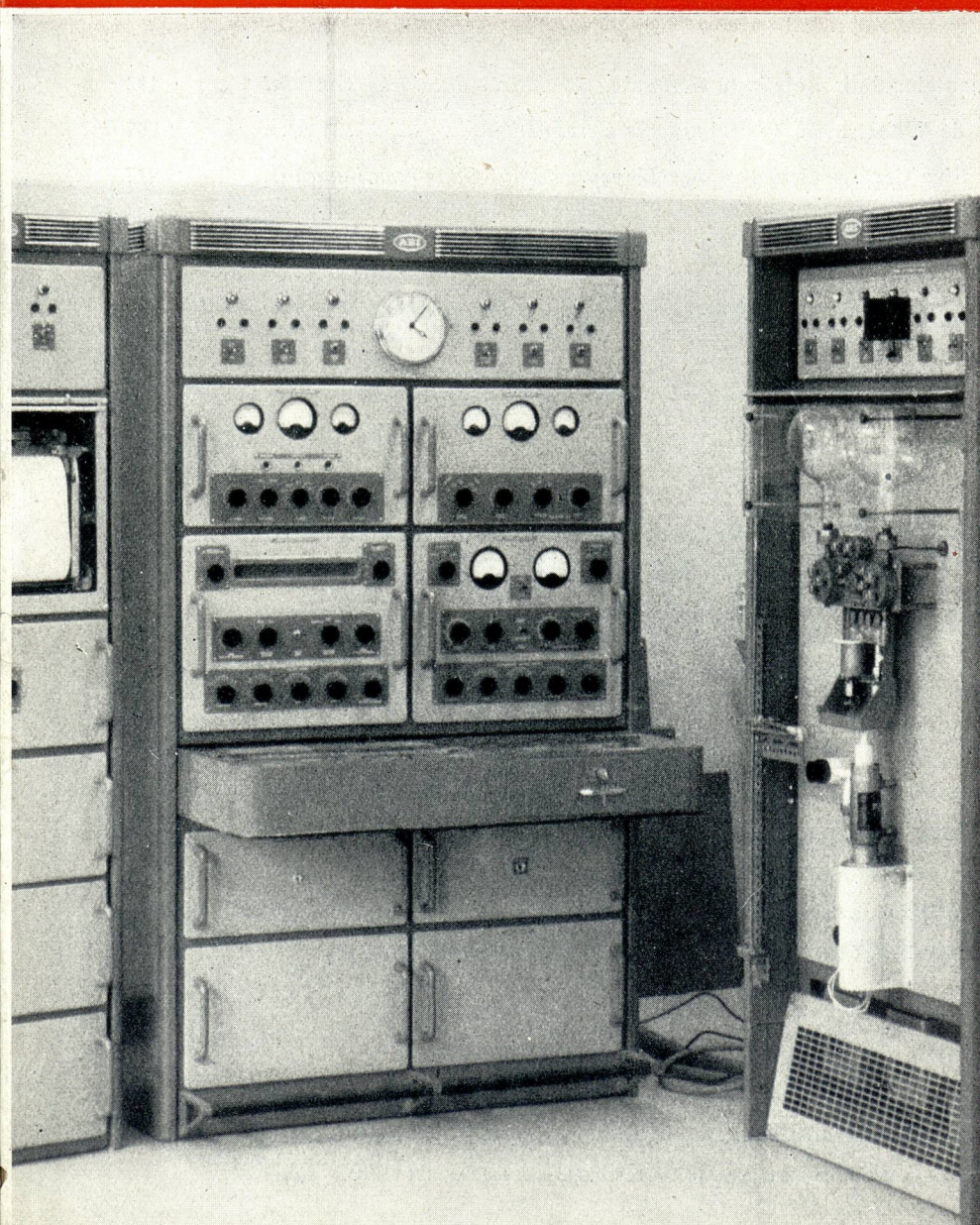


GAZETA DE FISICA

REVISTA DOS ESTUDANTES DE FÍSICA
E DOS FÍSICOS E TÉCNICO-FÍSICOS PORTUGUESES

VOL. IV, FASC. 7
JANEIRO 1964



Espectrômetro de Massa
MS2-SG do Laboratório
Calouste Gulbenkian de
Espectrometria de Massa e
Física Molecular—Comis-
são de Estudos de Energia
Nuclear—Instituto de Alta
Cultura

(Ver Noticiário)

VOL. IV

GAZETA DE FÍSICA

FASC. 7

JANEIRO — 1964

PUBLICAÇÃO TRIMESTRAL DESTINADA AOS ESTUDANTES DE FÍSICA E AOS FÍSICOS E TÉCNICO-FÍSICOS PORTUGUESES • VOLUMES PUBLICADOS :
VOL. I — 1946 A 1948 — IX FASCÍCULOS — 288 PÁGINAS
VOL. II — 1948 A 1953 — X FASCÍCULOS — 280 PÁGINAS
VOL. III — 1953 A 1960 — IX FASCÍCULOS — 276 PÁGINAS

S U M A R I O

Les vérifications expérimentales de la Relativité Générale, <i>por Marie-Antoinette Tonnelat</i>	193
Teoria e prática da ponte de Wheatstone, <i>por Rómulo de Carvalho</i>	207
Progressos recentes em Física Corpuscular, <i>por Max Hoyaux e Paul Gans (continuação)</i>	217
Noticiário	223
Boletim bibliográfico	224

A matéria de cada artigo é tratada sob a inteira responsabilidade do autor

COMISSÃO DE REDACÇÃO: — Rómulo de Carvalho — Lídia Salgueiro
— José V. Gomes Ferreira — Maria Helena Sampaio Carepa
— F. Bragança Gil — J. Sousa Lopes — Maria Teresa Gonçalves

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 4 NÚMEROS: PORTUGAL, ESC. 50\$00; ESTRANGEIRO, ESC. 70\$00 * DISTRIBUIÇÃO PARA AS LIVRARIAS: RUA DAS CHAGAS, 17-1.º, D, TELEFONE 366917, LISBOA



PARA VIAGENS
DE
NEGÓCIO
OU
TURISMO

dirija-se às Agências de Viagens

WAGONS-LITS // COOK

Mais de 400 filiais no mundo

EM PORTUGAL:

LISBOA — Av. da Liberdade, 103 — Telef. 36 15 21 (6 linhas)
— Hotel Ritz — R. Rodrigo da Fonseca, 86 — T. 68 06 32

PORTO — Rua Dr. Magalhães Bastos, 12
Telef. 250 40-3 14 78

COIMBRA — Edifício do Turismo — Largo da Portagem
Telef. 253 33-255 76

ESTORIL — Arcadas do Parque — Telef. 26 02 85

FUNCHAL — Av. Arriaga, 44 — Telef. 233 04

LUANDA — Avenida Marginal Paulo Dias de Novais
Caixa Postal 3500 — Telef. 40 68 / 9

LOURENÇO MARQUES — 49, Avenida da República, Edifício
Santos Gil — C. P. 1106 Telef. 36 66-67 56-68 88

TELEF. 77 66 82

Correia & Polónia, L.^{da}

- PAPELARIA
- TIPOGRAFIA
- ENCADERNAÇÃO
- E ARTIGOS DE ESCRITÓRIO

Rua Conde Sabugosa, 7-A (à Av. Roma)
LISBOA

LIVRARIA ESCOLAR EDITORA

SEDE: RUA DA ESCOLA POLITÉCNICA, 70
TELEFONE 66 40 40

SUCURSAL: CAMPO GRANDE, 111
TELEFONE 76 74 06

LISBOA

*Livros para o Ensino Universitário,
Liceal, Técnico e Primário*

NOVIDADES LITERÁRIAS

Rápido serviço de encomendas de livros

SECÇÃO DE PAPELARIA

*Material de desenho, canetas e artigos
de escritório*

DISCOTECA

Tipografia // Litografia // Encadernação

S O C I E D A D E
T I P O G R Á F I C A

«A Mundial»

LIMITADA

ESCRITÓRIO:

AVENIDA ALMIRANTE REIS, 45-A

TELEFONE 83 36 66

LISBOA 1

OFICINAS: NOVAS INSTALAÇÕES,
REGUEIRÃO DOS ANJOS, 36



CENTRO FORNECEDOR DE MÓVEIS

FABRICANTES

MÓVEIS E DECORAÇÕES

▲
Especializados em mobiliário
comercial

▲
Estudos e orçamentos em mobiliário
de qualquer estilo

Rua da Madalena, 112-1.º
Telef. 86 92 81 — LISBOA

Les Vérifications Expérimentales de la Relativité Générale

par MARIE-ANTOINETTE TONNELAT

(Institut Henri Poincaré — Paris)

Le mot de «Relativité», et surtout de «Relativité Générale», exerce encore sur bien des esprits des réactions passionnelles: On lui reproche un secret envoûtement de la physique par les mathématiques, ou bien encore on la soupçonne d'attirer les interprétations usuelles vers un terrain dangereux et peu fréquenté.

La Relativité Restreinte a triomphé aisément des apparents «paradoxes» que des adversaires de la première heure opposaient à ses principes. Aucun d'eux ne pouvait résister à la prévision d'une énergie atomique, d'une balistique corpusculaire et, dans un domaine plus théorique, à l'édification de la mécanique ondulatoire relativiste.

Par contre, les vérifications expérimentales de la Relativité Générale ont été liées pendant longtemps à un domaine très localisé. La raison en est aisément compréhensible:

Tant qu'ils'agissait de Relativité Restreinte, toute vérification expérimentale supposait l'intervention de vitesses non négligeables par rapport à celle de la lumière, c'est à dire de termes $\beta = \frac{v}{c}$ suffisamment grands.

Néanmoins, la Relativité Restreinte n'est pas la théorie d'un phénomène donné. C'est une

cinématique qui gouverne toute la Physique. Aussi les termes en β sont-ils appelés à modifier des énergies incomparablement plus grandes que l'énergie gravitationnelle.

Au contraire, la Gravitation appartient au domaine des *interactions faibles*. Si nous comparons, par exemple, l'intensité des forces coulombiennes et newtoniennes dans le vide

$$f_c = \frac{q q'}{r^2} \quad F_n = -G \frac{m m'}{r^2}$$

$$(G = 6,66 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^5 \text{ g}^{-1} \text{ s}^{-2}).$$

il vient

$$\left| \frac{F_n}{f_c} \right| = G \frac{m^2}{q^2} = \begin{cases} 2 \cdot 10^{-45} & \text{pour 2 électrons} \\ 7 \cdot 10^{-37} & \text{pour 2 protons} \end{cases}$$

Ainsi, sans même les comparer au domaine des hautes énergies, les actions gravitationnelles restent en général tout à fait négligeables devant les interactions électromagnétiques usuelles.

Les vérifications expérimentales spécifiques de la Relativité Générale se présentent toujours comme des écarts très faibles par rapport à la loi newtonienne d'attraction.

Pour qu'ils se manifestent, il faut disposer simultanément :

de sources extrêmement intenses
de détecteurs particulièrement stables.

Les sources du champ de gravitation, terre, soleil, étoiles de notre galaxie, nous sont imposées par la nature. Néanmoins, les progrès de l'observation (au mont Palomar notamment) agrandissent incomparablement les moyens d'investigation. On a pu observer des étoiles beaucoup plus denses que notre soleil (10^6 fois la densité de l'eau⁽¹⁾), les «naines blanches» (Sirius et son compagnon Sirius B, Eridanus B, etc.) qui produisent en leur voisinage un champ de gravitation tout spécialement intense. On a réussi enfin, ces temps derniers, à observer des radio-sources ou super-super novae qui engendrent des processus si exceptionnels qu'on a pu les qualifier de *collapse gravitationnel*⁽²⁾. Ces «objets» (on hésite à se prononcer sur leur nature) on fait l'objet du récent Congrès de Dallas.

D'autre part, les moyens de détection ont progressé ces dernières années de façon inespérée : les «masers» (ou horloges atomiques et moléculaires) constituent des sources particulièrement stables ; l'effet Mössbauer fournit des raies d'absorption extrêmement fines. On sait construire des gyroscopes précis et calculer l'influence qu'exerce sur eux un champ de gravitation donné. Enfin, on dispose de satellites qui permettent des expériences variées. On peut même nourrir l'espoir — encore bien aléatoire il est vrai — de produire, de détecter et peut être de stopper des «ondes de gravitation». Ces diverses possibilités ont conduit à un renouveau des études théoriques sur les phénomènes de gravitation et, par conséquent, sur la Relativité Générale.

(1) Une naine blanche dont la masse serait $\frac{1}{2} M_{\odot}$ aurait un rayon égal à $\frac{1}{100} R_{\odot}$.

(2) Une masse en se contractant beaucoup arrive à une masse critique qui entraîne l'explosion. Il en résulte une intense émission d'énergie.

En fonction du temps, le nombre des publications de Relativité Générale (ramené à un pourcentage fixe dans la littérature de Physique Théorique) peut se traduire par une courbe qui montre l'intérêt croissant de ces préoccupations

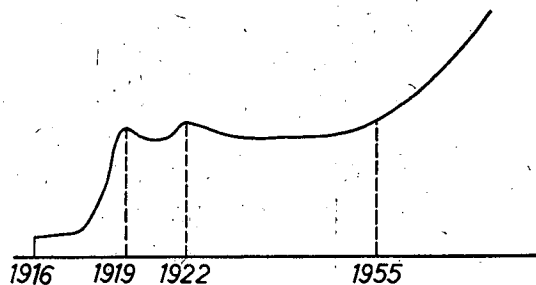


Fig. 1

I. RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE

1. Nécessité et caractéristiques de la Relativité Générale.

Les théories de la gravitation sont des théories jeunes.

Les Philosophes de l'Antiquité avaient construit à foison des systèmes du monde : il s'agissait d'expliquer les mouvements apparents des sphères par un vaste système d'horlogerie. Les épicycles, les déférents en formaient les rouages compliqués. Néanmoins, aucune *contrainte* c'est à dire aucune force spécifique n'intervenait dans ce vaste édifice. Les astres étaient animés de mouvements parfaits qui ne supposaient aucune explication extrinsèque. D'une manière analogue, le mouvement rectiligne et uniforme d'un point matériel libre ressort d'un simple Principe (le Principe d'inertie). Il s'agissait d'une vaste «inertie circulaire», sans contrainte, d'une immense cinématique. Nous allons voir jusqu'à quel point la Relativité générale reprend ce thème explicatif.

Newton qui se méfiait ouvertement des hypothèses mais se référait ostensiblement

aux lois devait fonder les « théories de la gravitation ». La grande synthèse entre pesanteur et attraction universelle fut réalisée d'emblée sous l'égide d'une loi de force quantitative. Elle en reçut son inébranlable solidité.

A la fin du XIX^e siècle, l'application de la loi newtonienne d'attraction à la Mécanique Céleste permettait, selon Henri Poincaré, de considérer l'objet de cette science comme une immense vérification de la loi newtonienne. Les rares discordances expérimentales concernaient presque toutes le mouvement des grosses planètes, singulièrement de la planète Mercure. Celle-ci, dans son mouvement autour du soleil, décrit une ellipse qui ne se referme pas exactement sur elle-même en raison des influences perturbatrices des autres planètes. Le périhélie de la trajectoire présente ainsi une avance séculaire que l'expérience fixe à 572 secondes d'arc mais que les tables newtoniennes évaluent à 530 secondes d'arc. Il en résulte une avance résiduelle de $572 - 530 = 42''$ d'arc non prévue par les tables. Cette avance séculaire que Le Verrier (1850) estimait déjà à $38''$ d'arc est donc très voisine de $42''$ (mesures de Newcomb) et, d'après les dernières estimations de Clemence, est de $43''$.

Bien entendu, on peut attribuer cette discordance à la présence d'un phénomène accessoire qui aurait échappé à l'expérience: anneau de petites planètes intramercurielles (Le Verrier), non sphéricité du soleil, lumière zodiacale (Seeliger). Malheureusement, de telles propriétés n'ont jamais été décelées et, si elles existaient, elles entraîneraient des perturbations désastreuses pour la prévision du mouvement des autres planètes.

On a donc préféré, pendant un temps, modifier la loi de Newton au moyen de « coups de pouce » judicieusement choisis. L'avance correcte s'obtiendrait en effet en substituant à la loi d'attraction en $\frac{1}{r^2}$ une loi en

$\frac{1}{r^n}$ où n serait voisin de 2 ($n=2,000\,000\,16$).

On peut aussi prévoir des termes correctifs

petits ($e^{-\alpha r}$) (loi de Hall, loi de Descombes, loi de Laplace). Malheureusement, ces modifications entraînent elles aussi des difficultés pour les autres prévisions. Enfin l'avènement de la Relativité Restreinte allait exclure de simples « coups de pouce » au formalisme newtonien.

La Relativité Générale est semblable à une face de Janus. Elle présente deux aspects qui sont a priori tout à fait distincts :

D'une part, elle constitue, comme son nom l'indique, une extension du Principe de Relativité Restreinte.

D'autre part, elle se propose comme une théorie fondamentale du champ de gravitation.

En principe ces deux rôles sont complètement disjoints. Je n'ai pas à justifier ici les bases de la Relativité Générale. Néanmoins, il m'est impossible d'évaluer la portée des vérifications expérimentales sans examiner quelles hypothèses elles vérifient, et jusqu'à quel point ces hypothèses sont nécessaires.

La Relativité Générale peut s'exprimer sous la forme d'un syllogisme fondamental que j'énoncerai de la façon suivante :

1) *Majeure* — L'énoncé d'un Principe de Relativité valable pour des mouvements accélérés locaux exige, pour raccorder chaque description locale, une géométrie globale non euclidienne — c'est à dire le *Principe de Relativité généralisée*. Autrement dit, il est équivalent *localement* de traduire les mouvements accélérés par l'existence de forces d'inertie (force de Coriolis, etc.) ou par l'hypothèse d'un mouvement « libre » dans un espace non euclidien

forces d'inertie ~ structure non euclidienne

2) *Mineure* — Or, il existe une équivalence locale entre forces d'inertie et forces de gravitation. Cette équivalence est autorisée par la proportionnalité expérimentalement constatée entre masse inerte (qui intervient dans $f = m\gamma$) et masse grave (qui inter-

vient dans $F = -K \frac{MM'}{r^2}$, $\frac{M}{m} = c^{(e)}$. Cette équivalence est purement *locale*.

forces d'inertie ~ forces de gravitation

3) *Conclusion* — Donc il existe une équivalence locale entre les effets dus aux forces de gravitation et ceux que produirait l'introduction de structures non euclidiennes. Cette équivalence est aussi, bien entendu, purement *locale*.

Forces de gravitation ~ structure non euclidienne

2. Deux remarques.

Pour le moment, j'insisterai seulement sur deux aspects des liens entre Principe de Relativité généralisée et Principe d'équivalence.

a) *Caractère local* — L'un et l'autre présentent un caractère purement *local*. Le mouvement libre dans l'espace non euclidien est localement équivalent à l'introduction de forces d'inertie. Cette équivalence *locale* est très exactement décrite par l'équivalence des descriptions sur une surface et sur son plan tangent.

Le Principe d'équivalence permet de compenser et, au besoin, d'annuler les forces de gravitation par un mouvement accéléré convenablement choisi. On connaît l'exemple classique de l'ascenseur tel que le présente Einstein : Une balle abandonnée sans vitesse initiale au milieu d'un ascenseur en chute libre ne «tombe pas» par rapport aux parois de l'ascenseur. Si l'ascenseur éprouve une accélération supérieure à g et de haut en bas, la balle va se coller au plafond. Ces exemples inhabituels en 1913 nous sont devenus familiers depuis Gagarine et Valentina.

Néanmoins, cette équivalence reste *locale* : les lignes de force du champ d'accélération restent parallèles tandis que celles du champ

de pesanteur convergent au centre de la terre. Si deux balles étaient abandonnées sans vitesse initiale dans un ascenseur assez vaste qui s'enfoncerait en chute libre vers le centre de la terre, on les verrait s'avancer l'une vers l'autre, sans «tomber», comme s'il s'exerçait quelque mystérieuse attraction mutuelle.

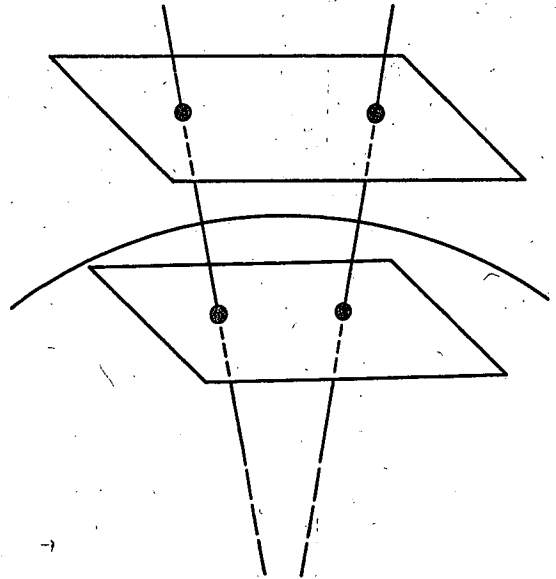


Fig. 2

b) *Caractère non euclidien* — On a dit quelquefois que certaines expériences ne prouvaient pas la Relativité Générale en tant que théorie non euclidienne du champ de gravitation mais qu'elles prouvaient *seulement* la validité du Principe d'équivalence.

Ce faisant, on semble affirmer que le Principe d'équivalence est une étape nécessaire mais non suffisante sur le chemin d'une théorie non euclidienne de la gravitation.

Or, que le Principe d'équivalence soit nécessaire pour la constitution d'une théorie euclidienne de la gravitation est un fait certain. Mais c'est précisément le Principe d'équivalence lui-même qui entraîne vers le non euclidien l'interprétation des phénomènes de gravitation.

Autrement dit, sans principe d'équivalence, une théorie de la gravitation relativiste

au sens restreint peut être parfaitement euclidienne. Ce sera une théorie phénoménologique comme l'est, par exemple, la théorie de Maxwell.

Dès que l'on admet le Principe d'équivalence, la gravitation est assimilée aux effets d'inertie. Or ces derniers ne peuvent bénéficier d'une extension du Principe de Relativité Restreinte qu'en effectuant un raccord des descriptions locales par l'intermédiaire d'un espace non euclidien. Ainsi, en admettant le Principe d'équivalence joint à un Principe de Relativité généralisée, les théories de la gravitation sont ipso facto entraînées vers le non euclidien.

C'est donc l'assimilation aux effets d'accélération qui nécessite l'intervention du non euclidien bien loin d'en dispenser.

3. Identité masse grave-masse inerte.

Le Principe d'équivalence lui-même repose sur la proportionnalité expérimentalement constatée entre la masse inerte et la masse grave, l'une intervenant dans la loi fondamentale de la dynamique, l'autre dans la loi newtonienne d'attraction

$$\left\{ \begin{aligned} f &= m \gamma \rightarrow \gamma = \frac{M}{m} \text{ grad } U \\ f &= -K \frac{M M'}{r^2} = M \left(K \frac{M'}{m'} \right) \text{ grad } U \\ &\quad \left(U = \frac{G m'}{r} \right) \end{aligned} \right.$$

(Au contraire pour les forces électromagnétiques $\gamma = \frac{q}{m} \text{ grad } V$).

$$\text{Si } \frac{M}{m} = C = c' \text{ universelle } \rightarrow \gamma = \text{grad } U$$

en choisissant $K C^2 = G$.

On a longtemps admis comme un fait d'expérience évident la proportionnalité universelle entre masse grave et masse inerte. Depuis les expériences de Galilée et de Newton, de nombreuses vérifications de type

pendulaire avaient été effectuées (Foucault, Southern et Zeemann) puis, surtout, les célèbres expériences d'Eötvös confirmées par Renner en 1935. Néanmoins la précision annoncée pour ces expériences

$$\frac{\Delta m}{m} \leq 10^{-8}$$

a été récemment contestée par R. H. Dicke⁽¹⁾ qui a entrepris des expériences aussi rigoureuses que précises sur ce classique sujet. Il est indispensable d'en dire quelques mots puisque les vérifications de la relativité générale supposent la vérification d'une équivalence de fait qui doit être érigée en équivalence de principe.

Au lieu de comparer la masse inerte qui intervient dans le mouvement de rotation diurne ($f = m \omega^2 r$) à la masse grave impliquée par la pesanteur, R. H. Dicke⁽²⁾ substitue à cette dernière l'attraction exercée par le soleil.

Considérons en effet un équipage formé par 2 corps c_1 et c_2 suspendus aux extrémités d'une potence que, pour simplifier, nous supposons située au pôle. Avec la terre, c_1 et c_2 « tombent » sur le soleil. D'autre part, la rotation de la terre imprime à ces corps d'épreuve une vitesse ω angulaire égale à la rotation de la terre et des vitesses v_1 et v_2 diamétralement opposées.

Dans ces conditions, le corps c_1 s'approche du soleil et le corps c_2 s'en éloigne tandis qu'à 12 h d'intervalle la situation est inversée. Les vitesses angulaires restent, en principe, égales à la vitesse ω de la terre.

(1) Selon R. H. Dicke, la seule présence du Baron Eötvös au voisinage de l'appareil était susceptible de créer une perturbation 200 fois plus grande que la marge d'erreur annoncée.

(2) R. H. Dicke — New research on old gravitation (Science-1959, 129, 621).

The Eötvös Experiment — Scientific American, Dec. 1961, 84.

Gravitation, an Enigma (J. Wash. Acad. Sc. 1958, 48, p. 213).

Gravitation without a Principle of Equivalence — (Rev. Mod. Phys. 1957, 29, 363).

L'attraction solaire s'exerce d'autre part sur c_1 et sur c_2 . Supposons que c_1 soit plus fortement attiré que c_2 (c'est-à-dire que $\gamma_1 > \gamma_2$). Dans ce cas c_1 sera plus fortement accéléré dans son approche que c_2 ne sera freiné dans son éloignement : d'où une vitesse angulaire de l'équipage $\omega_1 > \omega$. Au contraire, douze heures plus tard, c_1 est plus fortement freiné dans son éloignement que c_2 n'est accéléré dans son approche. Il en résulterait une vitesse angulaire $\omega_2 < \omega$.

S'il existait une différence dans le rap-

$$\frac{\Delta m}{m} \leq 10^{-10}$$

port masse grave-masse inerte est purement locale au strict point de vue de l'expérience. Le rapport $\frac{M}{m}$ est, en un lieu donné, indépendant du corps d'épreuve. En faire une constante universelle dépasse, en fait, les résultats d'expérience. En particulier, Dirac et Dicke lui-même ont envisagé des variations corrélées de la cons-

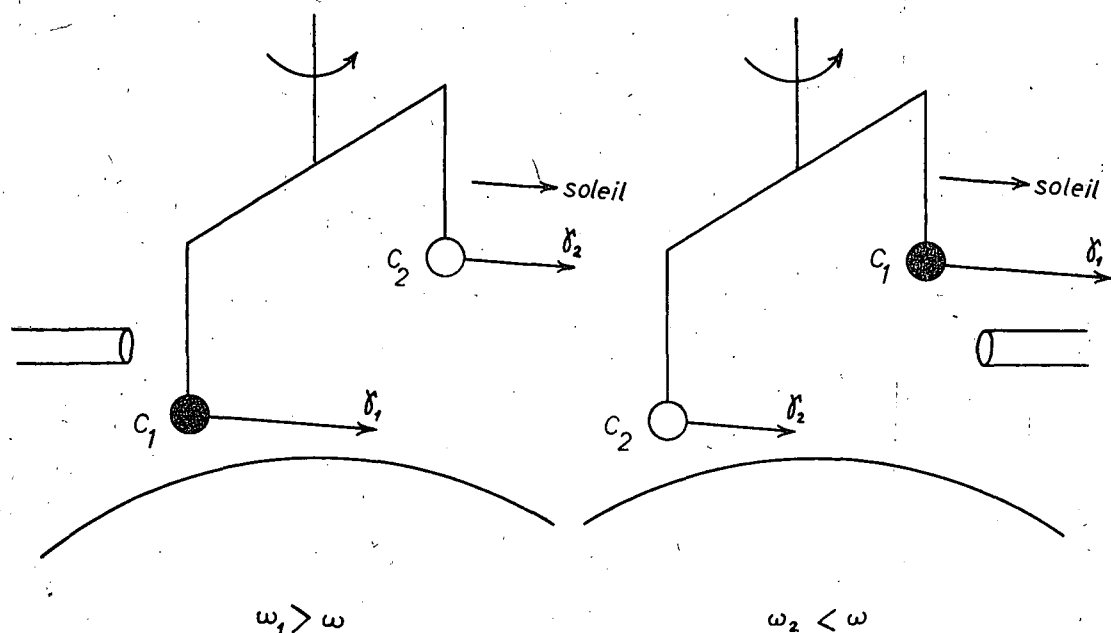


Fig. 3

port masse grave-masse inerte pour c_1 et pour c_2 on devrait donc observer une variation diurne de la vitesse angulaire de rotation de l'équipage. Aucune fluctuation n'étant observée, R. H. Dicke en conclut à la validité des conclusions sinon des prémisses des expériences d'Eötvös.

La grande précision atteinte par ces expériences (dispositif à trois corps) permet de conclure à la proportionnalité des masses (c'est à dire à leur identité pour des unités convenablement choisies) avec une marge d'erreur

tante de gravitation et de la constante de structure fine. Elles obligeraient à définir une énergie interne d'une particule qui serait fonction du potentiel de gravitation au point considéré. Dans ces conditions, la masse inerte qui intervient dans l'expérience d'Eötvös serait différente de la masse $\bar{m} = \frac{E}{c^2}$ qui résulte, par exemple, de bilans d'énergie nucléaire

$$m = \bar{m} + U \frac{\partial \bar{m}}{\partial U}$$

Les comparaisons effectuées en mesurant m_i au spectrographe de masse, \bar{m} par des litans d'énergie n'ont encore donné aucun résultat très concluant.

II. LES PRÉVISIONS DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE.

Je rappellerai seulement que les prévisions expérimentales qu'elle introduit sont déduites

1) d'une loi de champ qui se présente comme une condition de structure imposée à la courbure d'un univers non euclidien

2) des lois du mouvement qui assimilent les trajectoires d'une particule aux lignes les plus droites, c'est-à-dire aux géodésiques d'un espace non euclidien. (Les grands cercles d'une sphère, par exemple). En effet, le

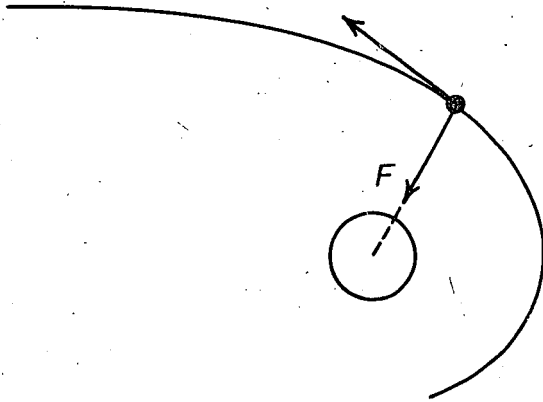


Fig. 4 — Newton: Le corps central exerce des «forces».

rôle des sources, c'est-à-dire des masses, n'est pas de créer des actions à distance mais de courber l'univers en leur voisinage. Dans cet univers courbe, une particule matérielle ou bien un photon se meut ensuite librement et décrit la généralisation d'une droite, c'est-à-dire une géodésique.

Ces conceptions de type cinématique (mais impliquant une cinématique non euclidienne) modifient complètement les postulats newto-

niens. Une vérification expérimentale aura donc d'autant plus de prix qu'elle résulte d'un bouleversement total des principes de base.

Supposons le champ de gravitation créé par une masse statique possédant la symétrie sphérique (soleil etc.). D'après la mécanique newtonienne, les trajectoires rapportées à un système de coordonnées polaires $u = \frac{1}{r}, \theta, \varphi$ s'écrivent

$$(1) \quad r^2 \frac{d\varphi}{dt} = h$$

$$(2) \quad \frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u = \frac{Gm}{h^2}.$$

La première est la loi de Kepler (loi des aires), h la constante des aires. La seconde détermine le rayon vecteur $r = \frac{1}{u}$ en fonction de l'angle φ .

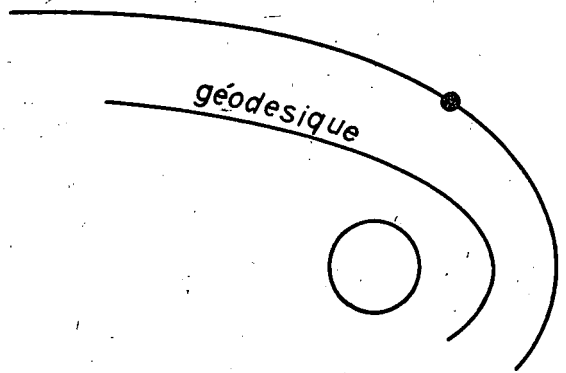


Fig. 5 — Einstein: Le corps central courbe l'univers en son voisinage.

Les géodésiques d'un espace de Riemann, dans le cas particulier où la structure de cet espace est déterminée par une masse statique possédant la symétrie sphérique, ont la forme suivante

$$(1)' \quad r^2 \frac{d\varphi}{ds} = \frac{h}{c} \quad ds \sim c dt$$

$$(2)' \quad \frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u = \frac{Gm}{h^2} + \frac{3Gm}{c^2} u^2.$$

Elles s'appliquent aux trajectoires d'une particule d'épreuve comme à celle d'un photon. Les corrections par rapport aux prévisions newtoniennes résulteront donc du terme supplémentaire petit $\frac{3 G m}{c^2} u^2$.

A. MOUVEMENT DES PLANÈTES ET DES SATELLITES.

1. Mouvement des planètes et des satellites, sans tenir compte des rotations propres (Champs statiques).

S'il s'agit du mouvement d'une planète ou d'un satellite l'équation newtonienne (2) admet comme solution l'ellipse

$$(3) \quad u_0 = \frac{Gm}{h^2} [1 + e \cos(\varphi - \bar{\omega})]$$

les constantes d'intégration e et $\bar{\omega}$ représentent respectivement l'excentricité et la longitude du périhélie.

La Relativité Générale prévoit, par l'intermédiaire de (2'), des solutions approchées

$$(3') \quad u = \frac{1}{p'} [1 + e \cos \chi]$$

dans lesquelles le paramètre $p = (1 + \varepsilon)p'$ et l'angle $\chi = (1 - \varepsilon)(\varphi - \bar{\omega})$ diffèrent peu du paramètre $p = \frac{h^2}{Gm}$ et de l'angle $\varphi - \bar{\omega}$

des orbites newtoniennes. Une méthode de perturbation permet de déterminer ε en fonction des caractéristiques de l'orbite et la précision spécifique $\Delta \varphi = 2 \pi \varepsilon$ pour chaque révolution de la planète. On obtient en effet

$$(4) \quad \Delta \varphi = 2 \pi \varepsilon = \frac{6 \pi G m}{a c^2 (1 - c^2)} \text{ radians}$$

($a = 1/2$ grand axe).

Cette précision spécifique entraîne la valeur séculaire

$$\Delta \Omega = \Delta \varphi \frac{100 A}{T} \text{ radians} \quad (100 A = 36.525)$$

$A = 365,25$ représentant la période de révolution de la terre autour du soleil et T celle de la planète, l'une et l'autre en jours sidéraux. Transformée en secondes d'arc cette avance séculaire s'écrit encore

$$(5) \quad \Delta \Omega'' = \frac{30 G M A}{a T c^2 (1 - c^2)} 60^4$$

Il est souvent avantageux de remplacer M par sa valeur en fonction de a et de T . Dans ce but, on utilise la 3ème loi de Kepler

$$(6) \quad a^3 = \frac{G M}{4 \pi^2} T^2 = \frac{G M}{4 \pi^2} T^2 \cdot 24^2 \cdot 60^2$$

et l'on obtient, en portant dans (5),

$$(7) \quad \Delta \Omega'' = \frac{5 \pi^2 a^2 A}{24 c^2 T^3 (1 - c^2)}$$

a) *Application aux planètes* — Dans le cas particulier où le champ de gravitation est créé par le soleil, on obtient à partir de (4)

$$(8) \quad \Delta \varphi'' = \frac{57,348 \cdot 10^{10} M_{\odot}}{a (1 - c^2)} = 1,983 \cdot 10^{35} \quad G = 6,66 \cdot 10^{-8}$$

L'avance du périhélie est d'autant plus grande que a est plus petit et e voisin de l'unité. Ces conditions sont réalisées pour la planète Mercure telle que

$$a = 5,72 \cdot 10^{12} \text{ cm}, \quad e = 0,2056, \quad T = 87,97 \text{ j.}$$

On obtient ainsi une prévision théorique

$$\Delta \Omega = 42'' 9$$

très voisine de la valeur

$$42'' 56$$

expérimentalement mise en évidence.

Or cette valeur est obtenue avec une précision indiscutable: la théorie newtonienne du mouvement de Mercure a été reprise complètement par Clemence en 1949 (1). Il a utilisé, dans ce but, la méthode de Newcomb en discutant toutes les données sur la planète Mercure données enregistrées de 1765 à 1937. Clemence a discuté ensuite (1947) la portée des comparaisons entre théorie et expérience. Leur caractère significatif est hors de doute.

Une méthode analogue a été appliquée par Morgan (1945) (2) à la précession du périhélie de la terre et, plus récemment, par Duncombe (1958) (3) au mouvement de Vénus. Les résultats comparés sont les suivants

Planètes	a (10 ⁶ km)	e	T jours sid ^e	$(\Delta\Omega)_{100}$ calc.	$(\Delta\Omega)_{100}$ obs.
Mercury	58	0,2056	87,97	42'' 9	42'' 56 ± 0'' 94
Venus				8'' 6	8'' 4 ± 4'' 8
Terre	149,5	0,0167	365,25	3'' 84	4'' 6 ± 2'' 7
Mars	227,8	0,0934	686,98	1'' 35	

En dépit de la faible excentricité terrestre les dernières comparaisons semblent assez convaincantes.

Pour confirmer ce genre de vérification, on s'est adressé récemment à l'astéroïde Icarus. Découvert en 1949 au Mont Palomar, cet astéroïde a 1,4 km de diamètre. Sa trajectoire possède les caractéristiques suivantes

$$a = 1,6 \cdot 10^{15} \text{ cm}, \quad e = 0,8265, \quad T = 408,65 j.$$

Elle présente donc une énorme excentricité. (Icarus se rapproche à 28 M. de km du soleil, alors que Mercure au périhélie en est distant

(1) G. M. Clemence — The Relativity effects in planetary motions. Rev. Mod. Phys. **19**, 1947, 361; Proc. Ann. Phil. Soc. **93**, 1949, 532.

(2) H. R. Morgan. The Earth's perihelion motion. Astr. J. J. 1945, 127.

(3) R. L. Duncombe — Relativity effects for the three inner planets (Astr. J. **61**, 1958, 456).

de 46 M. de km). Gilvarry a calculé (1953) (1) une précession théorique du périhélie

$$\Delta\Omega = 10'' 05.$$

Malheureusement, cet astéroïde dont l'éclat atteignait la 16^e magnitude en 1949 fut retrouvé en 1950 et en 1952 avec un éclat diminué jusqu'à la 19^e magnitude. Ce type d'expérience est donc fugitif. Gilvarry et La Paz ont proposé l'utilisation — non encore réalisée — d'une planète artificielle.

b) *Application aux satellites* — La vitesse V d'un satellite sur son orbite est relativement faible. Aussi la précession $\Delta\varphi$ du périhélie reste petite au cours d'une révolution. Toutefois, la période de révolution des satellites proches demeure, elle aussi, très faible (2). Il est donc possible, en principe, d'observer un effet notable en un temps relativement court. Cet effet sera d'autant plus grand que l'excentricité de la trajectoire sera plus forte. Par exemple, tandis que l'avance séculaire du périhélie de la lune (3) est seulement

$$\Delta\Omega = 0'' 06 \quad (\text{valeur théorique}),$$

celles des périhélie des satellites proches pourraient atteindre

$$\Delta\Omega \sim 2000''.$$

Malheureusement, l'effet de précession du

(1) J. J. Gilvarry — Relativity Precession of the astéroïd Icarus. Pub. Astr. S. Pacific **65**, 1953, 173.

(2) J. J. Gilvarry — Vérification of General Relativity by means of Artificial Planets (Nature **183**, 1959, 666); La Paz (Publ. Astr. Soc. Pacific **66**, 1954, 13).

(3) Actuellement nous pouvons adopter, par exemple, les caractéristiques suivantes à titre d'ordre de grandeur

$$V < 8 \text{ km/s} \quad \text{distance moyenne satellite-terre} = 10^9 \text{ cm}, \quad e = 0,25, \quad T = \frac{1}{6} j.$$

Elles conduisent à une avance théorique

$$\Delta\Omega \approx 600''.$$

périgée d'un satellite (effet expérimentalement constaté) peut être attribué à de nombreux phénomènes perturbateurs. Déjà, dans le cas des planètes, l'effet global observé est dû, pour sa quasi-totalité, à l'influence perturbatrice des astres voisins. Par exemple, dans le cas de Mercure, l'effet relativiste (43'') n'est pas le 1/10 de l'effet total (572''). Cependant, il peut avec certitude en être dissocié et c'est cela qui constitue le caractère significatif de la mesure.

Dans le cas d'un satellite, l'influence perturbatrice du soleil est faible. Elle produirait une très petite avance du périgée ($\Delta \Omega'' = 2''$ environ) et pourrait être négligée. Les difficultés les plus considérables résident dans l'évaluation exacte des corrections dues à la présence de l'atmosphère terrestre et, surtout, à la non sphéricité de la terre.

Si l'on réussit à améliorer la stabilité et la planéité des trajectoires il sera peut être possible, néanmoins, de mettre en évidence une avance expérimentale résiduelle. Sa comparaison avec la valeur théorique de l'avance relativiste permettrait alors d'étendre au domaine des satellites le premier test de la Relativité Générale. Cette extension n'est pas encore réalisée à l'heure actuelle.

2. Mouvement des planètes et des satellites (sans rotations propres) dans le champ de gravitation produit par un corps central en rotation.

On peut penser qu'une modification relativiste plus importante de la précession des périgées est due à la rotation propre du corps central (en l'occurrence de la terre). Cette influence peut être déduite de façon approchée des principes de la Relativité Générale. La solution relative à un champ statique possédant la symétrie sphérique n'est évidemment plus applicable. Des considérations approchées, dues à J. Lense et H. Thirring (1918), permettent néanmoins de compléter la classique solution de Schwarz-

schild relative à un champ statique et à symétrie sphérique: les termes supplémentaires, proportionnels à $\frac{GI\omega}{c^2 r^3}$ (ω étant la vitesse angulaire et I le moment d'inertie du corps central), permettent de prévoir une précession du périgée (ou du périhélie)

$$(9) \Delta \varphi_{\text{rot}} = - \frac{4,8 \pi R^2 \omega \sqrt{Gm}}{c^2 [a(1-e^2)]^{3/2}} \cos i \text{ radians}$$

par révolution.

(R représente le rayon du corps central, i l'angle que fait le plan de l'orbite du satellite avec le plan équatorial du corps central).

La troisième loi de Kepler permet, comme précédemment, d'exprimer Gm en fonction des éléments de la trajectoire. D'autre part, la vitesse angulaire se traduit aisément en fonction de la période de révolution du corps central exprimée en secondes (τ_s) ou en jours sidéraux (τ)

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau_s} = \frac{2\pi}{\tau} \frac{1}{24(60)^2}$$

On parvient ainsi à la prévision d'un retard séculaire.

$$(10) \Delta \Omega_{\text{rot}} = - \frac{\pi^2 R^2 A \cos i}{6 c^2 \tau T^2 (1-e^2)^{3/2}}$$

L'effet relativiste total est alors

$$\Delta \Omega + \Delta \Omega_{\text{rot}}$$

l'expression du 1er effet (sans rotation du corps central) étant encore

$$(11) \Delta \Omega = \frac{5 \pi^2 a^2 A}{24 e^2 T^3 (1-e^2)}$$

Ce dernier introduit toujours une avance des périhélies (ou des périgées) tandis que $\Delta \Omega_{\text{rot}}$ représente un retard si $\cos i > 0$. Ce retard est d'autant plus grand que le plan de l'orbite du satellite se rapproche davantage du plan équatorial du corps central ($\cos i = 0$)

(cf. J. Ginzburg, Eksp. Fiz. Nank, 99, 1956, 11).

La valeur absolue du rapport entre les deux effets relativistes

$$(12) \quad \left| \frac{\Delta \Omega_{\text{rot}}}{\Delta \Omega} \right| = \left(\frac{R}{a} \right)^2 \frac{4 T \cos i}{5 \tau (1 - e^2)^{1/2}}$$

est d'autant plus grande que $\frac{R}{a}$ est plus grand (satellites proches) et que τ est plus petit c'est à dire que la vitesse angulaire du corps central est plus grande,

Or la vitesse angulaire du soleil est relativement faible ($\tau = 25j$ pour le plan équatorial) et, d'autre part, $\frac{R}{a}$ est assez petit

pour les planètes du système solaire ($\frac{R}{a} \sim 10^{-2}$ dans le cas de Mercure). Aussi, la précession relativiste des périhéliees dues à la rotation du soleil est-elle négligeable par rapport à la précession qui constitue le classique premier effet. Par exemple, dans le cas le plus favorable, celui de Mercure, ($\Delta \Omega_{\text{rot}}$) serait le l'ordre de $0''02$ et

$$\left| \frac{\Delta \Omega_{\text{rot}}}{\Delta \Omega} \right| \sim 4 \cdot 10^{-4}$$

mais l'erreur expérimentale sur $\Delta \Omega_{\text{rot}}$ est voisine de $1''$. Ces circonstances expliquent que les prévisions déduites du travail de Lense et Thirring soient restées à l'état de spéculation pure tant qu'il s'agissait de les appliquer au domaine des grosses planètes. Il suffisait d'attribuer à l'espace-temps la symétrie sphérique statique usuelle.

Par contre, il en va tout autrement dans le cas de la précession du périhélie de satellites.

Déjà, des vérifications expérimentales significatives semblent résulter de l'influence de la rotation de Jupiter sur la précession du périhélie de son 5^e satellite Amalthée(1).

(1) En effet, la vitesse de rotation de Jupiter est considérable. On pourrait enregistrer pour le 5e satellite

$$\Delta \Omega_{\text{rot}} = 5' \quad \Delta \Omega = 36'$$

les mesures étant d'ailleurs extrêmement difficiles.

Pour des satellites artificiels tels que

$$a \sim 10^7 \text{ cm} \quad \frac{R}{a} \sim 10^{-2}$$

on pourrait en effet prévoir un retard théorique tel que

$$\left| \frac{\Delta \Omega_{\text{rot}}}{\Delta \Omega} \right| \sim 4 \cdot 10^{-2}.$$

Etant donné l'ordre de grandeur de $\Delta \Omega$ ($\sim 1700''$ pour les satellites proches), la précession due à la rotation de la Terre pourrait atteindre la valeur

$$\Delta \Omega_{\text{rot}} = -60''$$

dans les cas favorables.

Bien entendu, les corrections déjà signalées (perturbations dues à l'atmosphère terrestre, à la non sphéricité de la terre) devraient intervenir pour obtenir la précession globale. L'obtention d'orbites stables permettrait alors de comparer utilement l'avance expérimentale résiduelle avec une avance théorique résultant de la superposition des deux effets relativistes de précession.

L'influence de la rotation de la terre sur le mouvement des satellites paraît ainsi être un espoir considérable dans les vérifications futures de la Relativité Générale.

3. Influence de la rotation propre d'un corps soumis à un champ de gravitation. Le gyroscope.

Quel que soit le mouvement du corps central, une particule d'épreuve (planète, satellite) assimilée à un point matériel décrit une géodésique de l'espace non euclidien créé par la présence du corps central.

Il n'en est plus de même si le corps d'épreuve tourne sur lui-même et possède ainsi un moment de rotation propre ou spin. S'il s'agit d'une planète ou d'un satellite, la trajectoire diffère légèrement de la géodésique primitive.

D'autre part, s'il s'agit d'un corps tournant (gyroscope), porté lui-même par un satellite ou tout simplement par la terre, son moment de rotation propre S varie au cours du temps. Au contraire, d'après la mécanique newtonienne, un gyroscope parfaitement sphérique (sans moment torque) n'éprouve aucune précession quel que soit son mouvement dans

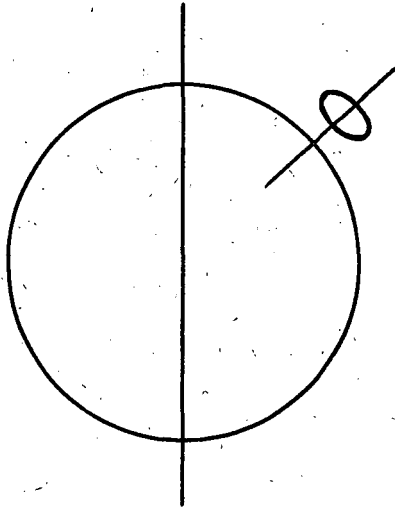


Fig. 6

un champ de gravitation. Son spin S reste constant au cours du temps.

L'expression de cette variation spécifiquement relativiste a été calculée récemment par L. I. Schiff (1960) (1). Le résultat en est le suivant :

Dans le système de référence lié au gyroscope (système propre), on obtient

$$(13) \quad \frac{dS^0}{dt} = \Omega \wedge S^0$$

en posant

$$(14) \quad \Omega = \frac{3 G m}{2 r^3 c^2} (r \wedge v) + \frac{1}{2 c^2} (\Gamma \wedge v)$$

r distance du gyroscope au corps central,

(1) L. I. Schiff - Motion of a gyroscope according to Einstein's theory of gravitation (Proc. of the Nat. Ac. Sc. 46, 1960, 87).

Γ représente les accélérations externes (non gravitationnelles) qui peuvent s'exercer sur le gyroscope.

Ce résultat est valable si le corps central est lui-même sans rotation propre. S'il est animé, au contraire, d'une vitesse angulaire ω , il faut changer Ω en

$$(15) \quad \Omega' = \Omega + \frac{GI}{c^2 r^3} \left[\frac{3r}{r^2} (\omega \cdot r) - \omega \right].$$

Le vecteur Ω' représente la vitesse angulaire de précession de l'axe du gyroscope. La variation $\frac{dS^0}{dt}$ est dans le système propre orthogonal au plan formé par S^0 et par Ω' . Aussi, dans ce système propre, la valeur de S^0 est constante et la fréquence de rotation l'est également. Selon la remarque de L. Schiff, le gyroscope se comporte comme une horloge de fréquence donnée, constante dans le système propre, mais susceptible de présenter, hors de ce système propre, des effets Doppler caractéristiques.

Toute mesure va consister à comparer la direction de l'axe du spin S^0 avec une direction fixe. Celle-ci est déterminée, par exemple, au moyen du système d'inertie dont l'origine est le lieu d'observation et dont les axes sont dirigés vers 3 étoiles fixes. La vitesse angulaire de précession $\frac{dS^0}{dt}$ est expérimentalement connue. On peut en déduire la vitesse angulaire de précession (Ω') exp. et comparer avec la valeur théorique (15).

On peut essayer de réaliser des expériences soit sur un satellite, soit sur la terre. La réalisation d'un gyroscope sur un satellite est évidemment fort délicate. Elle présente l'avantage de supprimer ipso facto l'intervention des forces extérieures puisque le satellite est en chute libre. Les effets seraient sensiblement

$$\Omega' = g \frac{R}{c^2} \frac{3}{2} \left(\frac{R}{r} \right) \omega_0$$

ω_0 étant la vitesse angulaire du gyroscope,

($\omega_0 \gg \omega$). Ils conduiraient à une précession de $6 \cdot 10^{-9}$ radian par révolution du gyroscope si le satellite évolue à faible distance de la terre.

La réalisation d'un gyroscope terrestre dont l'axe serait perpendiculaire à l'axe de rotation terrestre conduirait à une précession

$$\Omega \sim 3,5 \cdot 10^{-9} (1 + \cos^2 \lambda) \text{ radians par jour}$$

en un lieu de latitude λ .

Cette précession semble pouvoir être atteinte avec des montages suffisamment précis. Deux types de gyroscopes (destinés à des satellites) sont en construction à l'heure actuelle: l'un, constitué par une sphère conductrice, serait soutenu par un champ électrostatique (A. Nordsieck); l'autre, formé par une sphère superconductrice, serait maintenu par un champ magnéto-statique (W. M. Farbank). Ces réalisations fort délicates, on l'imagine, seraient terminées vers 1965.

B — LA DÉVIATION DES RAYONS LUMINEUX DANS UN CHAMP DE GRAVITATION.

Toutes les vérifications précédentes concernent le mouvement des corps doués de masse dans un champ de gravitation.

Néanmoins, les équations des trajectoires géodésiques de l'espace-temps, s'appliquent de la même manière au rayon lumineux. Toutefois le photon est une particule de masse nulle et, par conséquent, de vitesse c . Il en résulte que l'intervalle élémentaire

$$\begin{aligned} ds^2 &= c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = \\ &= dt^2 (c^2 - v^2) = 0 \end{aligned}$$

est identiquement nul: les photons décrivent donc des géodésiques de longueur nulle.

La condition $ds = 0$ transportée dans la

loi de Kepler entraîne $h \rightarrow \infty$ c'est-à-dire

$$\frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u = \frac{3 G m}{c^2} u^2 \quad \left| \quad \frac{d^2 u}{d\varphi^2} + u = 0 \right.$$

selon qu'il s'agit de l'équation einsteinienne ou newtonienne des trajectoires.

Retranscrite en coordonnées cartésiennes, la loi newtonienne admet pour solution la droite

$$x = R.$$

Au contraire, la Relativité Générale prévoit

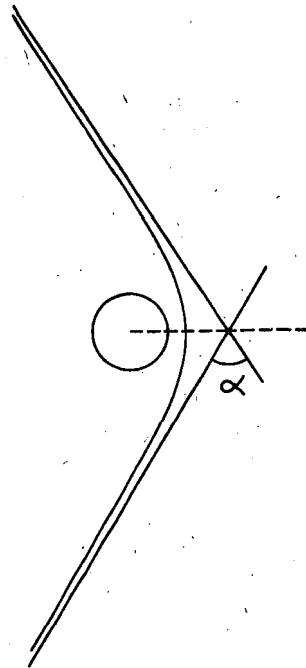


Fig. 7

par rapport à cette droite un écart α tel que

$$x \neq R \quad \alpha = \frac{4 G m}{c^2 R}$$

R est la distance du corps créant le champ de gravitation au rayon lumineux considéré.

Un rayon lumineux provenant d'une étoile située au voisinage apparent du soleil sera donc dévié. Il en résulte qu'un observateur terrestre pourra, grâce à cette déviation,

voir une étoile qui devrait être normalement occultée par le soleil.

Toutefois, en raison de l'éclat du soleil, une observation de ce genre ne peut être réalisée que lors d'une éclipse de soleil. Celui-ci est alors occulté et on peut observer et photographier ce qui se passe à son voisinage apparent.

Les mesures sont néanmoins extrêmement difficiles. Tout d'abord, l'éclat de la couronne solaire rend pratiquement impossible toute mesure réalisée pour des distances inférieures à $2 R_{\odot}$. Il en résulte que les résultats doivent être extrapolés pour obtenir la déviation expérimentale maximum.

D'autre part, les photographies réalisées doivent être comparées avec celles que l'on obtiendrait en dehors de toute influence du champ de gravitation solaire. On calculera ainsi la déviation α . Pour cela, il faut réaliser de nouvelles photographies à 6 mois d'intervalle. Bien entendu, les conditions extérieures (température, etc.) ont changé et des corrections d'échelle systématiques doivent être entreprises. On obtient alors une loi

$$\alpha = \frac{k_1}{r} + k_2 r$$

dans laquelle k_1 mesure le décalage gravitationnel et k_2 les corrections d'échelle.

On connaît environ 13 mesures réalisées depuis 1919 au cours d'éclipses variées. Les premières furent faites par Eddington sur la constellation des Hyades qui se trouvait alors au voisinage apparent du soleil. Les dernières sont dues à Biesbroeck (1952). Les corrections ont été réalisées par divers auteurs (Finlay-Frendlich, Danjon, Mikhaïlov). Les plus récentes (1959) et les plus pertinentes sont dues à Mikhaïlov (1).

Elles conduisent au tableau suivant:

Eclipse	n.° des étoiles	Mesure	α observé (secondes d'arc)	α corrigé (secondes d'arc)
1919	7	Eddington Davidson, Dyson	$1,98 \pm 0,12$	$2,07 \pm 0,09$
1919	5	id.	$1,61 \pm 0,50$	
1922	71	Campbell et Trumpler (Lick Laboratory)	$1,72 \pm 0,11$	$1,85 \pm 0,11$
1922	145	id.	$1,82 \pm 0,15$	2,1
1929	18	Finlay-Frendlich Kluber et Braun	$2,24 \pm 0,10$	$1,96 \pm 0,08$
1936	29	id.	2,70	$2,68 \pm 0,37$
1947	51	Biesbroeck	$2,01 \pm 0,27$	$2,20 \pm 0,38$
1952	11	id.	$1,70 \pm 0,10$	$1,45 \pm 0,18$
Valeur moyenne			1,97	2,05

Les conclusions qu'on en peut tirer sont les suivantes:

L'effet de déviation des rayons lumineux dans un champ de gravitation existe et il possède l'ordre de grandeur prévu par la Relativité Générale. Néanmoins, le décalage en tant que «preuve de la Relativité Générale» est loin d'être la meilleure.

Si l'on considère la précision des mesures, elle est surclassée de loin par les mesures d'effets Mössbauer dont nous parlerons la prochaine fois.

Si nous nous basons sur la valeur probante en elle-même, c'est-à-dire sur le caractère qui fait intervenir le maximum de paramètres propres à une théorie donnée et uniquement à cette théorie, elle est très inférieure aux actuelles mesures de précession des périhélie et aux espoirs que fourniraient les expériences sur les corps tournants (corps central et gyroscope).

Néanmoins, la déviation des rayons lumineux a été longtemps l'élément spectaculaire et, si l'on peut dire, émotif qui a entraîné une adhésion des esprits à la Relativité Générale. Whitehead retrace l'émotion que ressentit la Royal Society quand Eddington vint exposer les résultats de son expédition, lors de l'éclipse de 1917 et annoncer la substitution, à la théorie de Newton, de cette nouvelle cosmo-

(1) Mikhaïlov — Doklady Akad Nauh 1956; Astr. Journ. USSR 33, 1956, 919 Monthly Notices 119, 1959, 593.

logie due à un jeune allemand, en cet anniversaire de l'armistice le 6 novembre 1919.

«L'atmosphère d'intense émotion fut exactement celle du drame grec» écrit-il. Nous formions le chœur qui commente les décrets du destin, tels qu'ils sont révélés par le cours de l'événement suprême. Il y avait une valeur de drame dans le très scénique, très traditionnel cérémonial avec, en arrière plan, le portrait de Newton pour nous rappeler que la plus grande des généralisations de la science venait, après plus de deux siècles, de recevoir sa première atteinte. Nul intérêt personnel ne se trouvait en jeu; c'est une grande aventure de la pensée qui venait d'aborder heureusement au rivage».

Et il ajoute: «L'essence du drame tragique n'est point dans le malheur. Elle réside

dans l'oeuvre fatale des choses. Cette fatalité sans pitié, voilà ce qui passe à travers la pensée scientifique. Les lois de la physique sont les décrets du destin».

Quel est le caractère inéluctable d'une grande théorie physique? Nous nous en rendrons compte en examinant les interprétations concurrentes, c'est à dire les possibilités des interprétations euclidiennes, mais relativistes au sens restreint, des phénomènes de gravitation. Néanmoins, les preuves «décisives» ne sont pas forcément les meilleures preuves, et ceci tient au fait suivant: la vérification ou l'infirmité d'une grande théorie physique qui apparaît au profane comme un événement dépouillé de tout contenu psychologique peut, au contraire, par sa fatalité et son esthétique présenter une résonance profondément humaine.

Teoria e Prática da Ponte de Wheatstone

por RÔMULO DE CARVALHO

1. Suponhamos seis condutores eléctricos ligados entre si conforme indica a figura 1. Poderá encarar-se o conjunto como sendo

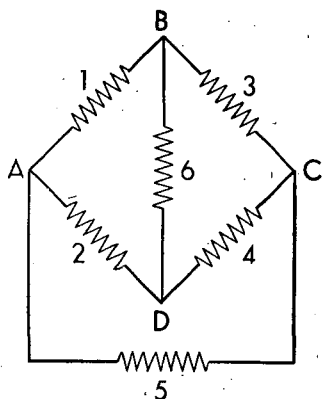


Fig. 1

composto por um circuito de 4 condutores em série (1, 2, 3 e 4) aos quais se ligaram, em derivação, os condutores 5 e 6. Poderia

o mesmo conjunto ser esquematizado de outras maneiras, como por exemplo se vê na figura 2, em que a disposição relativa dos

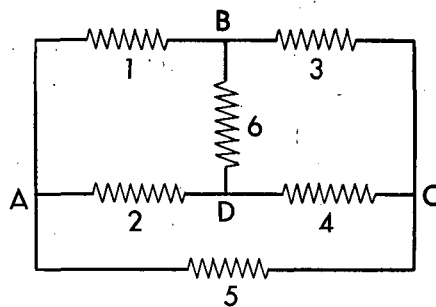


Fig. 2

condutores não difere da disposição da figura 1. Prefere-se o esquema da figura 1 porque nele se distingue um quadrilátero (A, B, C, D) que permite falar em condutores adjacentes ou opostos consoante os lados do

quadrilátero que ocupam, o que facilita a exposição do assunto.

Repare-se em que, em qualquer dos esquemas, cada um dos seis condutores é adjacente de 4 deles (por exemplo o condutor 1 é adjacente de 2, 5, 3 e 6). Nas referências que se lhes faz designam-se por «condutores (ou ramos) adjacentes». Aos que o não são dá-se o nome de «condutores (ou ramos) conjugados». São conjugados 1 e 4, assim como 3 e 2, e 5 e 6. A 1 e 4, e a 3 e 2, também se chama «condutores (ou ramos) opostos».

Suponhamos que se introduz uma força electromotriz num dos seis ramos desta montagem. A corrente fornecida irá circular por todos os condutores do conjunto, mas prova-se que é possível escolher valores para as resistências dos ramos de tal modo que não passe corrente no conjugado daquele em que se introduziu a força electromotriz. Exemplificando: introduzindo uma f.e.m. em 5 é possível escolher as resistências de 1, 2, 3 e 4 de tal modo que não haja corrente em 6; ou, inversamente, introduzindo uma f.e.m. em 6 é possível escolher as resistências de 1, 2, 3 e 4 de tal modo que não haja corrente em 5.

2. Consideremos o problema no máximo da sua generalização. Suponhamos que há forças electromotrizas em todos os ramos do conjunto, as quais designaremos por e_1, e_2, \dots, e_6 . Chamaremos r_1, r_2, \dots, r_6 , às resistências dos seis ramos, e i_1, i_2, \dots, i_6 , às intensidades das correntes que os percorrem.

A aplicação da lei dos nodos aos pontos A e C da figura 1 mostra, respectivamente, que:

$$i_5 = i_1 + i_2$$

$$i_5 = i_3 + i_4$$

e a aplicação da lei das malhas, às malhas 1, 3, 5 e 5, 2, 4 mostra, respectivamente, que:

$$i_1 r_1 + i_3 r_3 + i_5 r_5 = e_1 + e_3 + e_5$$

$$i_5 r_5 + i_2 r_2 + i_4 r_4 = e_5 + e_2 + e_4$$

(Entende-se que os sinais das forças electromotrizas estão implícitos nos símbolos e_1, e_2, \dots, e_6).

Suporemos agora que se faz variar a f.e.m. do ramo 6 e vamos demonstrar que é possível criar uma situação tal, que essa variação não provoque qualquer mudança no ramo 5, que é conjugado de 6.

Variando a f.e.m. do ramo 6 todas as intensidades variarão de quantidades di , que representaremos por di_1, di_2, \dots, di_6 , supondo implícitos, nesta representação, os respectivos sinais algébricos. As correntes anteriores passarão então a valer $i_1 + di_1, i_2 + di_2, \dots, i_6 + di_6$. A aplicação das leis dos nodos e das malhas, aos mesmos elementos de há pouco, dará:

$$i_5 + di_5 = (i_1 + di_1) + (i_2 + di_2)$$

$$i_5 + di_5 = (i_3 + di_3) + (i_4 + di_4)$$

$$(i_1 + di_1) r_1 + (i_3 + di_3) r_3 + (i_5 + di_5) r_5 = e_1 + e_3 + e_5$$

$$(i_5 + di_5) r_5 + (i_2 + di_2) r_2 + (i_4 + di_4) r_4 = e_5 + e_2 + e_4$$

Estas quatro últimas equações podem simplificar-se atendendo às outras quatro anteriores. Ficará:

$$di_5 = di_1 + di_2$$

$$di_5 = di_3 + di_4$$

$$di_1 \cdot r_1 + di_3 \cdot r_3 + di_5 \cdot r_5 = 0$$

$$di_5 \cdot r_5 + di_2 \cdot r_2 + di_4 \cdot r_4 = 0$$

Ora nós pretendíamos que a variação de f.e.m. efectuada no ramo 6 não provocasse qualquer mudança na corrente do ramo 5, isto é, que enquanto i_1 passou a $i_1 + di_1$, e i_2 a $i_2 + di_2$, etc., a intensidade i_5 continuasse a valer i_5 . Por outras palavras: pretendemos que di_5 seja igual a zero. Nestas condições o sistema anterior torna-se em:

$$di_1 + di_2 = 0$$

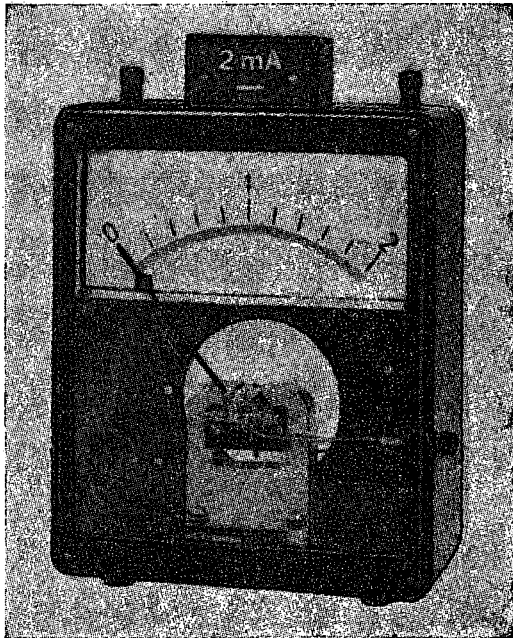
$$di_3 + di_4 = 0$$

$$di_1 \cdot r_1 + di_3 \cdot r_3 = 0$$

$$di_2 \cdot r_2 + di_4 \cdot r_4 = 0$$

MATERIAL DIDÁCTICO

de Física,
Química
e Biologia



Galvanómetro



PHYWE

PHYWE AG.
Goettingen — Alemanha Ocd.



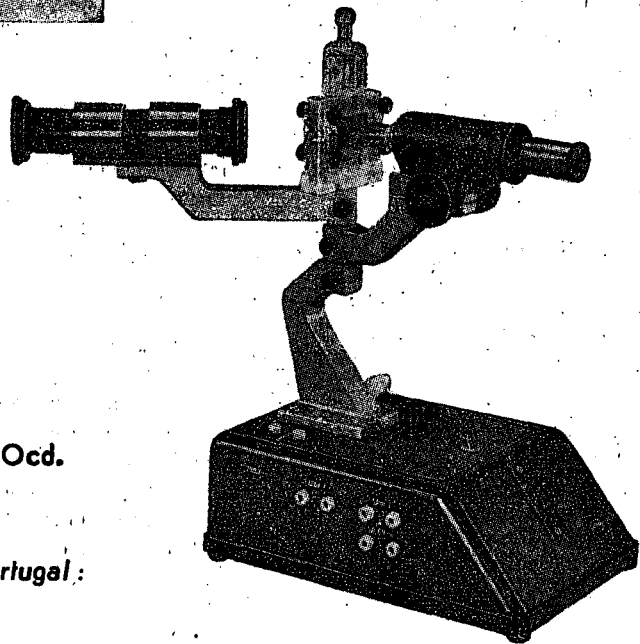
Representante exclusivo para Portugal:

LUSOMAX

Sociedade de Importação e Exportação, Lda.

RUA DOS CORREIROS, 123-3.º-DT.º

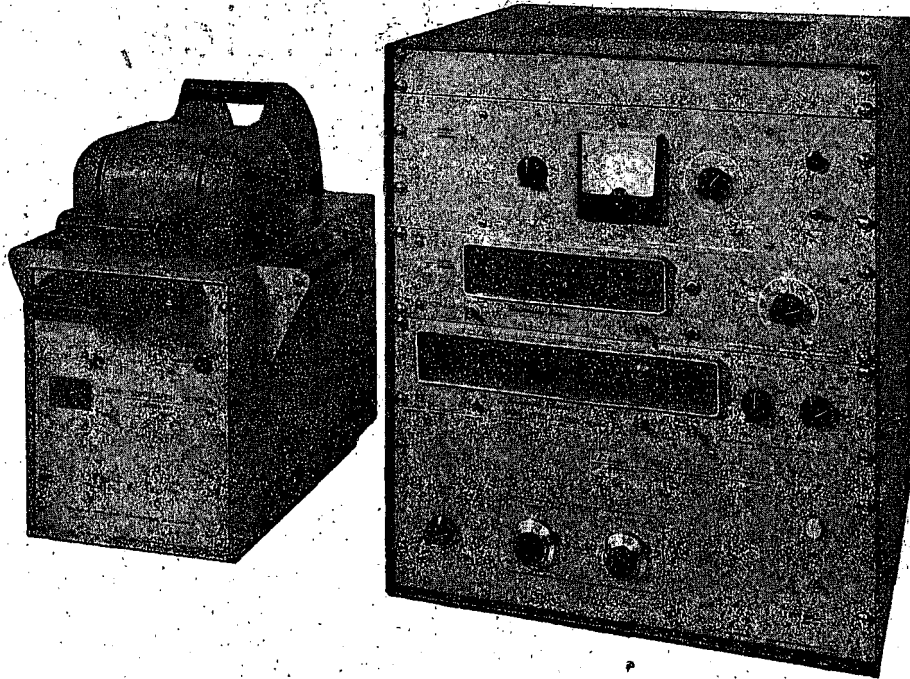
TELEF. PPC 30607 * LISBOA 2



Aparelho de Millikan



BAIRD-ATOMIC, INC.



Conjunto Modelo 745 A.
para contagem por cintilação de amostras líquidas

BAIRD-ATOMIC

Apresenta a maior linha de aparelhos para trabalhos nucleares, fabricados nos E. U. A. e na Holanda. Trata-se de instrumentos de concepção moderna, de grande precisão, muito robustos, esplendida apresentação e a preços compatíveis com similares de outras industriais europeias. Em Portugal já estão instalados muitos aparelhos B/A em diversos laboratórios, a funcionarem em perfeitas condições. Se ainda não tem, com muito gosto remeteremos os catálogos descritivos.

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS EM PORTUGAL:

EMÍLIO DE AZEVEDO CAMPOS & C.^A LDA.

CASA FUNDADA EM 1854

Rua Antero de Quental, 17, 1.º • LISBOA • Telef. 55 33 66
Rua Santo António, 137-145 • PORTO • Telef. 202 54/5/6

que pode escrever-se:

$$(1) \quad di_1 = -di_2$$

$$(2) \quad di_5 = -di_4$$

$$(3) \quad di_1 \cdot r_1 = -di_3 \cdot r_3$$

$$(4) \quad di_2 \cdot r_2 = -di_4 \cdot r_4$$

Substituindo em (3) os valores de di_1 e di_3 dados por (1) e (2), vem:

$$-di_2 \cdot r_1 = di_4 \cdot r_3$$

e esta equação, dividida, membro a membro, por (4), dá:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4}$$

ou:

$$r_1 \cdot r_4 = r_2 \cdot r_3$$

3. Conclusão: se os quatro condutores ligados em série, segundo o esquema da figura 1, tiverem resistências de valores tais (r_1 , r_2 , r_3 e r_4) que os produtos das resistências opostas sejam iguais ($r_1 \cdot r_4 = r_2 \cdot r_3$), qualquer variação de f. e. m. efectuada no ramo 6, não modifica o valor da corrente que estava passando no ramo 5, seu conjugado. Inversamente, qualquer variação de f. e. m. efectuada no ramo 5, não modifica o valor da corrente que estava passando no ramo 6.

Onde se fala em variação de f. e. m. poder-se-ia falar em resistência que a conclusão seria a mesma porque, variando a resistência do ramo 6, provoca-se uma variação na intensidade da corrente, ou seja a mesma consequência que resultaria da variação da f. e. m.. Falando em geral diremos portanto que a intensidade da corrente que passa no ramo 6 (ou no 5) não se altera quando se faz variar a f. e. m. ou a resistência do ramo 5 (ou 6), desde que sejam iguais os produtos das resistências opostas do quadrilátero.

O que demonstrámos relativamente aos ramos 5 e 6, demonstrava-se análogamente para qualquer par de conjugados (1 e 4; 2 e 3). A conclusão seria sempre a mesma: a variação de f. e. m. ou de resistência (ou de

ambas) em qualquer ramo da montagem da figura 1 não causa qualquer modificação no ramo que lhe for conjugado, desde que os produtos das restantes resistências opostas sejam iguais. (Os pares de resistências opostas são 1 e 4, 2 e 3, 5 e 6).

4. Fixemos a atenção, para simplificar o que vai seguir-se, num dado par de ramos conjugados, o par 5-6, e vamos demonstrar que a condição referida de serem iguais os produtos das resistências opostas ($r_1 \cdot r_4 = r_2 \cdot r_3$) arrasta consigo a seguinte consequência: os potenciais (V_B e V_D) nos pontos (B e D) em que o ramo 6 se liga ao quadrilátero, têm de ser iguais entre si. Dizer isto ($V_B = V_D$) ou dizer que, naquelas condições, não passa corrente no ramo 6, é a mesma coisa.

Vamos supôr, por hipótese, que é possível encontrar valores r_1 , r_2 , r_3 e r_4 (que não sabemos como estarão relacionados entre si), de tal modo que não passe corrente no ramo 6. Se isto suceder conclui-se que toda a corrente (i) proveniente de um gerador colocado no ramo 5, se desdobrou em duas parcelas quando atingiu o ponto A : uma parcela ($i_{1,3}$) que seguiu o caminho ABC ; outra parcela ($i_{2,4}$) que seguiu o caminho ADC .

Vamos calcular os valores dos potenciais em B (V_B) e em D (V_D).

Para isso imaginemos um fio homogêneo e bem calibrado, ABC , cuja resistência total seja igual a $r_1 + r_3$. A resistência r_1 corresponde um certo comprimento c_1 e a resistência r_3 um comprimento c_3 . O comprimento total do fio será $c_1 + c_3$ (fig. 3).

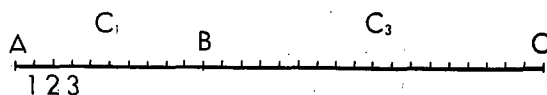


Fig. 3

O potencial desse fio irá decrescendo desde A até C e a diferença de potencial correspondente a cada unidade de comprimento será $\frac{V_A - V_C}{c_1 + c_3}$. A diferença de potencial

correspondente a c_1 unidades de comprimento, ou seja, entre A e B , será:

$$V_A - V_B = c_1 \cdot \frac{V_A - V_C}{c_1 + c_3}$$

Donde, o potencial no ponto B será:

$$(5) \quad V_B = V_A - c_1 \frac{V_A - V_C}{c_1 + c_3}$$

Raciocinando análogamente para os ramos 2 e 4 do quadrilátero da figura 1 acharemos que o potencial no ponto D será dado por:

$$(6) \quad V_D = V_A - c_2 \frac{V_A - V_C}{c_2 + c_4}$$

A diferença de potencial entre B e D será, subtraindo (6) de (5):

$$V_B - V_D = \left(\frac{c_2}{c_2 + c_4} - \frac{c_1}{c_1 + c_3} \right) (V_A - V_C)$$

Como os comprimentos considerados são proporcionais às respectivas resistências, escreveremos:

$$V_B - V_D = \left(\frac{r_2}{r_2 + r_4} - \frac{r_1}{r_1 + r_3} \right) (V_A - V_C)$$

Alcançamos esta conclusão partindo da hipótese de que não passava corrente no ramo 6, o que significa que $V_B - V_D = 0$. Esta condição dá, na equação anterior, o seguinte:

$$\left(\frac{r_2}{r_2 + r_4} - \frac{r_1}{r_1 + r_3} \right) (V_A - V_C) = 0$$

Como $V_A - V_C$ é forçosamente diferente de zero, terá de ser:

$$\frac{r_2}{r_2 + r_4} - \frac{r_1}{r_1 + r_3} = 0$$

ou

$$\frac{r_2 + r_4}{r_2} = \frac{r_1 + r_3}{r_1}$$

ou

$$1 + \frac{r_4}{r_2} = 1 + \frac{r_3}{r_1}$$

ou

$$r_1 \cdot r_4 = r_2 \cdot r_3$$

Reunindo esta conclusão com a do § 3 diremos que: quando na montagem representada na figura 1 as resistências ligadas em série forem tais que os produtos das resistências opostas tenham o mesmo valor, se introduzirmos uma f.e.m. no ramo 5, não passa corrente no ramo 6, seu conjugado e assim sucederá qualquer que seja a f.e.m. colocada em 5 ou qualquer que seja o valor da resistência desse ramo.

5. O físico inglês Charles Wheatstone (1802-1875) teve a boa lembrança de aproveitar esta propriedade dos ramos conjugados da montagem da figura 1 para efectuar medidas de resistência de condutores. O processo consistiria em ligar em série três resistências variáveis e mais a resistência cujo valor se pretenderia conhecer. Seriam esses os quatro ramos do quadrilátero. No ramo 5 (ou no 6) pôr-se-ia um gerador de corrente com seu interruptor; no ramo 6 (ou no 5) um galvanómetro com outro interruptor. Procurar-se-iam então, por tentativas, os valores que se deveriam dar às resistências variáveis para que o galvanómetro não acusasse corrente quando os interruptores estivessem fechados. Conseguir-se-ia esse resultado quando os produtos das resistências opostas do quadrilátero fossem iguais o que permitia conhecer o valor da resistência desconhecida.

Embora se tenham imaginado outros processos para medida de resistências, este avulta entre todos pela precisão que permite dar ao resultado. Se o galvanómetro for bastante sensível pode-se variar a resistência entre limites muito apertados e ter a certeza de que passa corrente ou não no ramo em que está colocado.

Wheatstone publicou as suas memórias sobre o assunto em 1843 (*Philosophical*

Transactions, II, 323) e em 1844 (*Poggendorff Annalen*, 62, pág. 535). O interesse que despertou reflecte-se nos trabalhos que muitos outros cientistas publicaram nos anos subsequentes relacionados com o mesmo tema, como, por exemplo, Maxwell e Heaviside, em 1873; Gray, em 1888; Lehfeldd e Rayleigh, em 1891; e Kohlrausch, em 1898.

A montagem esquematizada na figura 1 ficou conhecida por «ponte de Wheatstone», designando-se, em particular, por «ponte», o ramo onde se coloca o galvanómetro.

7. A precisão da medida de uma resistência pelo processo da ponte de Wheatstone depende da sensibilidade do galvanómetro e esta por sua vez depende das resistências da montagem. O cálculo matemático permite chegar às seguintes conclusões. Suponhamos que se atingiu a situação em que $r_1 r_4 = r_2 r_3$ e que r_4 é a resistência desconhecida. Se, nestas condições, provocarmos uma pequena variação de r_3 , por exemplo, o galvanómetro deverá indicar uma pequena variação de intensidade. Esta variação (mostra o cálculo) é máxima quando $r_1 = \sqrt{r_g \cdot r_0}$ e $r_2 = \sqrt{r_g \cdot r_4 \frac{r_0 + r_4}{r_g + r_4}}$, sendo r_g e r_0 , respectivamente, as resistências do galvanómetro e do gerador.

Também interessa saber que a potência fornecida pelo gerador é máxima quando

$$r_0 = \frac{(r_1 + r_3)(r_2 + r_4)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}$$

e a sensibilidade do galvanómetro é máxima quando

$$r_g = \frac{(r_1 + r_2)(r_3 + r_4)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}$$

A sensibilidade máxima da medida de uma resistência corresponderia ao caso ideal de todas as resistências serem iguais entre si:

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_g = r_0.$$

8. Tudo o que temos exposto até aqui relativamente aos ramos 5 e 6 da figura 1 poderia aplicar-se a qualquer par de ramos dessa mesma figura desde que fossem conjugados, como o são o 5 e o 6. Quando, porém, se trata da utilização restrita das propriedades dos ramos conjugados para a medição das resistências segundo o processo de Wheatstone, então são exactamente aqueles ramos 5 e 6 os que nos interessa considerar. É neles que, como dissemos, se coloca o galvanómetro, num deles, e o gerador, no outro, ambos acompanhados de interruptores. Como conjugados que são é indiferente, em princípio, instalar o galvanómetro no ramo 6 e o gerador no ramo 5, ou este no ramo 6 e aquele no 5. Em princípio é indiferente mas, na prática, não é.

As duas situações correspondem aos esquemas das figuras 4 e 5. Repare-se, entre-

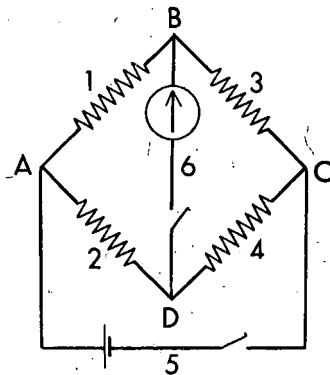


Fig. 4

tanto, em que o esquema da figura 5 corresponde exactamente ao da figura 6 com a vantagem de este permitir uma comparação mais fácil com o da figura 4. Vamos compará-los.

Perguntar se é ou não indiferente a colocação do galvanómetro nos ramos 5 ou 6, e a do gerador nos ramos 6 ou 5, é o mesmo que perguntar se é ou não indiferente ligar os terminais do galvanómetro às intersecções das resistências 1-3, 2-4 (fig. 4) ou às intersecções das resistências 1-2, 3-4 (fig. 6)). Se as resistências r_1, r_2, r_3, r_4, r_0 e r_g fossem

iguais (que é o caso ideal da máxima sensibilidade da medida, § 7) seria indiferente usar o esquema da figura 4 ou da figura 6, como é evidente. Mas a realidade é outra. A resistência do galvanómetro é, na generalidade dos casos, maior do que a do gerador. Quanto às quatro resistências do quadrilátero, no caso de serem todas ou algumas diferentes, como normalmente sucede, serão

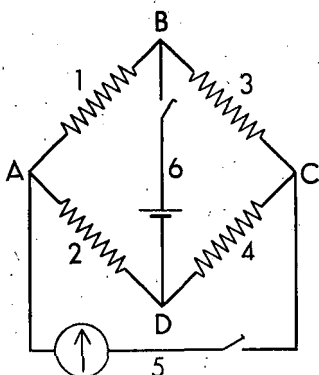


Fig. 5

duas maiores e duas menores, podendo mesmo serem iguais duas a duas. Como os produtos das resistências opostas têm de ser iguais para efeitos de medida pelo processo de Wheatstone, sucede que nunca as duas maiores

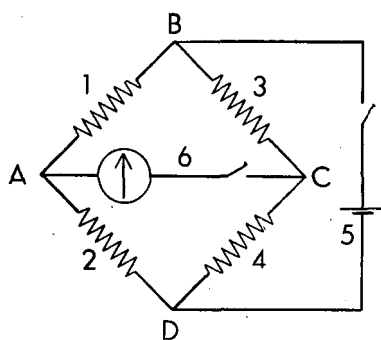


Fig. 6

poderão ser as opostas, nem também as duas menores. As maiores têm de ser adjacentes assim como as menores. No caso de serem iguais duas a duas, serão também duas maiores e duas menores, o que está contido no caso anterior.

A questão posta reduz-se portanto a saber se, o galvanómetro deverá ficar ligado à intersecção das resistências maiores, de um lado, e das menores do outro, ou às intersecções das resistências maiores com as menores. A aplicação do cálculo numérico à determinação dos valores das intensidades das correntes que o galvanómetro indicará conforme o ramo em que estiver (para um dado gerador e dadas resistências r_1 , r_2 , r_3 e r_4), mostra que a montagem mais conveniente é a seguinte: o ramo que contiver o condutor de maior resistência (galvanómetro ou gerador) deve ligar-se à intersecção das resistências maiores do quadrilátero, por um lado, e à intersecção das resistências menores, por outro. Como o galvanómetro tem, normalmente, resistência maior do que o gerador, será ele que deverá ficar ligado àquelas intersecções.

9. Outro facto a considerar na medição de resistências por meio da ponte de Wheatstone, é o aquecimento provocado nos condutores pela passagem da corrente, pois a elevação de temperatura modifica o valor das resistências eléctricas. Este factor tem tanta importância que pode até suceder que a regra acabada de expor na alínea 8 perca a sua validade, isto é, pode deixar de ter interesse ligar o galvanómetro (no caso frequente de a sua resistência ser superior à do gerador) à intersecção das resistências maiores e à das menores do quadrilátero da montagem da figura 1.

Suponhamos um caso concreto em que a resistência do galvanómetro fosse superior à do gerador e em que as resistências, a frio, do quadrilátero, fossem $r_1 = 10 \Omega$; $r_2 = 80 \Omega$; $r_3 = 5 \Omega$ e $r_4 = 40 \Omega$. Os números estão escolhidos de modo que os produtos das resistências opostas tenham o mesmo valor ($r_1 \cdot r_4 = 400$; $r_2 \cdot r_3 = 400$). A montagem conveniente, segundo o que indicámos na alínea 8, seria com o galvanómetro ligado, por um lado, à intersecção das resistências menores, 10Ω e 5Ω (r_1 e r_3) e, por outro lado, à intersecção das resistências maiores, 80Ω e 40Ω (r_2 e r_4) (fig. 7).

Ligando os interruptores não deveria passar corrente na ponte (ramo BD) em consequência da igualdade daqueles produtos. Contudo, poderia passar. Vejamos porquê.

Se não passasse corrente em BD , a intensidade total I dividir-se-ia em duas partes: i , que percorreria o caminho ABC , de resistência $10\Omega + 5\Omega = 15\Omega$; e i' , que percorreria o caminho ADC , de resistência $80\Omega + 40\Omega = 120\Omega$. Como a resistência de ADC é 8 vezes maior do que a de ABC , a corrente i' seria 8 vezes menor do que a

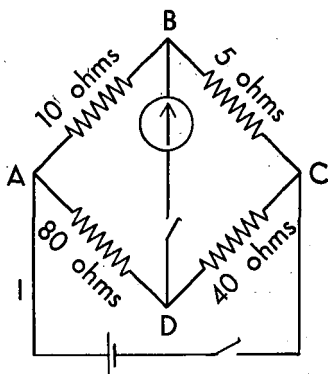


Fig. 7

corrente i . As resistências r_2 e r_4 seriam percorridas por uma corrente 8 vezes menor do que as resistências r_1 e r_3 . Bastaria esta diferença para que o aquecimento das resistências fosse diferente e, portanto, para que os seus valores, com o circuito fechado, já não satisfizessem à igualdade dos produtos das resistências opostas do quadrilátero. Mas, além disto, podem as resistências serem construídas de metais ou ligas diferentes e, alguma ou algumas delas, sofrerem notável variação de resistência em relação às restantes.

Se, neste exemplo numérico, ligássemos antes o gerador, em vez do galvanómetro, aos terminais BD , o resultado da medida da resistência que estívéssemos praticando seria mais correcto. De facto (fig. 8) a corrente do gerador, ao chegar a B , dividia-se em duas parcelas, uma i'' que percorreria o caminho BAD , de resistência $10\Omega + 80\Omega = 90\Omega$; e outra, i''' , que percorria o cami-

nho BCD , de resistência $5\Omega + 40\Omega = 45\Omega$. Como a resistência de BAD era o dobro da resistência de BCD , a corrente i''' seria o dobro de i'' . As duas metades do quadrilátero eram percorridas, neste caso, por correntes cujas intensidades eram o dobro uma da outra, enquanto no caso anterior uma das correntes tinha a intensidade 8 vezes maior do que a outra. Reparando nos números dados reconhece-se até que a resistência r_1 é, no caso da figura 7, percorrida por uma corrente 8 vezes maior do que a resistência r_4 e, no caso da figura 8, a mesma resistência r_1 é percorrida por uma corrente cuja intensidade é metade da que percorre r_4 . As consequências das duas montagens (figs. 7 e 8) são, portanto, muito diferentes.

O inconveniente que resulta do aquecimento das resistências pela passagem da corrente ficaria idealmente anulado no caso de as resistências do quadrilátero serem iguais e feitas do mesmo material. Na impossibilidade de se trabalhar nesta situação

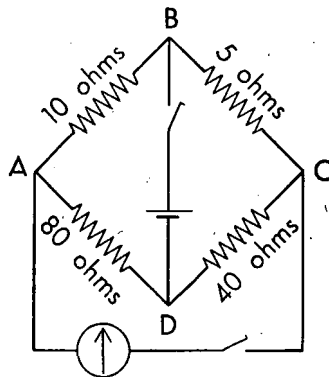


Fig. 8

óptima, convém que os valores das resistências utilizadas sejam o mais próximo possível umas das outras e que, pelo menos, aquelas três resistências do quadrilátero que se consideram conhecidas para efeitos da determinação do valor da quarta resistência, sejam feitas da mesma substância.

10. Uma das maneiras de avaliar a resistência dos condutores por meio da ponte

de Wheatstone consiste em utilizar a chamada *caixa em ponte*. Trata-se de uma caixa onde estão instaladas três filas de resistências cuja disposição e valores se vêem indicados na figura 9.

A caixa comporta quatro terminais (A, B, C, D) que correspondem aos quatro vértices do quadrilátero das figuras anteriores. A resistência cujo valor se pretende

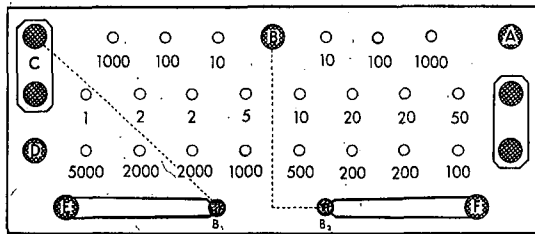


Fig. 9

conhecer liga-se a A e a D ficando montada em série com as restantes. O galvanómetro liga-se a B e ao terminal oposto, D . Em vez de se utilizar realmente o terminal B , é preferível fazer a respectiva ligação ao terminal (F) de um interruptor (que se põe em comunicação com aquele premindo o botão B_2) e que faz parte da própria instalação da caixa evitando assim o emprego de um interruptor auxiliar. O gerador liga-se a A e ao seu oposto C , ou melhor, ao terminal E de um interruptor que está ligado a C , e com o qual se trabalha premindo o botão B_1 .

O galvanómetro é ligado a B e D por duas razões: 1) porque estamos a supor o caso mais frequente de a resistência do galvanómetro ser superior à do gerador; 2) porque, pela maneira como a caixa está montada, podemos fazer as resistências AB e BC iguais entre si e reservar CD para resistência variável. As duas que são iguais entre si serão forçosamente as duas maiores ou as duas menores e, portanto, ficará o galvanómetro instalado de acordo com a conveniência citada no § 8.

É essencial, no manejo da caixa, que as cravelhas estejam fortemente introduzidas

nos respectivos orifícios⁽¹⁾. A falta de cumprimento desta obrigação é motivo frequente de erros na medida de resistências.

Depois de montado o circuito introduzem-se resistências iguais nos ramos AB e BC da caixa, cujo valor seja o mais próximo possível do valor da resistência desconhecida, se porventura se fizer ideia da sua ordem de grandeza. Se não se fizer ideia, tenta-se. Feito isso introduz-se um valor da mesma ordem dos anteriores na resistência variável CD e estabelecem-se os contactos dos interruptores, primeiro o do gerador e depois o do galvanómetro para evitar o efeito das extra-correntes no instrumento de medida. (A abertura dos interruptores faz-se por ordem inversa). Observa-se o desvio no galvanómetro (que deverá estar chantado) e procura-se anular a corrente que passa por ele. Depois de conseguido isso e de se conhecer já, portanto, um valor bastante aproximado da resistência a medir, deve-se recommençar o trabalho escolhendo, se for possível, as resistências dos ramos AB e BC que mais se aproximem do valor que se está determinando.

Como as resistências daqueles ramos são apenas três (10Ω , 100Ω e 1000Ω) resulta que só em casos muito excepcionais poderíamos tirar proveito deste dispositivo, quando as resistências a medir tivessem valores muito próximos daqueles, ou os próprios, para fugirmos aos erros causados pelo aquecimento das bobinas. Podemos reduzir muito estes erros empregando um gerador de tensão baixa, um elemento de pilha Leclanché, por exemplo, ou um elemento de pilha seca. A este gerador ainda se pode ligar um reóstato, em série, para diminuir a intensidade da corrente lançada na caixa.

11. Como o valor mínimo das resistências do ramo maior da caixa em ponte é de 1 ohm, e a totalidade das resistências desse ramo perfaz 1110 ohms, é possível, es-

(1) Na figura 9 estão representados os orifícios onde entram as cravelhas.

colhendô convenientemente as 16 resistências que compõem esse ramo, introduzir no circuito todos os valores inteiros sucessivos, desde 1 até 11110. Podemos, portanto, efectuar medidas de resistência, com a caixa em ponte, dentro daqueles largos limites. As possibilidades, porém, não terminam aqui. Combinando convenientemente o par de resistências introduzidas nos ramos menores, podemos prolongar as medidas até décimos e centésimos de ohm.

Suponhamos que para efectuar a medida de uma resistência introduziamos 10 ohms em cada um dos ramos menores e que verificávamos que o galvanómetro acusava respectivamente um desvio de 0,5 divisões para a esquerda e de 0,6 para a direita conforme se introduziam 23 ohms ou 24 ohms no ramo maior da caixa. Concluiríamos que o valor da resistência a medir estaria contido entre 23 e 24 ohms. Para conhecermos a fracção decimal do ohm no valor dessa medida introduziríamos 230 ohms (23×10) no ramo maior; no ramo menor oposto a este, AB , mantínhamos os 10 ohms e no outro menor, BC , introduziamos 100 ohms. Se, nestas condições, o galvanómetro parecesse manter-se no zero concluiríamos que a resistência desconhecida valia 23,0 ohms. Se o galvanómetro não indicasse rigorosamente o zero, iríamos aumentando a resistência do ramo maior para 231 ohms, 232, 233, etc., até anularmos a corrente na ponte. Se isso sucedesse, suponhamos, com 234 ohms, diríamos que a resistência valia 23,4 ohms pois o seu valor seria dado por $\frac{234 \times 10}{100}$.

Se quiséssemos a aproximação de centésimas introduziríamos, nos ramos menores, resistências de 10 ohms e 1000 ohms. A caixa em ponte fica assim com um possível âmbito de medidas de resistências desde 0,01 Ω até 11110 Ω .

12. Quando os estudantes liceais recorrem à caixa em ponte para efectuarem a medida de uma resistência é muito frequente chamarem o professor para lhe dizerem que

o galvanómetro deve estar estragado porque marca sempre o mesmo quer introduzam, no ramo maior da caixa, uma resistência de 100 ohms, quer de 1000, de 2000 ou de 5000.

Este facto, que realmente se observa, tem a sua justificação. Como vimos (§ 4) a diferença de potencial entre os terminais da ponte onde está ligado o galvanómetro é dada pela expressão

$$V_B - V_D = \left(\frac{r_2}{r_2 + r_4} - \frac{r_1}{r_1 + r_3} \right) (V_A - V_C).$$

Suponhamos que, para efectuar a medida de uma resistência, fazemos $r_1 = r_3$ (usando as letras de acordo com as figuras anteriores, por exemplo, a figura 4), e suponhamos ainda que r_4 é a resistência desconhecida, sendo portanto r_2 a resistência que vamos sujeitar a variações. Se $r_1 = r_3$ o cociente

$\frac{r_1}{r_1 + r_3}$ da expressão anterior fica igual a $1/2$ e, portanto:

$$V_B - V_D = \left(\frac{r_2}{r_2 + r_4} - \frac{1}{2} \right) (V_A - V_C).$$

Se a resistência desconhecida (r_4) for pequena, os valores da fracção $\frac{r_2}{r_2 + r_4}$ pouco diferem à medida que se for aumentando r_2 . Se, por exemplo, r_4 valesse 20 ohms, aquela fracção daria 0,7 para $r_2 = 50$ e daria 0,99 para $r_2 = 5000$. Numa variação tão ampla de resistência, desde 50 ohms a 5000 ohms, a diferença entre os valores daquela fracção era apenas de cerca de 0,3. Para aqueles valores $r_2 = 50 \Omega$ e $r_4 = 20 \Omega$ a expressão anterior dá:

$$V_B - V_D = 0,2 (V_A - V_C).$$

Para $r_2 = 5000 \Omega$ e $r_4 = 20 \Omega$, dá

$$V_B - V_D = 0,5 (V_A - V_C).$$

Conclui-se que para uma grande variação da resistência r_2 (suposta pequena a resistência r_4) a variação da tensão $V_B - V_D$ nos

terminais do galvanómetro é muita pequena, podendo passar despercebido o fraco desvio do ponteiro do instrumento.

13. A ponte de Wheatstone também pode ser utilizada para medir a resistência dos próprios galvanómetros e a resistência interior dos geradores hidroeléctricos, colocando qualquer desses objectos no ramo destinado à resistência desconhecida. As figuras 10 e 11 referem-se a essas montagens.

Na figura 10 (medida da resistência de um galvanómetro) quando se fecha o interruptor 2 (deixando 1 aberto), a corrente debitada pelo elemento E , divide-se, ao chegar a A , pelos ramos ABC e ADC .

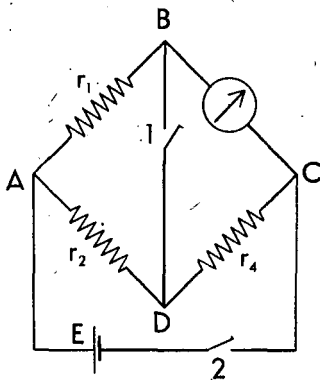


Fig. 10

A agulha do galvanómetro marcará assim um certo desvio. Se, de seguida, fecharmos o interruptor 1 (continuando o 2 fechado) sucederá que uma fracção da corrente se

desvia para a ponte BD , excepto se o potencial de B for igual ao de D . É isso exactamente o que se pretende. O trabalho consiste, portanto, em variar as resistências r_1 , r_2 e r_4 de tal modo que o galvanómetro indique o mesmo desvio quer o interruptor 1 esteja aberto quer esteja fechado. Quando isso suceder será $V_B = V_D$ e, portanto, $r_1 \cdot r_4 = r_2 \cdot r_g$, sendo r_g a resistência do galvanómetro que se pretende conhecer.

Na figura 11 (medida da resistência interior de um elemento E) procura-se análoga-

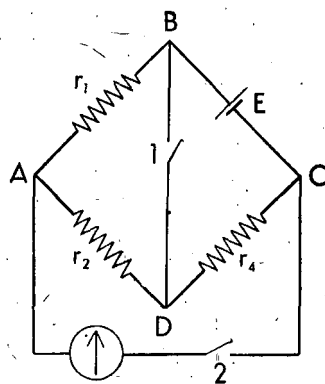


Fig. 11

mente variar as resistências r_1 , r_2 e r_4 de tal modo que o galvanómetro acuse sempre o mesmo desvio (estando 2 fechado) quer o interruptor 1 esteja aberto quer fechado. Será então $r_1 \cdot r_4 = r_2 \cdot r_0$ sendo r_0 a resistência interior do gerador hidroeléctrico que se pretende conhecer. Este método de medida chama-se *método de Mance*.

Leitores da «Gazeta de Física»! Enviem-nos os nomes e moradas dos vossos amigos que podem e devem interessar-se pela nossa revista. Contribuirão assim eficientemente para que a «Gazeta de Física» se torne cada vez mais interessante e útil e que possa aparecer com maior assiduidade.

Mobílias em todas as
qualidades e estilos

A NUPCIAL MOBILADORA, L.^{DA}

Colchoarias e estofos
Artigos eléctricos



SECÇÃO DE VENDAS:

Rua Elias Garcia, N.º 366-B — Telefone 931611

ARMAZÉNS E PESSOAL PRIVATIVO:

Rua Angola, Lote 57-A — Telefone 934087

— A M A D O R A —

o primeiro óleo no mundo que lhe dá
uma Supermargem de segurança



Super
MOTOR OIL



Finalmente
a
superprotecção
indispensável
para as actuais
condições de circulação



Este carimbo garante que o Shell Super Motor Oil foi ensaiado durante milhares de horas nos principais modelos de automóveis, na cidade, em auto estradas, em montanha, debaixo de todas as temperaturas e em todas as condições de condução, e que provou exceder (por larga margem) todas as principais recomendações qualitativas dos fabricantes de automóveis em todo o Mundo. Por isso, pode a partir de hoje encontrar o Shell Super Motor Oil em qualquer das 40.000 Estações de Serviço SHELL na Europa.



Progressos recentes em Física Corpuscular(*)

por MAX HOYAUX e PAUL GANS

(Continuação do número anterior)

PARTÍCULAS «ELEMENTARES»
PARTÍCULAS «ESTRANHAS»

Entre as descobertas características dos últimos dez ou vinte anos, é necessário mencionar muito especialmente a multiplicação quase inverosímil do número de partículas «elementares».

Embora os constituintes normais do átomo sejam em número de três — prótão, neutrão e electrão — e sejam, em princípio, necessários quatro tipos de corpúsculos «de troca» para explicar os quatro tipos de interacção mencionados no capítulo precedente, atingimos actualmente a trintena; e o hipotético «gravitão» não é geralmente incluído nas listas; por outro lado, não devemos esquecer a que ponto é ainda incompleto o nosso conhecimento da «interacção fraca».

Esta multiplicação dos corpúsculos «elementares» é comparável à multiplicação dos «corpos simples» que se seguiu à introdução desta noção em química. Parece evidente que os químicos que a introduziram julgavam que o número dos corpos simples era bastante limitado. Nas combinações mais usuais são apenas uma dezena; todavia, a experiência mostrou que o seu número é elevado, visto que se conhecem hoje 103, não tomando em consideração as ligeiras diferenças que existem entre os isótopos de um mesmo corpo.

A multiplicidade dos corpos simples é real; mas os estudos ulteriores levaram à dualidade proto-neutrónica do núcleo.

Não nos esqueçamos que, pelo menos de início, no estágio puramente químico, não existia uma boa definição de corpo simples. Um corpo era declarado simples se resistia a todos os métodos habituais de decomposição. É assim que o óxido de urânio UO_2 foi durante muito tempo considerado como um corpo simples, em virtude da sua estabilidade extraordinária e da sua presença como radical (uranilo) nos sais de urânio mais conhecidos. Foi necessário passar ao estágio suplementar — o da análise física — para se saber a que ponto um corpo simples é fundamentalmente diferente de um corpo composto e chegar à definição física, precisa, de corpo simples: *Um corpo simples é aquele cujos átomos têm todos o mesmo número de protões.*

Podemos estabelecer um paralelo completo entre esta situação e a que se apresenta actualmente em física corpuscular? É demasiado cedo para o afirmar, mas é, no entanto, interessante tentar fazê-lo.

Assim, não existe nenhuma «boa» definição de corpúsculo elementar e esta é a razão porque colocamos frequentemente a palavra «elementar» entre aspas. Um corpúsculo é considerado elementar enquanto a sua estrutura não for precisada sem ambiguidade. Com efeito, o deutério e a partícula alfa não são considerados como elementares porque a sua estrutura (um prótão e um neutrão para o primeiro, dois protões e dois neutrões para a segunda) é considerada como conhecida para além de toda a dúvida razoável.

Deste modo, é perfeitamente possível que certos corpúsculos considerados hoje como «elementares», deixem de o ser amanhã, porque alguém terá precisado a sua estrutura,

(*) A primeira parte deste artigo foi publicada in *Gazeta de Física*, 4 (2) : 54, 1962; 4 (3) : 86 e 4 (4) : 114, 1963.

da mesma maneira que o óxido de urânio acima citado deixou de ser considerado como simples no dia em que Klapproth precisou a sua composição química. Em química, isto não conduziu a uma redução sensível do número de corpos simples; tratou-se apenas de uma ligeira correcção, de um aumento de precisão dos nossos conhecimentos. Sucederá o mesmo nos corpúsculos «elementares»? É demasiado cedo para o dizer.

Anàlogamente, existirá alguma coisa que diferencie fundamentalmente o corpúsculo elementar (sem aspas) do que o não é? Teremos um dia uma «boa» definição de corpúsculo elementar (continuando sem aspas)? Lógicamente a resposta é afirmativa. Visto que a estrutura de um corpúsculo composto é sempre definida numa linguagem que faz intervir outros corpúsculos («elementares» com aspas), a nossa lógica actual exige que os corpúsculos elementares (sem aspas) existam e satisfaçam a um certo critério bem preciso, mesmo se ele nos é provisoriamente desconhecido.

Mas pode-se perguntar qual é a validade real das regras da nossa lógica actual. Há cinquenta anos, a dualidade onda-corpúsculo teria sido considerada, em nome da lógica, como fundamentalmente absurda. Um ser podia existir como onda ou como corpúsculo mas não podia, certamente, ter simultaneamente ambas as características. No entanto, esta dualidade impôs-se pelos factos a tal ponto, nos nossos dias, que é universalmente admitida e mesma aplicada em linguagem de matemáticas puras; *no plano físico, ela continua a não ser compreendida!*

Entretanto, se nos é permitido apresentar aqui qualquer coisa que é mais uma impressão, uma atmosfera, do que uma conclusão formal, podemos dizer que se pensa geralmente que o corpúsculo elementar existe e que o critério de elementaridade será definido em breve.

Mas isso não significa, de modo algum, que o corpúsculo elementar seja desprovido de estrutura. E é lamentável que sejamos forçados a empregar esta mesma palavra

— estrutura — para designar duas coisas que são, sem dúvida, totalmente diferentes: por um lado, a estrutura do corpúsculo composto, que se compara à fórmula química de uma combinação e, por outro, a estrutura do corpúsculo elementar que se deve comparar com a estrutura proto-neutrónica do átomo. Constitui, na verdade, uma opinião geralmente aceite, e aliás particularmente confirmada pelos factos, que os corpúsculos elementares têm uma estrutura, não definível em linguagem de outros corpúsculos elementares, mas fazendo intervir não se sabe qual substracto capaz, talvez, de explicar um pouco mais claramente a dualidade onda-corpúsculo e ao nível do qual se reencontraria possivelmente uma maior simplicidade. Mas, mais uma vez, devemos deter-nos porque chegámos aos confins da realidade e da ficção científicas.

Até ao presente, a comparação tem mostrado um paralelo sensivelmente completo entre os corpúsculos «elementares» de hoje e os corpos «simples» anteriores à análise estrutural. Entretanto, para que sejamos completos, devemos agora mencionar um certo número de pontos através dos quais se manifestam diferenças bastante sensíveis.

Em primeiro lugar, a matéria «normal» é construída unicamente com três espécies de corpúsculos, e as forças que presidem ao seu equilíbrio, em condições igualmente normais, fazem intervir alguns outros: fotões, mesões, eventualmente gravitões, mas em número igualmente limitado. Quando um tal quadro é traçado, fica uma maioria de corpúsculos «elementares» que não intervêm, cujo papel, cuja «utilidade» — se não reaceamos empregar este termo talvez demasiado antropomórfico — não é aparente.

Certamente, existe em química uma dezena de corpos simples que desempenham o papel de vedetas, mas não existe uma distinção nítida, abrupta, entre os primeiros papeis e os figurantes; a curva das abundâncias relativas na natureza é bastante regular e, frequentemente, certos corpos simples abundantes têm desempenhado um papel obscuro porque a sua química era demasiado compli-

çada para tornar a sua utilidade lucrativa. Assim, neste caso, tudo reside em ligeiras diferenças. O mesmo se não dá nos corpúsculos «elementares».

Uma segunda diferença reside na *instabilidade* de um grande número de corpúsculos «elementares» (a ponto de um corpúsculo estável, como o protão, vir a tomar o aspecto de uma excepção absolutamente espantosa e parcialmente inexplicada). Certamente, existem corpos simples instáveis, como o rádio por exemplo; alguns têm mesmo existências muito curtas que se situam na mesma gama que encontramos nas partículas «estranhas». Mas tudo isto não impede que haja uma diferença muito séria. Assim, o hiperão lambda, muito instável, surge como uma espécie de neutrão pesado que pode substituir o neutrão normal na constituição de núcleos, igualmente efémeros mas, com excepção disso, pouco diferentes dos núcleos normais. Diz-se que as partículas estranhas são estados excitados dos constituintes normais da matéria e dos campos de força, mas estes estados excitados diferem menos dos estados normais (salvo no que respeita à massa) que os estados excitados dos átomos ou das moléculas. Sob certos aspectos (mas não em todos) ser-se-ia tentado a comparar os corpúsculos «estranhos» com isótopos dos corpúsculos «normais».

É bem difícil resumir o que precede mas mais difícil ainda tirar conclusões. Assim, as nossas conclusões são provisórias e reservadas. Entretanto, é provável que:

a) exista a noção de corpúsculo elementar;

b) em breve, se precisará a noção de corpúsculo elementar;

c) uma parte, provavelmente uma maioria, dos corpúsculos considerados como «elementares» não satisfarão a este critério e a sua estrutura se precisará próximamente;

d) os corpúsculos finalmente reconhecidos como elementares terão também uma estrutura que se conhecerá, mas esta estrutura situar-se-á num plano totalmente dife-

rente da que define os corpúsculos compostos;

e) ao nível do abstracto que serve para exprimir a estrutura dos corpúsculos elementares, surgirá uma grande simplificação;

f) os corpúsculos «estranhos» são mais «variantes» dos corpúsculos «normais» do que corpúsculos inteiramente diferentes;

g) a natureza exacta destas «variações sobre um tema» clarificar-se-á em termos de linguagem do abstracto já mencionado.

Classificação dos corpúsculos actualmente conhecidos: — Para maior clareza de exposição, vamos agora apresentar uma classificação dos corpúsculos que não é inteiramente ortodoxa mas cujo interesse pedagógico nos parece considerável. Cremos, com efeito, que um artigo como este não deve hesitar em introduzir a noção antropomórfica de «utilidade», já citada anteriormente. Os corpúsculos «úteis» serão de duas naturezas:

a) os constituintes normais da matéria;

b) os corpúsculos associados aos diversos tipos de forças e radiações...

Os corpúsculos «inúteis» (ou que se mostram como tais) são de três espécies:

a) os anti-corpúsculos dos constituintes normais da matéria, que podem também nomear-se «constituintes da anti-matéria»;

b) o neutrino e o mesão μ com os seus anti-corpúsculos;

c) as «partículas estranhas».

Por razões pedagógicas, falaremos dos constituintes da anti-matéria imediatamente após ter falado dos que compõem a matéria normal.

Constituintes normais da matéria: — São em número de três: electrão, protão e neutrão.

O *electrão* (massa $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg; carga negativa $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, spin $1/2$, momento magnético «normal») é descrito com uma extraordinária precisão (mas não absoluta) pela equação de Dirac. O significado desta afirmação consiste em que existe uma corres-

pondência quase absoluta e biunívoca entre as soluções matemáticas da equação de Dirac e as propriedades físicas do electrão. A precisão é, em geral de 7 ou 8 algarismos significativos.

Como a precisão das medidas espectroscópicas é, por vezes, superior, conhecem-se certos casos em que surgem desvios muito diminutos. Tentou-se interpretá-los fisicamente e, em consequência, modificar a equação de Dirac. O interesse prático destas tentativas é limitado, mas o seu interesse teórico é considerável, não somente em si, mas pelas vias novas que se podem abrir no domínio de outros corpúsculos, diferentes do electrão.

As insuficiências da teoria de Dirac provêm dela considerar um electrão estritamente pontual, incapaz de interacção com ele próprio. De facto, o electrão parece susceptível deste tipo de interacção, pelo menos de duas maneiras diferentes: de um ponto a outro da sua própria trajectória e no seio da sua própria estrutura, que não seria assim estritamente pontual.

Quando dizemos que o momento magnético é normal, isso significa que está em concordância com os valores numéricos da carga, da massa e do spin (1). De facto, medidas recentes evidenciaram uma anomalia muito pequena (o momento magnético ultrapassaria de algumas unidades em dez mil o seu valor teórico) que parece sugerir, além de uma certa extensão espacial, uma distribuição ligeiramente heterogénea da carga eléctrica.

Se bem que o electrão continue a ser o modelo de corpúsculo elementar, parecem acumular-se provas de que ele possui uma certa estrutura espacial. Mas faltam ainda completamente as precisões respeitantes a esta estrutura, o que é fácil de compreender, visto que ela se manifesta unicamente por desvios da ordem do sétimo ou oitavo décimo-

-milésimo em relação ao electrão rigorosamente pontual.

O *protão* (massa 1836 vezes a do electrão, carga positiva $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$, spin $1/2$, momento magnético anormal) obedece de maneira bastante satisfatória à equação de Dirac; mas os «retróques» necessários são nitidamente mais importantes que no caso do electrão.

A anomalia principal diz respeito ao momento magnético; ele é 2,8 vezes superior ao valor previsto pela teoria de Dirac, tendo em conta a carga, a massa e o spin.

Uma tal anomalia só se pode explicar admitindo que o protão possui uma estrutura na qual a electricidade positiva coexiste com electricidade negativa sendo, não somente mais abundante do que esta, mas ainda situada mais para o exterior, conforme o esquema da figura 37.

Pode-se obter experimentalmente previsões quanto a esta estrutura lançando elec-

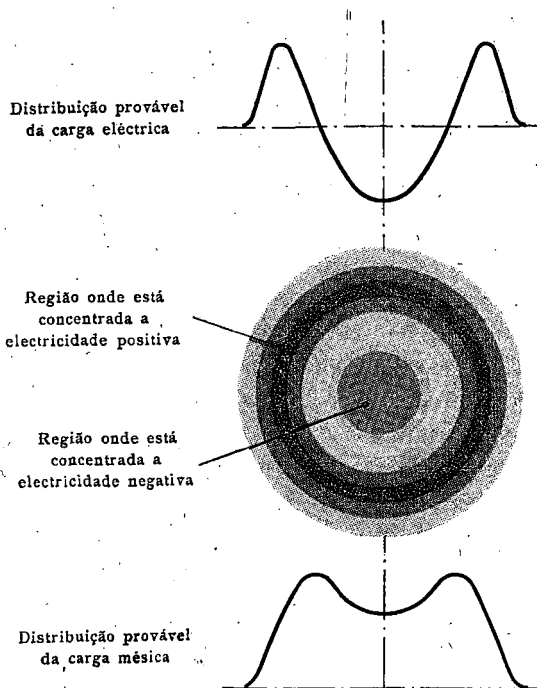


Fig. 37 — Estrutura provável do protão. O momento magnético anormal do protão faz supor que ele não é composto de electricidade positiva homogénea mas, pelo contrário, de uma maioria de carga positiva, exterior, e de uma minoria de carga negativa, interior.

(1) De acordo com a teoria de Dirac que dá aqui um valor duplo do fornecido pelo electromagnetismo clássico.

trões de energia muito elevada através do volume ocupado pelo substracto protónico; aqueles sofrerão desvios mais ou menos importantes (fig. 38). Na interpretação destes desvios, supõe-se o electrão estritamente pontual, o que é válido em excelente aproximação

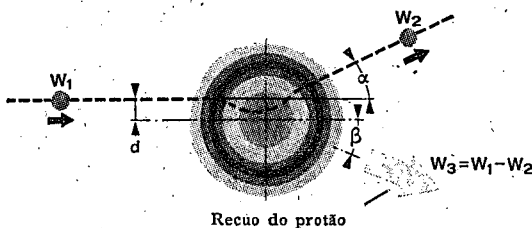


Fig. 38 — Exploração da estrutura protónica por meio de electrões rápidos. Observa-se, em função da energia W_1 do electrão incidente e da distância d (que desempenha o papel de variável eventual), a energia W_2 do electrão emergente, o seu ângulo de desvio α , a energia do protão de recuo W_3 , assim como o ângulo de recuo β . O conhecimento destas diversas grandezas permite reconstituir a trajectória do electrão no interior do protão, o que fornece informações sobre a estrutura deste último.

mação em virtude do que anteriormente se viu.

No domínio teórico, fizeram-se tentativas para explicar a estrutura e o momento magnético anormal pela intervenção de uma nuvem de mesões virtuais. Obtiveram-se sucessos parciais.

O *neutrão* (massa 1839 vezes a do electrão, carga nula, spin 1/2, momento magnético não nulo) obedece à teoria de Dirac com uma precisão comparável à que se encontra para o *protão*. Aqui, também, a anomalia principal reside no momento magnético que deveria ser nulo, visto que o *neutrão* não é electricamente carregado. A explicação é análoga à precedente; como o momento magnético é negativo (ele é igual a 1,9 vezes o valor que *deveria ter* o momento magnético do *protão* no quadro da teoria de Dirac) deve-se admitir que as electricidades positiva e negativa, embora equilibrando-se no plano estático, distribuem-se espacialmente de tal modo que a segunda está, pelo menos em

média, no exterior da primeira, de acordo com o esquema da figura 39.

No estado actual, não parece possível fazer atravessar o *neutrão* por electrões rápidos; com efeito, não sabemos, pelo menos actualmente, realizar um «alvo de neutrões» de maneira satisfatória.

Existe, no entanto, um método indirecto de obter informações; consiste em explorar a estrutura do *deutério*, por exemplo no estado líquido, numa câmara de bolhas. Se se supõe que a estrutura dos corpúsculos não é alterada pelas forças que os unem pode-se, em princípio, obter por diferença a estrutura do *neutrão*, visto ser possível conhecer a do *protão*.

No estado livre, o *neutrão* é instável; ele decompõe-se, como fizemos notar, em um *protão*, um electrão e um anti-*neutrino* (ver acima). O seu período de semi-desintegração é igual a 1110 segundos. Esta instabilidade

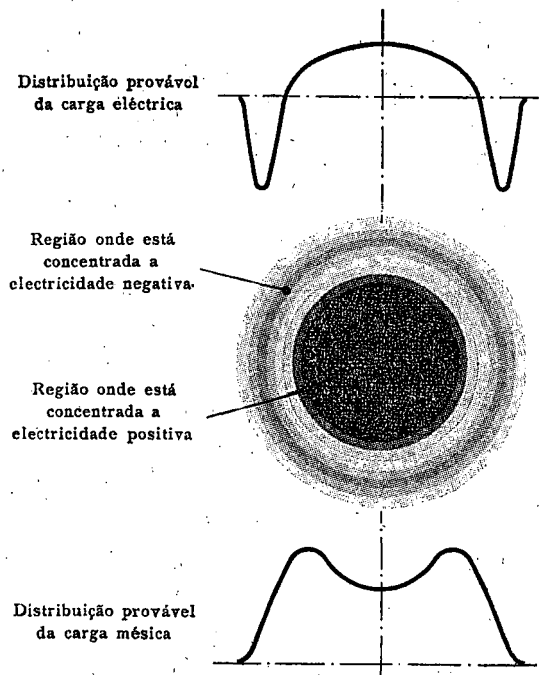


Fig. 39 — Estrutura provável do *neutrão*. Se bem que globalmente neutro, o *neutrão* é intrinsecamente carregado, o que explica o seu momento magnético. Como este é negativo, isso significa que a carga negativa é exterior em relação à carga positiva. A carga métrica é a mesma que a do *protão* e seria distribuída de maneira completamente idêntica.

desaparece, por razões decisivas do ponto de vista energético mas não inteiramente claras do ponto de vista estritamente físico, na maior parte dos núcleos atômicos, onde o neutrão pode assim desempenhar o papel de um constituinte estável da matéria.

Em certos casos, é o próprio protão que se torna instável e transforma-se em um neutrão, um positrão e um neutrino, a menos que ele se contente em captar um electrão da coroa, emitindo um neutrino. É o fenómeno da «captura K».

Os anti-corpúsculos dos precedentes: — A noção de anti-corpúsculo deriva directamente da equação de Dirac e foi, até aqui, muito fielmente verificada pela experiência. O positrão — ou anti-electrão — é conhecido deste há bastante tempo e, neste caso, foram efectuadas medidas muito precisas. O anti-protão e o anti-neutrão são de descoberta relativamente recente; o nosso conhecimento limi-

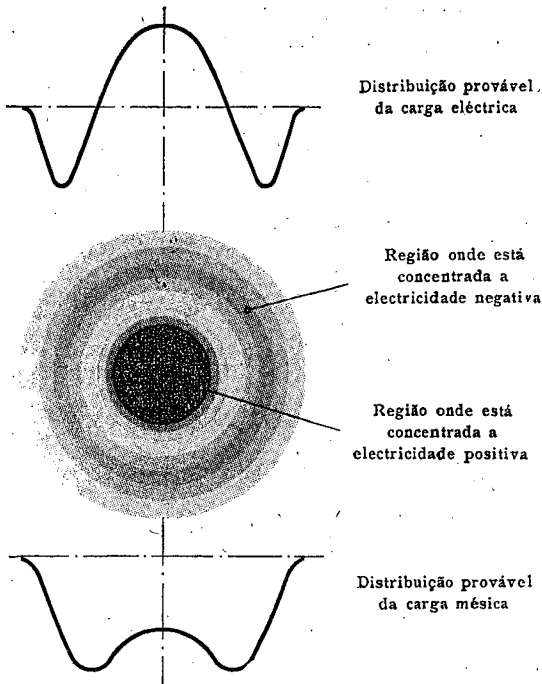


Fig. 40 — Estrutura provável do anti-protão. A carga eléctrica está invertida em relação á do protão e o mesmo deverá acontecer com a carga métrica. Pelo contrário, a massa gravítica é, nos dois casos, a mesma.

ta-se à prova (irrefutável) da sua existência e a algumas verificações sumárias.

Segundo a teoria, o corpúsculo e o anti-corpúsculo diferem unicamente pela *substituição sistemática de toda a electricidade positiva por electricidade negativa e vice-versa*. Eles têm a mesma massa, o mesmo spin e a mesma

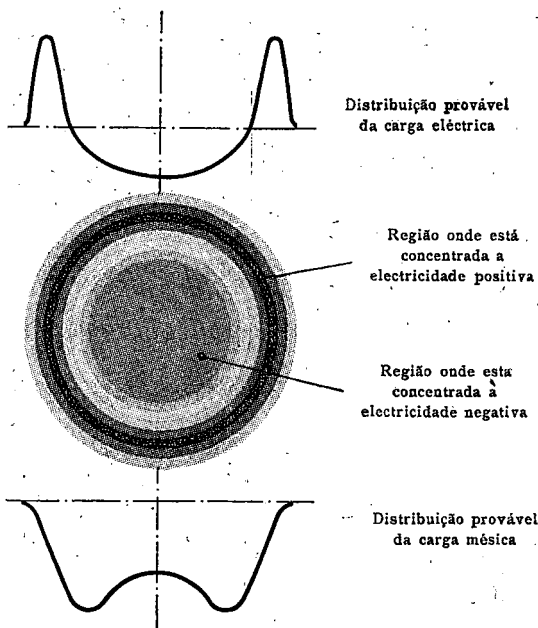


Fig. 41 — Estrutura provável do anti-neutrão. Mantém-se válido o que se fez notar para o anti-protão.

duracão média; a carga e o momento magnético são iguais em módulo, mas os sinais diferentes. Até ao presente, qualquer que seja a precisão das medidas, estas igualdades são sempre exactamente verificadas.

É possível, em princípio, construir anti-matéria com estes anti-corpúsculos, em que o núcleo seria negativo e os electrões periféricos positivos. Esta anti-matéria seria susceptível de se aniquilar ao contacto com a matéria ordinária, com a aparição de uma energia mil vezes superior à da cisão, por unidade de massa.

Precisaremos imediatamente que o fotão é o seu próprio anti-corpúsculo; nada distingue, assim, um fotão emitido pela matéria ou pela anti-matéria. É teoricamente possível, se bem que difficilmente explicável no plano

cosmogénico, que outras galáxias, mesmo outros astros mais próximos, sejam constituídos por anti-matéria.

Não existem provas irrefutáveis que num ponto qualquer do espaço, tenham lugar aniquilações maciças; entretanto, certos astrofísicos não as excluem completamente.

Os electrões aniquilam-se com emissão de fotões (2 ou 3 por par aniquilado); os nucleões com emissão de mesões π (provavelmente 5 por par aniquilado).

Uma última observação. O positrão e o anti-protão devem ser completamente estáveis e o anti-neutrão deve ter o mesmo período que o neutrão. No laboratório, são correntemente observadas durações muito curtas, da ordem de 10^{-8} segundo, mas elas interpretam-se pela inevitável interacção dos anti-corpúsculos com os corpúsculos que constituem os materiais da aparelhagem vizinha e mesmo do ar ambiente.

(Continua)

Noticiário

Laboratório Calouste Gulbenkian de Espectrometria de Massa e Física Molecular

Inaugura-se em breve o Laboratório de Espectrometria de Massa e Física Molecular da Comissão de Estudos de Energia Nuclear do Instituto de Alta Cultura. Este laboratório está instalado em edifício próprio especialmente estudado para o fim a que se destina e a sua construção e equipamento foram em grande parte suportados pela Fundação Calouste Gulbenkian que, para o efeito, atribuiu um subsídio de cerca de três milhões e quinhentos mil escudos.

Este laboratório destina-se fundamentalmente à investigação da Física Molecular, em especial no domínio da Física de Gases. Um dos primeiros temas de investigação será o da Termodifusão, de grande importância no estudo das interacções moleculares e, ainda hoje, largamente utilizada no enriquecimento isotópico. O espectrómetro de massa será assim utilizado nas análises isotópicas que os trabalhos de investigação projectados implicam.

Uma vez que o espectrómetro existente neste laboratório é presentemente o único existente em Portugal, está prevista uma colaboração com outros centros de investi-

gação do País que necessitem de análises espectrométricas.

O laboratório é constituído fundamentalmente pelas secções seguintes:

- 1 — Laboratório de Espectrometria de Massa
- 2 — Laboratório de Física
- 3 — Laboratório de Química de apoio
- 4 — Oficinas, incluindo Electrónica, Mecânica e Sopragem de vidro
- 5 — Biblioteca especializada
- 6 — Secções gerais, incluindo produção de ar líquido, gabinetes, armazéns, etc.

Como unidades anexas encontram-se ainda instaladas no edifício do laboratório, uma secção destinada a investigação em Radiometria e Serviços de Secretaria,

Doutoramento

Em Julho de 1963 doutorou-se na Universidade do Porto o licenciado em Ciências Físico-Químicas, Jaime Araújo Moreira. O Doutor Araújo Moreira apresentou, como tese de doutoramento, um trabalho realizado no «LABORATOIRE de L'AIMANT PERMANENT»

em ORSAY, sob a orientação do Doutor Manuel Valadares e intitulado «Efeitos da estrutura nuclear na conversão interna».

Nota da Redacção

A Direcção da «Gazeta de Física» tinha projectado que o presente número desta

publicação fosse duplo, correspondente aos fascículos 7 e 8 do volume IV. Por dificuldades surgidas não foi possível efectuar-se esse projecto mas como, entretanto, já estavam impressas as primeiras 24 páginas (de 193 a 216), vem nelas indicada, indevidamente, a numeração 7 e 8 à cabeça de cada página.

Boletim bibliográfico

Periódicos existentes na biblioteca de *Portugaliae Physica* (*)

— *Marconi Review* — Londres (1947, inc.; 1948 a 1951, comp.; 1952, inc.).

— *Matemática, Técnica e Ciência* — Rio de Janeiro (1950 inc.).

— *Mathematicae Notae* — Rosario (1946 a 1949, comp.; 1950, inc.; 1951 a 1952, comp.; 1961 a 1964, inc.).

— *Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona* — Barcelona (1942 a 1945, inc.; 1945/47, comp.; 1947 a 1951, inc.).

— *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — Londres (1940, inc.; 1941 a 1952, comp.; 1953, inc.; 1954 a 1956, comp.).

— *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* — (*Geophysical supplement*) — Londres (1940, inc.; 1941/49, comp.; 1950 a 1957, inc.).

— *Nova Acta Regiae Societatis Scientiarum Upsalensis* — Upsala (1939, 1948 e 1950, inc.).

— *Nuclear Science Abstracts* — Washington (1948 a 1952, comp.; 1953, inc.; 1954 a 1957, comp.; 1958, inc.; 1959 a 1962, comp.; 1963 e 1964, inc.).

— *Il Nuovo Cimento* — Bolonha — (1943, comp.; 1944, inc.; 1946 a 1952, comp.; 1953 e 1954, inc.; 1955 a 1958, comp.; 1959, inc.; 1960 a 1964, comp.).

— *Il Nuovo Cimento (Suplemento)* — Bolonha — (1949 a 1951, comp.; 1952 e 1953, inc.; 1954 a 1957, comp.; 1958 e 1959, inc.; 1960 a 1964, comp.).

— *Occasional Notes Royal Astronomical Society* — Londres — (1940/41; 1947/52; 1953/57, inc.).

— *Physica* — Haarlem (1935, 1946, 1949, inc.; 1950 a 1957, comp.; 1958 e 1959, inc.; 1960 a 1962, comp.).

— *Physikalische Berichte* — Berlim — (1947 a 1953, comp.).

— *Portugaliae Mathematica* — Lisboa — (1943 a 1952, comp.).

— *Proceedings of Cambridge Philosophical Society* — (1946 a 1955, comp.; 1956, inc.; 1957 a 1962, comp.).

— *Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Section A)* — Bengalow — (1941 a 1946, inc.; 1947 a 1948, comp.; 1949, inc.; 1950 a 1952, comp.; 1953, inc.; 1954, comp.; 1955, inc.; 1956 e 1957, comp.; 1958, inc.; 1959, comp.; 1960, inc.; 1961, comp.; 1962 a 1964, inc.).

— *Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Section B)* — Bengalow — (1946 e 1947, inc.).

— *Proceedings of the National Institute of Sciences of India* — Delhi — (1940 a 1949, inc.).

— *Proceedings of the Physical Society* — Londres — (1944 a 1954, comp.; 1955, inc.; 1956 e 1957, comp.).

— *Proceedings of the Royal Dublin Institute* — (1942 a 1948, comp.; 1949 a 1954, inc.).

— *Proceedings of the Royal Irish Academy* — Dublin — (1943 a 1952, comp.; 1953 a 1961, inc.).

— *Proceedings of the Royal Canadian Institute* — Toronto — (1942, inc.; 1943 a 1953, comp.).

— *Proceedings of Royal Society* — Londres — (1935, inc.).

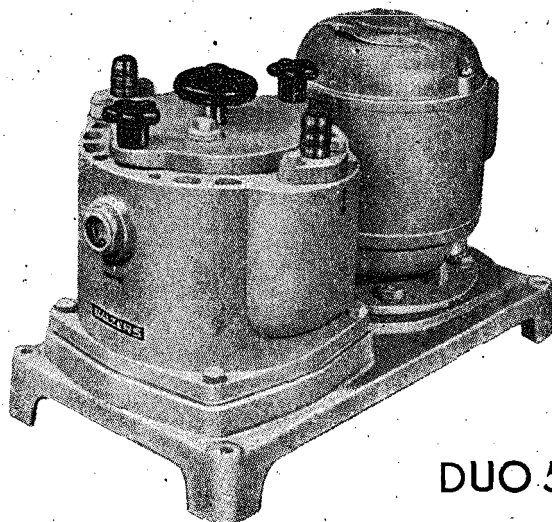
— *Proceedings of Royal Society of Victoria* — (1939 a 1945, comp.; 1947, inc.; 1950, comp.; 1959 e 1960, inc.).

(*) Continuação do vol. IV, fasc. 6, pág. 192.

BALZERS

A BOMBA DE VÁCUO MAIS
APROPRIADA A TRABALHOS
DE CONTAMINAÇÃO

DESMONTAGEM, LIMPEZA
E MONTAGEM EM 30 MINU-
TOS SEM FERRAMENTAS



DUO 5

DOIS ANDARES
VÁCUO MÁXIMO: 8×10^{-5} mm Hg

REPRESENTANTES EXCLUSIVOS:

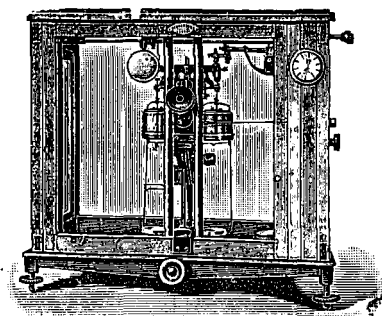
EQUIPAMENTOS DE LABORATÓRIO, L.^{DA}
RUA PEDRO NUNES, 47 — TELEF. 73 34 36 — LISBOA

PIMENTEL & CASQUILHO, L.^{DA}

INSTRUMENTOS DE PRECISÃO

BALANÇAS DE PRECISÃO E ANALÍTICAS,
CAIXAS DE PESOS, LUPAS, TERMÓMETROS,
DENSÍMETROS, CONTA-SEGUNDOS

**MATERIAL DE VIDRO,
PORCELANA E QUARTZO**



RUA DO JARDIM DO REGEDOR, 24-2.º

LISBOA

TELEF.: 324314 • TELEG.: TECNA

HILGER WATTS LTD.

APARELHOS PARA ANÁLISE ESPECTRAL

POLARÍMETROS — REFRACTÓMETROS
ESPECTROFOTÓMETROS — ESPECTRÓGRAFOS
DIFRACTÓMETROS DE RAIOS X
BIBLIOGRAFIA TÉCNICA

EDWARD'S HIGH VACUUM LTD.

TUDO PARA VÁCUO

BOMBAS E APARELHAGEM DIVERSA, UTILIZANDO
O VÁCUO
APARELHAGEM DE METALIZAÇÃO POR
VÁCUO — LIOFILISADORES

BAIRD TATLOCK LTD.

MATERIAL E APARELHAGEM DE LABORATÓRIOS
PARA INVESTIGAÇÃO E INDÚSTRIA

ETS. BETTENDORF S. A.

MATERIAL PARA LABORATÓRIOS PSICOTÉCNICOS
E PSICOLOGIA APLICADA

MATERIAL DIDÁCTICO PARA A INFÂNCIA:
JOGOS, QUADROS, ESTAMPAS, ETC..

REPRESENTANTES

C. SANTOS, S. A. R. L.

SECÇÃO INDUSTRIAL

AV. DA LIBERDADE, 35-1.º

L I S B O A