

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-

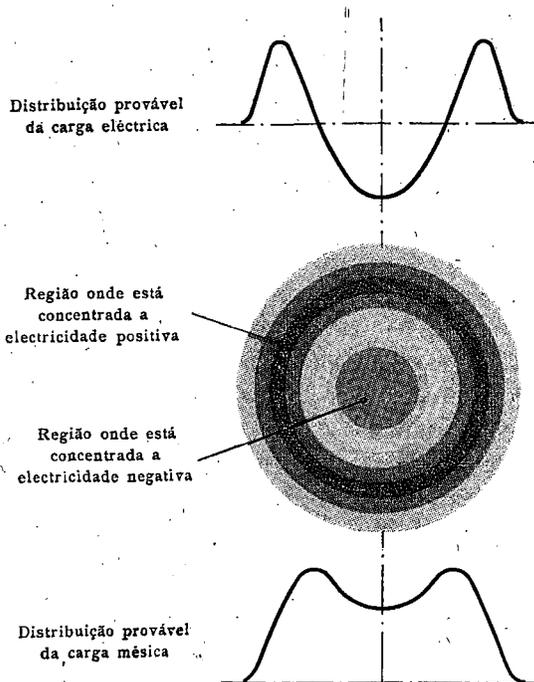


Fig. 37 — Estrutura provável do protão. O momento magnético anormal do protão faz supor que ele não é composto de electricidade positiva homogénea mas, pelo contrário, de uma maioria de carga positiva, exterior, e de uma minoria de carga negativa, interior.

(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

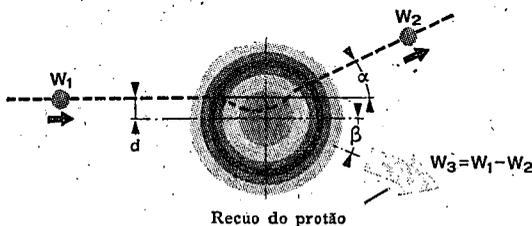


Fig. 38 — Exploração da estrutura protónica por meio de electrões rápidos. Observa-se, em função da energia W_1 do electrão incidente e da distância d (que desempenha o papel de variável eventual), a energia W_2 do electrão emergente, o seu ângulo de desvio α , a energia do protão de recuo W_3 , assim 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 deuteron, 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

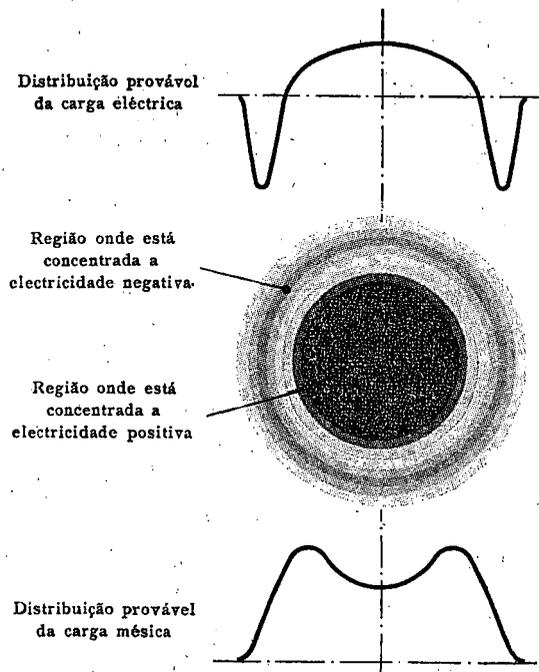


Fig. 39 — Estrutura provável do neutrão. Se bem que globalmente neutro, o neutrão é intrinsecamente carregado, o que explica o seu momento magnético. Como este é negativo, isso significa que a carga negativa é exterior em relação à carga positiva. A carga métrica é a mesma que a do protão e seria distribuída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

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

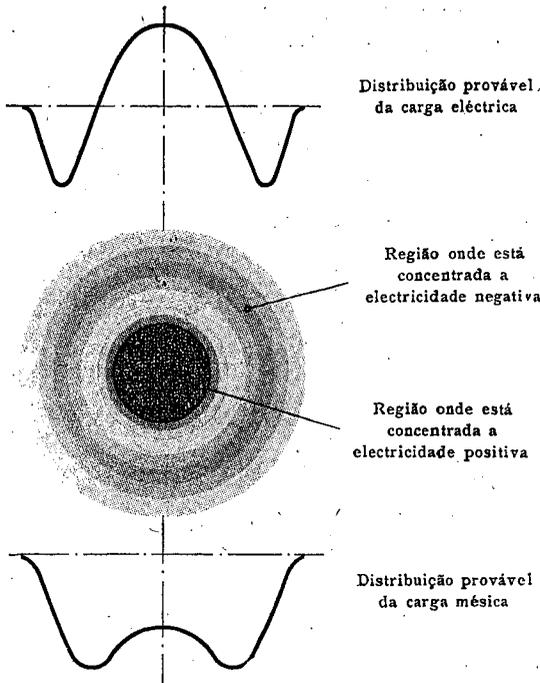


Fig. 40 — Estrutura provável do anti-protão. A carga eléctrica está invertida em relação á do protão e o mesmo deverá acontecer com a carga métrica. Pelo contrário, a massa gravítica é, nos dois casos, a mesma.

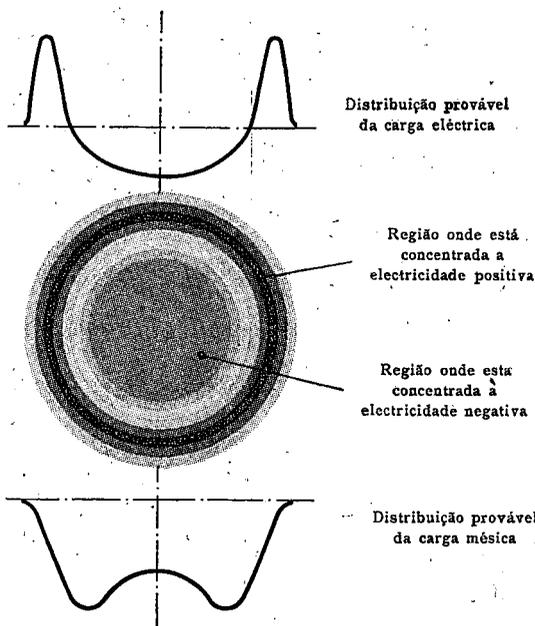


Fig. 41 — Estrutura provável do anti-neutrão. Mantém-se válido o que se fez notar para o anti-protão.

duração 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»