comprimentos que serão metade (3 cm) e um quarto (1,5 cm) do comprimento anterior.

Conclui-se que as tensões nos diferentes secundários (conservando-se o mesmo primário) são proporcionais aos números de espiras das respectivas bobinas.

11. 2. Desfasamento entre os valores da tensão e da intensidade da corrente no primário do transformador.

Monte-se o circuito representado no esquema da figura 31 em que se utiliza apenas uma bobina de 1200 espiras ligada aos terminais de 12,6 V~ da caixa de alimentação *Phywe*. Os terminais da bobina ligam-se, por um lado, às placas XX para assinalarem no alvo o valor da respectiva tensão; por outro lado a uma resistência variável e à bobina anexa ao tubo electrónico do modelo *MAE* conforme se procedeu no § 10.

Fechando os circuitos obter-se-á no alvo um anel luminoso, com certa incli-

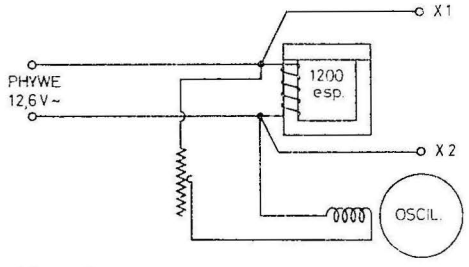


Fig. 31 — Montagem para o estudo do desfasamento entre a tensão e a intensidade da corrente no primário de um transformador.

nação sobre o eixo das tensões, certo comprimento e certa abertura, o que depende do valor da resistência introduzida e da indutância da bobina utilizada.

Com 500 Ω obteve-se um anel inclinado, de 52 cm de comprimento. Diminuindo o valor da resistência o anel aumenta de comprimento e de largura, aproximando-se da vertical.

A intensidade da corrente encontra-se atrasada em relação à tensão de um valor compreendido entre 0° e 90°, e o atraso é tanto maior quanto maior for a indutância da bobina em relação à resistência do circuito. O sinal luminoso aproxima-se tanto mais da vertical quanto maior for o atraso.

11.3. Desfasamento entre os valores das insidades das correntes no primário e no secundário.

Monte-se o circuito representado na figura 32, utilizando duas bobinas, uma de 1200 espiras (primário) e outra de 600 espiras (secundário). A tensão de ali-

mentação é a mesma da experiência anterior.

Como se pretende comparar os efeitos das intensidades das correntes em ambos os circuitos, teremos que utilizar duas

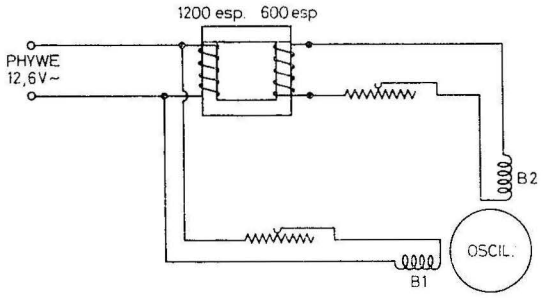


Fig. 32 — Montagem para o estudo do desfasamento entre as intensidades das correntes, primária e secundária, num transformador.

bobinas, $B1$ e $B2$, uma de eixo horizontal e outra de eixo vertical cujos campos magnéticos irão influenciar o feixe segundo direcções normais entre si. As resistências intercaladas nos circuitos permitem obter um sinal luminoso dentro dos limites do alvo.

Dando a devida atenção aos terminais das bobinas onde se deverão fazer as ligações, obtem-se um anel luminoso orientado segundo os quadrantes 2 e 4 do alvo. A intensidade da corrente no secundário está atrasada em relação à intensidade no primário, de um valor compreendido entre 90° e 180°.

11.4. Desfasamento entre os valores da tensão e da intensidade da corrente no secundário.

A experiência, análoga às anteriores, consiste em ligar os terminais do primário (bobina de 1200 espiras) aos 12,6 V ~ da caixa *Phywe*, e os terminais do secundário às placas XX, por um lado, e por outro à bobina indutora cujo campo magnético irá influenciar o feixe electrónico, introduzindo neste circuito uma resistência de 500 Ω.

Obtem-se um anel luminoso orientado segundo os quadrantes 1 e 3 do alvo.

A intensidade da corrente no secundário está atrasada, em relação à tensão, de um valor compreendido entre 0° e 90°. O atraso depende do valor da resistência de carga no circuito.

O uso do laser em Telecomunicações

MODULADORES ELECTROÓPTICOS

por M. A. R. P. de Barros

(Laboratório de Física da Faculdade de Ciências do Porto)

O uso do laser em telecomunicações vai gradualmente deixando o campo da ficção científica para se tornar realidade. Parece portanto oportuno este pequeno artigo onde se apresentam aos leitores de «Gazeta de Física» algumas considerações sobre moduladores. Maior relevo é inevitàvelmente dado pelo autor ao modulador no desenvolvimento do qual trabalhou.

1. Introdução

Desde sempre que um dos objectivos procurados em telecomunicações é uma grande capacidade de transmissão de informação (1). Usando uma outra designa-

(1) Espera-se que uma ideia intuitiva do significado destes termos seja suficiente para compreensão do texto.

ção procura-se que os sistemas utilizados tenham uma grande largura de banda.

Como é evidente quanto maior for a frequência da onda portadora maior será a máxima largura de banda possível. No caso de se usarem radiações electromagnéticas a «luz» terá uma capacidade de transporte de informação muito mais elevada que as ondas de «rádio» convencionais. (A frequência de onda portadora num sistema de comunicação óptico é da ordem de 10^{13} a 10^{15} Hz; se a informação a transmitir tiver uma largura de banda de 10^{12} Hz ocupa apenas 0.1 % do espectro disponível).

As comunicações por via luminosa datam do tempo do homem das cavernas com os seus sinais de fumo. O uso de lanternas que acendem e apagam, tal como ainda hoje se pratica entre navios no alto mar, é uma versão mais recente do mesmo sistema.

Como naturalmente já ocorreu ao espírito do leitor este tipo de sistema de comunicações óptico nem de longe utiliza a capacidade de transmissão acima referida.

Foi o aparecimento do laser em 1960 [1] que veio revolucionar por completo as comunicações ópticas por permitir utilizar num grau muito mais elevado que até então a capacidade potencial dos feixes ópticos para transmissão de informação.

De facto, e ao contrário do que acontece por exemplo com uma lâmpada de vapor de mercúrio, a luz de um laser é monocromática (1) e além disso coerente, quer dizer, num dado ponto a onda luminosa está em fase consigo própria ao fim de um certo intervalo de tempo (coerência temporal) e num dado instante dois pontos da fonte luminosa estão em fase (coerência espacial).

A possibilidade de utilização de um feixe laser para comunicações depende (2) da existência de dispositivos que permitam imprimir neles a informação a transmitir. Tais dispositivos são chamados *Moduladores* e é deles que nos vamos ocupar neste artigo.

2. Tipos de moduladores

A forma mais simples de modular será um interruptor que «acende» e «apaga» o feixe. Esse interruptor poderá ligar ou desligar o laser ou então estando este permanentemente ligado poderá permitir ou impedir a passagem do feixe.

Nesta modalidade de funcionamento há apenas dois estados possíveis que podemos designar por luz-escuridão, sim-não, ou um-zero.

Além deste tipo de funcionamento, digital, o modulador poderá ser do tipo analógico, i. e. a variação do feixe (3) faz-se dum modo contínuo.

Podemos classificar os moduladores de acordo com diversos critérios. Fundamentalmente podemos ter modulação interna e externa conforme o modulador faz ou não parte do laser. Uma das vantagens do uso de moduladores externos, no caso de sistemas digitais, é a possibilidade de com um único feixe termos diversos canais, cada um com o seu modulador, convenientemente multiplexados [2].

Quanto ao efeito físico utilizado poderemos classificar os moduladores em acustoópticos, electroópticos e magnetoópticos.

O efeito electroóptico, base do funcionamento dos moduladores a que especialmente nos referiremos, consiste essencialmente numa variação dos índices de

(1) A largura relativa da risca ($\Delta\nu/\nu$) é 10^{-7} para a luz duma lâmpada de sódio e 10^{-11} para um laser de gás.

(2) Entre muitos outros factores evidentemente.

(3) Intencionalmente não se diz aqui o que é que varia.

refracção de um cristal quando a este é aplicado um campo eléctrico. A variação pode ser proporcional ao quadrado da amplitude do campo aplicado — efeito Kerr ou efeito electroóptico quadrático, descoberto por J. Kerr em 1875 — ou proporcional ao campo aplicado — efeito Pockels ou efeito electroóptico linear descoberto por F. Pockels em 1893.

componentes estavam em fase a diferença dos índices de refracção vai em geral produzir uma diferença de fase entre ambas à saída. Como consequência o feixe passará de linear para elìpticamente polarizado (fig. 1).

A aplicação de um campo eléctrico fará em geral variar as velocidades de fase, isto é, os índices de refracção do

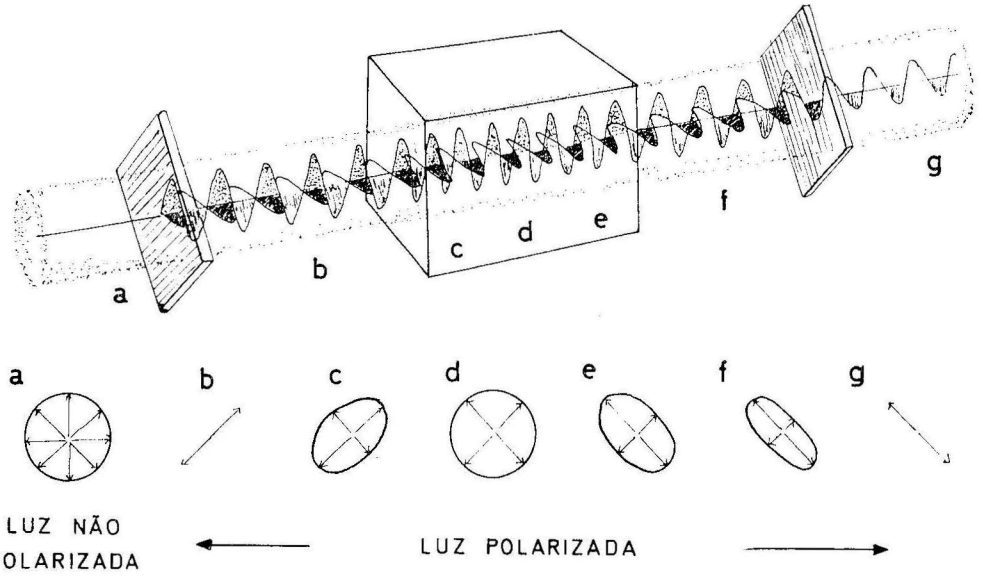


Fig. 1 — Polarização elíptica de um feixe de luz ao atravessar um cristal.

Para mais fàcilmente compreender o modo como funciona um modulador electroóptico vamos fazer uma ligeira referência às propriedades dos meios òpticamente anisotrópicos.

Consideremos um feixe luminoso linearmente polarizado que incide num cristal transparente.

Esse feixe vai decompor-se em dois, linearmente polarizados segundo direcções características do cristal (eixos do cristal) (1) ortogonais entre si. Em geral a cada uma dessas componentes corresponde um índice de refracção ou, o que é mesmo, elas propagam-se com velocidades diferentes $\left(v = \frac{c}{n}\right)$. Se à entrada do cristal as duas

cristal, e poderá ou não fazer rodar as direcções de polarização no interior do cristal (mantendo o âugulo de 90° entre elas).

Sobre Óptica dos Cristais e Efeito Electroóptico muito haveria a dizer [3, 4] mas esperamos que o pouco que acima está exposto seja suficiente para comprender aquilo que se segue.

Os materiais electroópticos conhecidos há mais tempo e até há pouco os únicos

(1) Estamos implìcitamente a admitir que a direcção de incidência é um dos eixos do cristal. Isto não vai restringir as validades das nossas conclusões uma vez que nos casos práticos considerados o feixe incidente está nessa situação.

usados em moduladores produzidos comercialmente são os do tipo ADP e KDP (respectivamente $NH_4 H_2 PO_4$ e $KH_2 PO_4$).

Recentemente materiais como o niobato de lítio, $LiNbO_3$, e tantalato de lítio, $LiTaO_3$, têm sido usados cada vez com mais sucesso.

Podemos ainda classificar os moduladores quanto à característica do feixe que é efectivamente modulada, por exemplo de amplitude, intensidade, fase, polarização.

Passamos agora a descrever alguns moduladores.

3. Modulador usando KDP

Descreveremos em primeiro lugar um modulador electroóptico convencional usando um cristal de KDP no modo longitudinal.

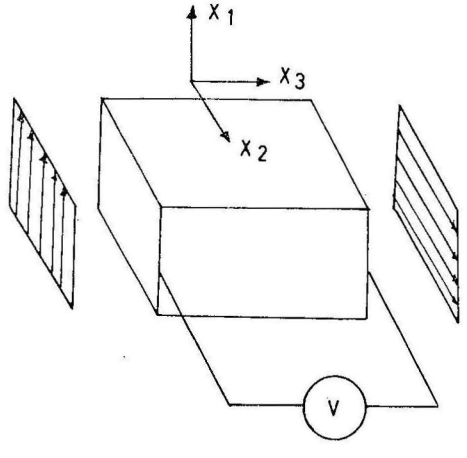


Fig. 2 — Modulador electroóptico de KDP.

Imaginemos um cristal de KDP com a luz propagando-se ao longo do eixo óptico do cristal (fig. 2).

Um polarizador de eixo vertical existente antes do cristal assegura que o feixe nele incidente seja verticalmente polarizado.

Como esta é uma das polarizações possíveis no interior do cristal o feixe não sofre qualquer perturbação e sai pelo outro lado ainda verticalmente polarizado. Se agora tivermos um segundo polarizador com o eixo horizontal o feixe de luz é extinto.

Por meio de eléctrodos transparentes ou de eléctrodos em forma de coroa circular pode ser aplicado ao cristal um campo eléctrico paralelo à direcção de propagação do feixe luminoso (daí a designação de longitudinal para este modulador). Quando aos eléctrodos é aplicada uma tensão, para o cristal e orientação escolhidos, as direcções de polarização no interior do cristal rodam de 45° (qualquer que seja a tensão aplicada). Como além disso os índices de refracção correspondentes às novas direcções são diferentes as duas componentes em que o feixe de entrada se decompõe têm fases diferentes à saída e o feixe resultante é portanto elipticamente polarizado.

Este modulador é portanto um modulador de fase. Para obtermos modulação de amplitude (ou de intensidade) (1) é que existe o segundo polarizador que apenas permite a passagem da componente horizontal do feixe.

Variando a tensão aplicada varia a diferença de fase entre as duas componentes i. e. a elipticidade do feixe, e portanto a intensidade do feixe que sai do analisador. Quando a diferença de fase entre as duas componentes é de π radianos a luz à saída do cristal é outra vez linearmente polarizada mas a 90° relativamente à direcção de entrada. Sendo assim em vez do *zero* que obtemos na ausência de tensão aplicada teremos um *um* correspondente à passagem não atenuada do feixe. Entre estes dois valores extremos a intensidade do feixe variará continuamente segundo uma lei que não interessa aqui estar a determinar.

(1) A intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude.

A tensão necessária com KDP na orientação presente, para levar o feixe da extinção à transmissão completa é da ordem dos 8 kV e é independente do comprimento do cristal [5].

4. Modulador usando $LiTaO_3$

Consideremos agora um segundo modulador, usando $LiTaO_3$ conforme se representa na figura 3.

Para este material a aplicação de um campo eléctrico na direcção indicada não faz variar as direcções de polarização no interior do cristal de modo que agora

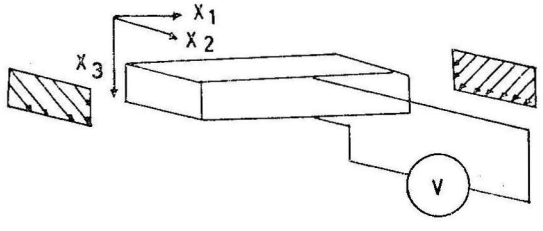


Fig. 3 — Modulador electroóptico de $LiTaO_3$.

colocamos o polarizador de entrada a 45° relativamente a essas direcções.

As duas ondas componentes vão propagar-se no interior do cristal com velocidades diferentes mesmo na ausência de qualquer campo eléctrico aplicado. Por esse motivo um segundo cristal, em geral uma cunha de quartzo, é introduzido no percurso do feixe para compensar esta diferença de fase de modo a obter à saida do cristal um feixe com as mesmas características do feixe incidente.

Se, tal como no caso anterior, houver um segundo polarizador a 90° relativamente ao primeiro o feixe será extinto.

A aplicação de uma tensão variará de modos diferentes os índices de refracção e portanto produz uma diferença de fase entre as duas componentes à saída. Tal como no caso anterior é possível obter uma diferença de fase de π radianos de modo que o feixe passe sem atenuação através do analisador.

Porém ao contrário do caso anterior a tensão necessária para passar de extinção a transmissão completa é agora função das dimensões do cristal.

Há um modulador construído segundo este princípio, usando $LiTaO_3$, nos Bell Telephone Laboratories [2]. Descreveremos em seguida, por terem bastante interesse, alguns pormenores práticos da sua construção que são algo diferentes das características gerais atrás indicadas.

Em primeiro lugar o cristal de $LiTaO_3$, 20 mm de comprimento por $0{,}25 \times 0{,}25 mm^2$ de secção, é espelhado numa das extremidades de modo que a luz efectua uma passagem dupla através do cristal. Por esse motivo para uma dada tensão aplicada a modulação obtida é dupla daquela que se obteria com uma passagem simples.

Como agora o feixe entra e sai do cristal segundo a mesma direcção torna-se impraticável o uso de um par polarizador-analisador para efectuar a conversão de modulação de fase em modulação de intensidade.

O feixe é polarizado num polarizador e passa em seguida, sem sofrer qualquer alteração num prisma de Rochon.

Quando a tensão aplicada produz à saida do cristal um feixe polarizado a 90° relativamente ao de entrada o prisma de Rochon deflecte o feixe para uma nova posição. Relativamente a esse ponto temos portanto a mesma situação que no caso anterior. Ausência de tensão aplicada *zero* uma vez que o feixe não vai lá ter, presença de tensão *um* (ver figura 4).

Finalmente tem interesse mencionar que devido à grande sensibilidade à temperatura da diferença de fase entre as duas componentes do feixe o cristal é conservado num forno com a temperatura variando menos de 0.025°C. Doutro modo o zero que se obtém na ausência de ten-

são transforma-se em um mesmo sem qualquer tensão aplicada.

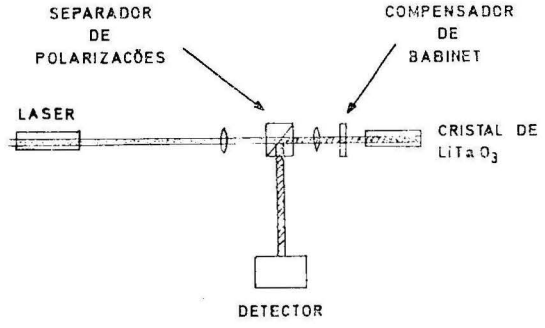


Fig. 4 — Dispositivo de modulação utilizando um cristal de $LiTaO_3$.

Falta apenas dizer que para um cristal com 20 mm de comprimento e distância entre os eléctrodos 0.25 mm a tensão necessária para passar de extinção a transmissão completa é da ordem dos 30 Volts.

5. O modulador electroóptico por difracção (EODM) (1)

Conforme já foi dito atrás ambos os moduladores considerados são essencialmente moduladores de fase que o par polarizador-analisador converte em moduladores de intensidade (2).

Seria interessante dispor de um modulador em que a modulação de intensidade se produzisse directamente num cristal electroóptico sem a intervenção de mais componentes. As vantagens seriam um sistema de ajustamento mais simples e além disso uma redução de atenuação introduzida pelo sistema na situação de transmissão completa (3).

Em 1967 o professor E. A. Ash do University College London [6] propôs um novo tipo de modulador que satisfaz a a estes requisitos. Tem além disso as vantagens de necessitar de uma tensão e potência de funcionamento pequenas e grande velocidade de operação.

Consideremos um cristal electroóptico em forma de lâmina conforme é representado na figura 5.

Em cada uma das faces maiores do cristal é depositada uma estrutura interdigital de eléctrodos metálicos. Quando não há tensão aplicada aos eléctrodos e o feixe à entrada é linearmente polarizado segundo uma das duas direcções de vibração possíveis o feixe à saída tem a mesma polarização e, ignorando perdas no interior do cristal, a mesma intensidade.

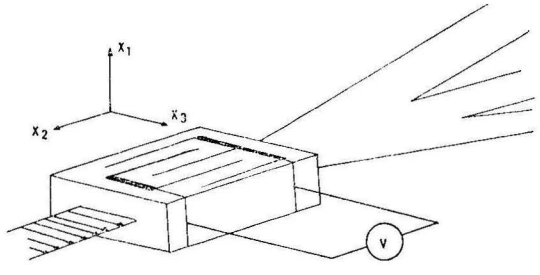


Fig. 5 — Modulador electroóptico por difracção.

Suponhamos agora que uma tensão é aplicada aos eléctrodos. No interior do cristal aparece um campo eléctrico (Fig. 6) espacialmente periódico. Na vizinhança

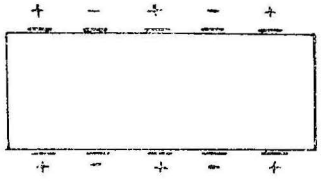


Fig. 6

do plano central do cristal o campo é muito aproximadamente horizontal devido à simetria do sistema de eléctrodos. Vamos

(1) EODM — Electro Optic Diffraction Modulator.

(2) Em rigor moduladores de amplitude. O uso de detectores sensíveis apenas à intensidade do feixe transforma-os para todos os efeitos em moduladores de intensidade.

(3) Insertion loss.

supor que o feixe do laser é focado de modo a propagar-se, no interior do cristal, na vizinhança do plano central. O campo eléctrico na região de interesse é responsável por uma variação do índice de refracção aproximadamente sinusoidal em torno do valor estático. Se nós considerarmos agora o que acontece a uma onda que se propaga ao longo do cristal vemos que algumas «porções» da superfície de onda vão mais depressa e outras vão mais devagar. Em consequência disso a superfície de onda, que à entrada do cristal era plana, torna-se corrugada, e se admitirmos que a variação do índice de refracção é sinusoidal a corrugação é também sinusoidal.

A consequência desta corrugação da frente de onda (1) é o aparecimento à saída do cristal de diversos feixes difractados separados por ângulos $\theta = \frac{\lambda}{P}$ em que λ é o comprimento de onda da luz e P o período da corrugação (ou da rede de eléctrodos o que é o mesmo). O aparecimento dos diversos feixes difractados vai diminuir a intensidade do feixe central. Fazendo variar a tensão aplicada deverá ser possível extinguir por completo o feixe central colocando toda a energia luminosa nos feixes laterais. Este é o fim que nos tínhamos proposto alcançar.

Para que tudo se passe como está descrito acima é essencial que o feixe luminoso se mantenha linearmente polarizado ao longo de todo o percurso no interior do cristal. O mesmo é que dizer as direcções de polarização no interior do cristal não devem ser alteradas pela aplicação do campo eléctrico. Esta condição impõe certas restrições na classe cristalográfica do material a utilizar.

Um dos materiais compatíveis com a condição acima é o niobato de lítio, $LiNbO_3$, que foi o escolhido por ser aquele dos fàcilmente obtíveis em que o efeito electroóptico era mais pronunciado.

Com tantalato de lítio dever-se-iam conseguir resultados substancialmente iguais mas em Inglaterra não era fácil obtê-lo.

As experiências realizadas com o primeiro modulador construído indicaram que a modulação era possível embora a «performance» fosse relativamente modesta essencialmente devido à elevada espessura do cristal (0.4 mm !). Um novo exemplar foi construído com cerca de 180 μm de espessura sendo os resultados obtidos bastante encorajadores.

Para remover por completo a luz do feixe central são necessários 25 V apenas obtendo-se um coeficiente de extinção (razão entre a luz total e a luz transmitida em extinção) de 25 dB (2).

A figura 7 mostra o perfil do feixe para diversos valores da tensão aplicada.

Para traçar estes gráficos aplica-se ao cristal a tensão desejada e faz-se deslocar através do feixe um fotodíodo que é movido por um pequeno motor. O motor actua também sobre um potenciómetro do qual é derivado um sinal relacionado com a posição do fotodíodo. Este sinal e aquele do próprio fotodíodo são aplicados respectivamente aos braços x e y de um traçador de gráficos.

Outras curvas que importa conhecer, e que são obtidas por um processo análogo, são as que relacionam a intensidade luminosa com a tensão aplicada para os diferentes feixes. O resultado está representado na figura 8.

As curvas da figura 7 são importantes para se conhecer a distribuição espacial dos feixes (verificando assim a relação $\theta = \frac{\lambda}{P}$) e dum modo imediato poder comparar entre si as suas intensidades.

---

(1) Já em 1896 o problema havia sido estudado por Lord Rayleigh para ondas acústicas.

(2) $1\ \text{dB} = \frac{1}{10} \log \frac{P_1}{P_2}$.

As curvas da figura 8 em especial a que se refere ao feixe central, permitem analisar o funcionamento do modulador

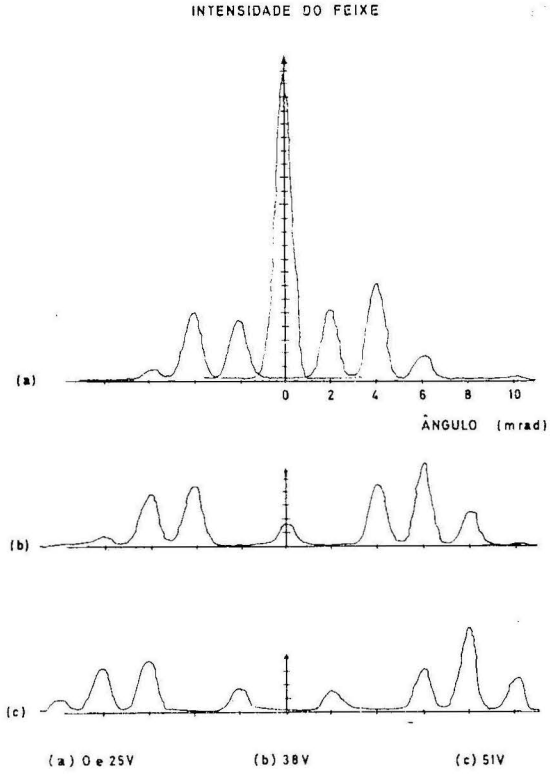


Fig. 7 — Perfil do feixe para diversos valores da tensão aplicada a um EODM.

e principalmente dimensionar novos aparelhos. Este segundo propósito é facilitado pelo facto de entre o máximo e o primeiro zero a curva da figura 8 (a) ser muito aproximadamente representada por uma função de Bessel J_0^2. É por este motivo possível determinar a tensão de extinção em função das características geométricas do modulador. É igualmente possível saber qual a percentagem de luz transmitida para um dado valor da tensão aplicada sem a necessidade de traçar a curva.

É interessante prever qual será a forma de onda modulada que se obtém quando ao modulador é aplicada uma tensão sinusoidal. Uma vez que no que respeita à intensidade do feixe tudo se passa do mesmo modo quer a tensão aplicada seja positiva ou negativa aquilo que se passa no primeiro meio período da tensão modulante repete-se no segundo meio período. Como consequência o feixe vai aparecer modulado a uma frequência dupla da aplicada. A forma de onda pròpriamente dita depende da amplitude da tensão modulante. Se esta for inferior à tensão de extinção a onda modulada é muito aproximadamente sinusoidal. Se a ultrapassar aparece uma «corcova» devido ao reaparecimento de luz no feixe central. Conforme novas tensões de extinção sejam atingidas teremos «complicações» adicionais na forma de onda. O que se passa está documentado nos oscilogramas da figura 9.

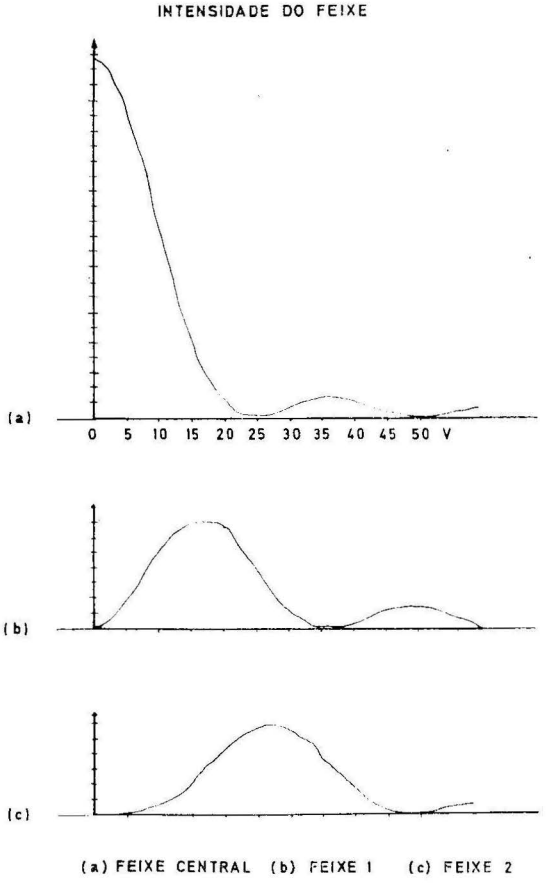
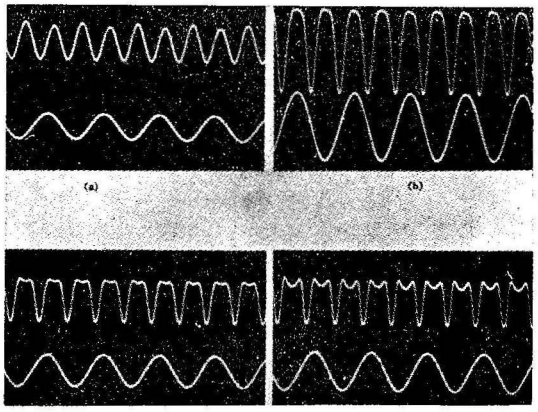


Fig. 8 — Característica de transferência de um EODM.

Ocorre neste momento perguntar se é possível evitar este efeito de duplicação da frequência de modo a usar o EODM como modulador analógico.



(c) (d)

Fig. 9 — Variação da forma de onda com a amplitude de modulação. Traço inferior: tensão de modulação; traço superior: modulação do feixe de luz. Tensão de modulação crescente de 20 a 70 Volt pico a pico.

Imaginemos que aplicamos ao cristal uma tensão contínua aproximadamente igual a metade da tensão de extinção. Se sobrepusermos a esta um sinal sinusoidal que na sua excursão não ultrapasse os extremos da curva o efeito de duplicação da frequência desaparece. Se além disso tivermos o cuidado de restringir essa excursão à parte «rectilínea» da característica o sinal modulado obtido é, a menos de uma distorção muito pequena, igual ao aplicado. A figura 10 comprova esta afirmação (distorsão total observada $< 3\,\%$).

É evidente por outro lado, que o preço a pagar por este melhoramento é uma redução da profundidade de modulação (1) que passa de 95 % para 65 %.

Fizeram-se também experiências com modulação por impulsos uma vez que esta parece ser a forma de transição a usar no futuro. Uma das vantagens do uso de impulsos é a maior resistência ao aparecimento de «ruído» (noise) no feixe óptico ao longo do seu percurso. Desde que os impulsos tenham uma amplitude suficiente é relativamente simples distinguir entre presença ou ausência de impulso. Outre vantagem é a possibilidade de usar o mesmo feixe para transmitir diversos canais de informação desde que o tempo que medeia entre dois impulsos consecutivos seja muito maior que a duração de um impulso. Quanto aos impulsos procura-se que sejam tão aguçados quanto possível, isto é, que tenham tempos de subida e descida pequenos e ainda pequena largura (2).

Com o EODM conseguiram-se tempos de subida da ordem do nano-segundo conforme a figura 11 mostra. É possível

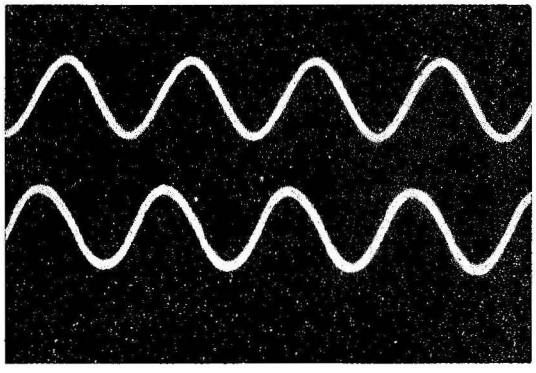


Fig. 10 — Funcionamento linear do EODM.

melhorar ainda estes valores e na realidade algo se conseguiu já nesse sentido. Não vamos no entanto entrar em pormenores a esse respeito.

Além de requerer uma tensão baixa para funcionar, a potência necessária é também reduzida. Uma outra vantagem, relativamente ao modulador descrito no

(1) Razão entre a amplitude da onda modulada e a da onda portadora não perturbada.

(2) Tempo de subida — intervalo de tempo entre 10 % e 90 % da amplitude total no começo do impulso; Tempo de descida — idem no fim do impulso. A largura do impulso é usualmente medida a meia altura.

número 4. é que o EODM é pràticamente independente de variações de temperatura. Isto deve-se ao facto de que ao contrário daquele no EODM apenas uma das

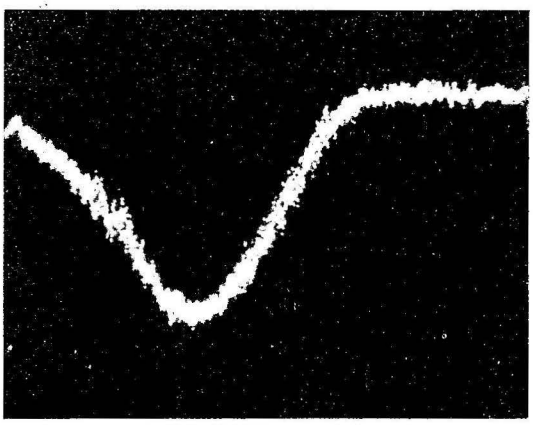


Fig. 11 — Resposta do modulador electroóptico a um impulso rápido. Tempo de subida cerca de 1 ns.

polarizações intervém. Experiências realizadas com esse propósito mostraram que uma variação brusca de 10°C da temperatura do cristal quási não afectava o coeficiente de extinção.

QUADRO I

Material usado	$LiTaO_3$	$LiNbO_3$	DKDP	$LiNbO_3$
Coeficiente de extinção dB	20		14	25
Tensão de extinção	30	800	45	25
Profundidade de modulação %		64	100	95
Potência mW/MHz	2.5	1800	60	7.6
Tempo de subida, ns	~1.5	10	10	1
Referência	2	9	10	EODM

Para se ter uma ideia das possibilidades do EODM quando comparado com outros moduladores recentes semelhantes basta consultar o quadro I.

Indicações pormenorizadas sobre a teoria do funcionamento e resultados experimentais podem ser encontradas nas referências [7] e [8].

REFERÊNCIAS

[1] A. JAVAN, W. R. BENNET JR', D. R. HERRIOT, *Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a helium-neon mixture*, Phys. Rev. Lett., **6**, 106-110, 1961.

[2] R. T. DENTON, T. S. KINSEL, *Terminals for a High-Speed Optical PCM Communication System, I/II. 224 Mbit/s Single Chanel/Optical Multiplexing and Demultiplexing* Proc. IEEE, **56**, 140-5/146-54, 1968.

[3] M. BORN and E. WOLF, *Principles of Optics*, Pergamon Press 1959 Chapter XIV.

[4] J. F. NYE, *Physical Properties of Crystals*, Oxford University Press, 1967.

[5] A. YARIV, *Quantum Electronics*, John Wiley and Sons Inc. New York, 1967.

[6] J. F. ST-LEDGER, E. A. ASH, *Laser Beam Modulation using Grating Diffraction Effects*, Electronics Lett. **4**, 99-100, 1968.

[7] M. A. R. P. de BARROS, M. G. F. WILSON, *Nanosecond Baseband Optical Diffraction Modulator*, Eleçtronics Lett., **7**, 267-269, 1971.

[8] ———, *High Speed Electro-optic Difraction Modulator for Baseband Operation*, Proc. IEE, **119**, 807-814, 1972.

[9] J. M. HAMMER, *Digital Electrooptic Grating Deflector and Modulator*, Appl. Phys. Lett. **18**, 147-9, 1971.

[10] W. J. RATTMAN, W. E. BICKNELL, B. K. YAPP, C. I. PETERS, *Broadband Low Drive-power Electrooptic Modulator*, IEEE J. Quantum Electron., **QE-3**, 550-4, 1967.



A FÍSICA FORA DO LABORATÓRIO

CONVITE AO LEITOR

No momento presente, as ciências da natureza atingiram um tal grau de evolução que provàvelmente não haverá nada a descobrir através da simples observação do que nos rodeia. Os mistérios da natureza encontram-se acessíveis apenas através de sistemas de observação, frequentemente muito complexos, desenvolvidos nos laboratórios de investigação. Ao nível do ensino secundário, e muitas vezes também no ensino superior, a preocupação de transmitir as conquistas da ciência moderna envolve o risco bastante grande de fazer supor que os objectos de aplicação dos conhecimentos científicos só se encontram nos laboratórios e ainda assim em remotos lugares do planeta. Uma insistência demasiada nestes aspectos, ou a falta de insistência na observação dos objectos que fazem parte da nossa vida diária, fàcilmente colocam a actividade científica numa perspectiva errada relativamente às restantes actividades humanas.

Muito provàvelmente poderemos supor com acerto que o ensino secundário deverá dar simultâneamente uma noção do método científico, uma ideia de conjunto do progresso científico, e uma explicação completa para a quase totalidade dos fenómenos que se manifestam na vida corrente e que são acessíveis pela observação e experiência directa.

Neste contexto não será razoável aceitar que no fim do ensino secundário da Física não se saiba como funciona um automóvel ou um telefone, uma televisão ou um rádio, ou o que mantém um avião no ar ou um barco na água, não se saiba interpretar o recuo duma espingarda ou o delicado balanço de energia num baloiço de criança ou porque o céu é azul e as nuvens brancas. Não será razoável aceitar que aqueles mais inclinados para as coisas científicas e que nessa altura tenham decidido enveredar por uma carreira de ciência, quer seja de investigação, quer seja de ensino, não tenham ainda construído um pequeno rádio ou um projector de slides ou um motor eléctrico ou um telescópio, ou um papagaio de papel, ou um modelo de avião com motor de explosão, ou não saibam afinar o carburador dum automóvel ou electrificar um candeeiro! Muitos professores se terão preocupado com estes aspectos do ensino e vivência da Física; alguns terão até levado os alunos para fora da sala de aula, para a natureza ao ar livre onde a diversidade de fenómenos é maior e daí o supormos que uma troca ampla de informação neste domínio resultará num benefício generalizado. Propõe-se pois que esta coluna esteja à disposição de todos, físicos e estudantes de Física, para que nela possam contribuir com a sua experiência de fenómenos naturais correntes ou menos correntes, com explicação ou sem ela.

Iniciando esta actividade apresenta-se hoje um fenómeno do segundo tipo, isto é, pouco vulgar, e que terá uma interpretação pouco trivial. Embora pouco vulgar não é no entanto nada recôndito ou elaborado. Trata-se simplesmente dum fenómeno observado num fontanário igual a tantos outros existentes nas nossas aldeias. Os que os conhecem bem, recordam-se que normalmente existe uma torneira cerca de um metro acima duma pedra bastante pulida pela quase constante exposição à água corrente e onde normalmente se poisa a cântara a encher. Abrindo a torneira de

modo que a água caia na pedra originam-se no embate inúmeras gotas minusculas que saltam em todas as direcções. Se o fundo do fontanário é escuro e o Sol iluminar fortemente as gotas, pelo contraste se visualisam fàcilmente as trajectórias desses pequenos projécteis líquidos. Essas trajectórias têm a forma parabólica, pelo menos à vista, que se espera de projécteis disparados no campo gravítico da Terra. Porém, facto curioso, quando observadas do lado do Sol, ou do lado oposto, todas as trajectórias se nos apresentam como linhas contínuas como era de esperar, enquanto que quando observadas numa direcção perpendicular à da iluminação se nos apresentam tracejadas, isto é, como uma sucessão de pontos luminosos mais ou menos espaçados conforme a direcção donde se observa.

Estou certo que esta observação intrigará muitos espíritos curiosos ao ponto de a procurarem repetir, até mesmo em casa, e sugerir uma interpretação. Cá esperamos as vossas notícias sobre estas tentativas assim como os vossos relatos doutros fenómenos curiosos observados na natureza apenas com o auxílio de objectos de uso corrente.

C. MARCIANO

NOTICIÁRIO

Sociedade de utilizadores de computadores DEC

Reuniu-se de 20 a 23 de Setembro, em Estrasburgo, o 8.º Seminário da Sociedade de Utilizadores de Computadores DEC(1) (DECUS). A reunião registou um número nunca antes atingido de participantes e de trabalhos apresentados, distribuidos pelos mais variados domínios de utilização: Biologia, Medicina, Psicologia, Ciências Pedagógicas, Química, Física Nuclear, Mecânica dos Solos, Controle de Processos Industriais, Comunicações, Transmissão de Dados, Indústria Gráfica, Computadores, etc..

Deve registar-se como nota importante o aparecimento dum número bastante elevado de comunicações sobre o sistema CAMAC. O sistema CAMAC é um sistema normalizado de módulos electrónicos para tratamento digital de informação, e desempenha neste campo um papel semelhante ao do sistema modular NIM no domínio da electrónica nuclear. O rápido incremento da utilização do sistema CAMAC ameaça tornar ràpidamente obsoletos os módulos de electrónica digital do sistema NIM, tais como contadores de impulsos («scalers»), comandos de impressão automática, etc.. O sistema CAMAC tem um papel bastante activo na ligação de equipamento experimental a computadores para controle em linha («on-line») permitindo a realização fácil de interfaces sem necessidade de apoio electrónico especializado. Neste tipo de utilização a operação de conjuntos de módulos CAMAC ligados ao computador pode ser controlada por programa, verificando-se já o aparecimento de linguagens apropriadas à exploração conveniente destes sistemas.

C. MARCIANO

(1) Digital Equipment Corporation, Maynard, Mass. EUA.

«Trends in Physics»

2.ª Conferência Geral da European Physical Society

Realizou-se de 3 a 6 de Outubro passado, em Wiesbaden (Alemanha) a 2.ª Conferência Geral da E. P. S., sob o título «Trends in physics».

Nela tomaram parte representantes de todos os países da Europa, sendo cerca de 1040 o n.º de participantes. Portugal esteve

representado pelo Prof. Cat. José Araujo (Porto) e pela Prof. Aux. Maria Tereza Gonçalves Ramos (Lisboa).

Realizaram-se 15 sessões plenárias, das quais citamos algumas: «A origem do Universo» (W. Kundt); «Desenvolvimento actual da Física das altas energias» (L. Van Hore); «Óptica não linear e impulsos luminosos» (W. Kaiser); «Aplicações de super condutividade» (B. B. Goodman); «Física e Sociedade» (H. B. G. Casimir); «Neutrões polarisados e núcleo: pseudomagnetismo nuclear» (A. Aliagam) «Átomos exóticos» (Telegdi); «O computador e o ensino da Física» (Y. de Corre).

Realizaram-se ainda diversas sessões parcelares simultâneas nos domínios da física atómica e molecular, física de plasmas, física nuclear, física de partículas e altas energias, física em astronomia, matéria condensada e baixas temperaturas, física computacional e electrónica.

Foi do maior interesse tomar contacto com os aspectos actuais da investigação nos vários domínios da Física e suas orientações futuras.

A par das diversas sessões foi ainda de grande utilidade a exposição de livros e aparelhos de física, com o mais recente material didáctico e de investigação científica.

M. T. R.

4.ª Conferência Internacional em Engenharia Criogénica

A «Fourth International Cryogenic Engineering Conference» realizou-se na Universidade de Tecnologia de Eindhoven, na Holanda, de 24 a 26 de Maio de 1972. Foi patrocinada pelos International Cryogenic Engineering Committee (ICEC), International Institute of Refrigeration e Universidade de Tecnologia de Eindhoven. Constou a conferência de sessões plenárias, sessões especializadas e seminários. Simultâneamente realizou-se uma exposição de material criogénico.

Antes de dar uma breve descrição das comunicações apresentadas sejam-me permitidos dois comentários marginais. O primeiro para constatar que, tendo sido o hélio primeiro liquefeito por Kamerlingh-Onnes, em Leyden, no ano de 1908 ainda não existe em Portugal nenhum liquefactor de hélio. Que o conhecimento deste atraso, desta situação de engeitado no desenvolvimento científico contemporâneo, nos anime para indagar das razões que o provocaram e nos aproveite para que, com entusiasmo e perseverança, nos lancemos na senda da investigação científica e tecnológica, via necessária para nos podermos realizar como Povo dos tempos que vão correndo. O segundo comentário decorre do modo como os participantes se distribuíam por nacionalidades: Holanda, 92; Alemanha, 84; Inglaterra, 78; França, 55; Estados Unidos, 30; Suiça, 22; Rússia, 19; Bélgica, 14; Japão, 12; Itália, 9; Suécia, 7; Checoslováquia, Finlândia, Hungria, Polónia e República Democrática Alemã, 4; Canadá, China e Noruega, 3; Áustria, Israel e Jugoslávia, 2; Dinamarca, Índia, Liechtenstein, Portugal e Roménia, 1. Não podemos deixar de tristemente anotar que a clivagem entre países ditos desenvolvidos e atrasados também é, nesta representação, por demais evidente para que se pretenda escamoteá-la. O voto ingénuo e interessado é de que os portugueses saibam e queiram, ainda nesta década de 70, saltar decididamente o fosso para o lado correcto.

As sessões foram ou plenárias, em que um cientista convidado apresentava uma panorâmica geral de um dos campos da criogenia, ou por especialidades. No final de cada uma destas últimas sessões, os autores das comunicações constituíam uma mesa com o respectivo presidente,

que funcionava de moderador. Deste método, que substituíu o da discussão separada das comunicações, resultou, no dizer geral, uma maior eficiência e uma maior clareza para as conclusões.

Da conferência, cujos discursos de abertura e fecho foram proferidos pelo Dr. K. Mendelssohn, F. R. S., presidente do ICEC, se dá seguidamente uma sucinta resenha, desdobrada por temas.

Refrigeração

Foram apresentados novos refrigeradores: um de néon a utilizar em vez do de hidrogénio, quando razões de segurança o aconselhem; um outro sem partes móveis com que se obtêm temperaturas entre 90 e 100 K, usando o processo de expansão em cascata incorporada (mistura de vários gases); um liquefactor de hélio com dois circuitos de gás independentes, podendo trabalhar ininterruptamente com uma elevada percentagem de impurezas; um refrigerador de hidrogénio para a região dos 20 K com um compressor de absorção térmica de $LaNi_5$ hidratado.

Foram propostas novas soluções em relação a refrigeradores e regeneradores. Assim, foram descritas: uma turbina de expansão de hélio com chumaceiras de gás; uma nova variante do tipo folha de permutadores de calor (temperaturas obtidas $\lesssim 50$ mK); um novo tipo de permutador para o refrigerador ^{3}He-^{4}He levando à redução da resistência de Kapitza; funcionamento em desequilíbrio dos regeneradores de um criogerador de Stirling, donde resulta um aumento de rendimento; utilização de um ejector de expansão com que se obtém num refrigerador a temperatura de 1,8 K.

Como usos da refrigeração foram apresentados: o turbo-expansor como ferramenta criogénica na indústria do petróleo e do gás, levando à extracção de etano e componentes mais pesados; um refrigerador para condensar o hidrogénio de uma câmara de bolhas, com 2 metros; um crióstato para o protótipo de um acelerador supercondutor de protões com 10 m de comprimento e outro para um separador de partículas com dois deflectores dos isótopos ^{3}He e ^{4}He, aproveitando o aumento considerável do factor de separação, abaixo do ponto $-\lambda$.

Foram comunicados resultados de medidas de interesse para o projecto de refrigeradores: diminuição da resistência de Kapitza entre o hélio líquido e um sólido por introdução de deslocamentos («dislocations») à superfície; arrefecimento por desabsorção de ^{4}He por zeólito sintético (temperatura final inferior a 1,8 K); características em função da temperatura, da transferência de calor e da fricção em filtros de rede utilizados como matrizes regeneradoras; uma solução teórica da transferência de calor por efeito de lançadeira («shuttle effect»).

Também o problema da termometria a muito baixas temperaturas foi abordado. Apareceu uma comunicação sobre o uso do efeito Mössbauer como termómetro primário no intervalo 13-200 mK (^{161}Dy: Dy e ^{151}Eu; EuS) e sobre o uso da pressão osmótica como termómetro secundário (20-300 mK).

Transferência de calor

Foram lidas comunicações tratando da disposição prática para o arrefecimento no vácuo de sistemas de grande entalpia (50 kg de cobre e 150 kg de mercúrio) e do melhor modo de realizar um bom contacto térmico entre uma resistência de carvão e uma pilha de CMN (nitrato de magnésio e cério) até temperaturas de 20 mK. Apresentaram-se medidas da condutibilidade térmica de misturas de pó não-metálico (quartzo, corundo, dia-

mante e vidro) com resina epoxi, verificando-se ser importante a adaptação acústica entre a resina e o enchimento; e ainda da resistência térmica entre um magnete supercondutor embebido em resina epoxi e filamentos de cobre, também envolvidos pela resina, mergulhados em hélio. A transferência de calor e de massa em evaporadores porosos e em transportadores de calor, bem assim ao estudo do fenómeno de arrefecimento em tubos, foi dedicada a devida atenção. Relativamente aos processos de ebulição de líquidos criogénicos expuseram-se trabalhos sobre: o estudo experimental da ebulição de freão-11 no intervalo de pressão 0,1-100 torr e no de temperatura 80-300 K; os estudos teórico e experimental de regime dispersivo com ebulição em filme de azoto líquido em tubos; e estudo de regimes transitórios de ebulição. É de importância fundamental o conhecimento do mecanismo da transferência de calor entre o hélio nas suas diferentes fases e outros materiais. Os coeficientes de transferência de calor de hélio em regime turbulento para hélio supercrítico mostram a sua semelhança com outros fluídos, como a água e o anidrido carbónico. Ainda se ouviram exposições sobre: o estudo da transferência de calor para hélio em ebulição em corrente forçada num tubo vertical; a correlação entre o estabelecimento da vaporização e o fluxo de calor em hélio-II saturado; e ainda o estudo da transferência de calor entre o vapor de hélio e sólidos a baixas temperaturas.

Supercondutores

O uso industrial de supercondutores em corrente alternada está fortemente dependente do valor das suas perdas. Foram apresentadas várias comunicações relativas ao assunto: comportamento de condutores submetidos a campos magnéticos alternados e percorridos por corrente contínua; igualdade do campo de primeira penetração em c. a. com o primeiro campo crítico; uma lei geral de perdas em função do campo magnético e da temperatura; e as perdas em ligas ternárias de Nb-Ti-Zr e num cristal simples de Nb. O comportamento de cabos com vários fios supercondutores foi apreciado: as perdas na matriz e nos fios foram calculadas e medidas, outro tanto acontecendo com a distribuição da corrente em fios supercondutores paralelos, no estado de Meissner. Foi estudada a estabilidade magnética de um cabo multifilar de Nb-Ti em função do revestimento de cobre e verificada a existência de um passo de transposição óptimo para um cabo nu de Nb-Ti.

A criogenia na indústria eléctrica

A necessidade de gigantescos valores de potência eléctrica para o funcionamento das sociedades muito industrializadas faz com que a criogenia seja chamada a ajudar a resolver problemas que, doutro modo, seriam talvez insolúveis. Vamos dar uma ideia do estado actual da tecnologia, através das comunicações apresentadas. Pensa-se que em França deverão estar a funcionar, por 1990, criocabos resistivos e supercondutores para transporte de potências entre 1000 e 5000 MVA. O uso simultâneo de canais para transmissão de fluidos criogénicos e arrefecimento de criocabos ou supercondutores está já em projecto para a solução do problema energético na região de Los Angeles. A armazenagem de energia eléctrica em gigantescas bobinas supercondutoras (10^8 joules) e o uso de supercondutores como interruptores estão já no campo das aplicações vindouras.

No domínio das máquinas supercondutoras existe já em serviço na central de

Fawley (Inglaterra) um motor de corrente contínua, encontrando-se presentemente em construção um gerador e um motor de c. c. para propulsão naval. As máquinas de c. a. encontram-se já em projecto. Novas formas geométricas para alternadores são agora possíveis, prevendo-se que estes passem a ser competitivos com os clássicos a partir dos 20 MW. É também encarado o uso de geradores de c. a. (400 Hz) em aviões, a partir de uma potência de 1MVA.

Outras aplicações da supercondutividade

Foram ainda comunicadas aplicações da supercondutividade em magnetes, aparelhagem científica e em comboios.

Quanto a magnetes escutaram-se comunicações referentes a medidas em três bobinas de Nb-Ti com forma e temperatura de funcionamento diferentes e ao projecto de bobinas supercondutoras para uso em magnetohidrodinâmica, numa câmara de bolhas de hidrogénio, em neurocirurgia e em experiências de polarização do spin do electrão. No domínio das medidas foram apresentados magnetómetros usando galvanómetros supercondutores com uma sensibilidade de 10^{-5} emu de campo magnético e medidores de gradiente magnético usando um SQUID («superconducting quantum interference device) com uma sensibilidade de 10^{-9} gauss/cm. A exclusão do fluxo e adicional modificação das linhas de força do campo magnético à custa de um tubo supercondutor de 4 cm de comprimento foi referida e bem assim um arranjo que permite a conversão directa de energia térmica em energia eléctrica por bombagem do fluxo magnético num supercondutor com temperatura oscilando em torno da temperatura crítica. Foi ainda citado o uso de Nb_3Sn nas superfícies de contacto de um interruptor de 100 A cuja resistência varia de 1 μ-ohm a ∞. O uso de supercondutores no sistema de suspensão de comboios de alta velocidade (500 km/h) foi largamente apreciado. As forças de suspensão e de travagem foram calculadas e medidas em modelos, tendo também sido estudada a qualidade da guia fornecida pelos magnetes. Estes deverão ser de peso reduzido, baixos e supercondutivamente estáveis. O projecto dos crióstatos merecem especial atenção bem assim o tipo de via: em chapa contínua ou em bobinas.

Materiais

Foram apresentadas medidas de propriedades físicas, em especial das mecânicas, de materiais isoladores (principalmente polímeros). Em relação ao aço inoxidável do tipo 304 foi exposto um teste de deformação a temperatura ambiente que permite predizer da estabilidade a baixas temperaturas (transição da austenite γ a α' com correspondente aumento de volume e aparecimento de ferromagnetismo). Foram ainda comunicados resultados relativos a cabos supercondutores feitos com Pb-40% Bi injectado em vidro poroso de 20 Å e estudos relativos ao fabrico dos supercondutores Nb_3Al e Nb_3AlGe.

Criobombagem

Foi apresentado um estudo sobre a distribuição do fluxo molecular no interior de uma câmara cilíndrica de simulação espacial provida de uma fonte esférica de gás. Foram fornecidos detalhes construtivos relativos a um sistema de distribuição para o arrefecimento de quatro criobombas, projectado de forma a obstar à propagação das vibrações mecânicas produzidas por uma máquina de Stirling. Interessante o estudo feito sobre a crio-

bombagem de hidrogénio devida à sua adsorção por gases condensados (argon, etano, amónia e anidrido carbónico) evidenciando a forte dependência da capacidade de adsorção das condições em que se realizou a condensação.

Criobiologia

Mostraram-se efeitos biológicos do abaixamento da temperatura e sua aplicação na conservação de células e tecidos. Foi descrito o modo como está já em prática o arrefecimento de orgãos (especialmente do fígado e do rim) para transplantação, e bem assim o uso de novas técnicas para armazenamento de pele e de córneas. O mecanismo da acção de agentes crioprotectivos foi explicado, com incidência especial no caso de espermatozóides (disseminação artificial) e no de glóbulos vermelhos. Foram dados exemplos de criocirurgia e um modelo de «bisturi» criocirúrgico foi descrito. Propriedades relevantes do gelo para a criobiologia foram apresentadas na gama de temperaturas entre 50 K e 273 K.

Tópicos especiais

Um problema de grande importância é o das futuras reservas de hélio. Nos Estados Unidos, que, importa dizê-lo, é o fornecedor de hélio para a Europa, trava-se celeuma entre os conservacionistas e a Administração Central. Existe legislação desde 1960 (Helium Act Amendment), estando prevista para breve uma alteração no sentido de uma maior liberalização do comércio de hélio. Sendo este extraído do gás natural, o modo como as reservas de hélio se esgotarão depende fundamentalmente da política energética. Daí o dizer-se que não há uma política para o hélio, mas sim uma política para a energia. Pretendem os conservacionistas que o gás natural seja consumido a um menor ritmo e que se comece desde já a investigar sobre métodos para extrair econòmicamente hélio da atmosfera.

Interessantes de citar são uma comunicação sobre a existência de uma massa crítica de misturas criogénicas para propulsão de foguetões e uma outra, relativa à utilização de azoto líquido, para a estabilização de solos.

Conclusão

Pretende-se fundamentalmente com esta exposição dar uma ideia dos problemas actuais e da linha de desenvolvimento da criogenia. O enunciado e descrição aqui apresentados foram excessivamente breves e resumidos a fim de transmitir uma ideia razoável das comunicações lidas na Conferência. Se, contudo, algum leitor estiver interessado em colher mais informações sobre qualquer dos temas aflorados, terei todo o prazer em fornecer bibliografia e prestar toda a outra colaboração que estiver ao meu alcance.

CARLOS SÁ FURTADO
Laboratório de Física
Universidade de Coimbra

NOTAS PARA OS AUTORES

A Gazeta de Física *convida os seus leitores a contribuir com originais para publicação. Embora o conteúdo dos trabalhos publicados seja da responsabilidade dos autores, os originais apresentados para publicação são prèviamente sujeitos a uma leitura crítica por um especialista da matéria versada. Os originais não publicados serão devolvidos e acompanhados da respectiva justificação.*

Recomenda-se aos autores que, na medida do possível, sigam as normas seguintes:

1 — Indicar, sob o título do trabalho, o nome dos autores na forma em que estes desejam subscrever a sua colaboração e, facultativamente, o nome da instituição a que eventualmente estejam ligados. Por outro lado, deverão sempre indicar o endereço para o qual serão enviadas as provas tipográficas.

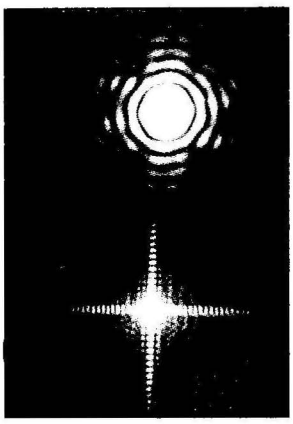
2 — Os originais deverão ser dactilografados a dois espaços.

3 — O texto e as figuras deverão ser apresentados sob forma definitiva para publicação. Não é desejável introduzir alterações profundas durante o processo de composição tipográfica. As provas tipográficas destinam-se a permitir aos autores a correcção de «gralhas» e, se estritamente indispensável, a introdução de ligeiras alterações ou adições.

4 — As figuras deverão ser executadas, separadamente, a tinta da china e com o rigor necessário à sua reprodução definitiva. Todos os seus detalhes, e os símbolos em especial, deverão ser de dimensões compatíveis com a redução a que a figura será sujeita para publicação, tendo em atenção que qualquer alteração numa figura implica a execução de uma nova fotogravura. Quando se trate de fotografias estas deverão ser a preto e branco sobre papel brilhante.

5 — Deverá ser apresentada, em separado, uma lista das figuras com as respectivas legendas.

A Gazeta de Física *oferecerá aos autores 50 separatas de cada artigo publicado. Para tal, os autores deverão solicitá-lo aquando da revisão das provas.*



GRAVURA DA CAPA

Figuras de difracção obtidas com um feixe laser por um grupo de alunos da cadeira de Física Laboratorial II da Faculdade de Ciências do Porto (1971/2). A figura superior representa a difracção do feixe laser através de um orifício circular; a figura inferior representa o mesmo fenómeno mas produzido por uma fenda quadrada.