

## Progressos recentes em Física Corpuscular

(Continuação do número anterior)

### O CONCEITO DE INTERACÇÃO EM FÍSICA MODERNA

#### O conceito de força em Mecânica Clássica

Voltemos, por um momento, à noção de «corpúsculo macroscópico» introduzida anteriormente. O seu movimento é devido à existência de forças. Em física conhecem-se várias espécies de forças:

a) forças gravitacionais, que obedecem à lei de Newton ou, para distâncias muito grandes, à sua extensão na forma da teoria de Einstein (relatividade geral);

b) forças electrostáticas, que obedecem à lei de Coulomb;

c) forças magnéticas (influência dum campo magnético sobre uma carga em movimento), que obedecem a uma relação deduzida a partir da lei de Biot e Savart\*:

$$\vec{F} = -g \vec{B} \times \vec{v};$$

d) forças de coesão intermolecular;

e) forças de ligação química;

f) forças especificamente nucleares, que mantêm os prótons e os neutrões num núcleo, apesar da repulsão electrostática entre os primeiros, e da ausência de carga nos últimos.

As forças gravitacionais e electrostáticas são newtonianas, isto é, em muito boa aproximação, variam com o inverso do quadrado da distância de separação.

\* Simbolismo usual: F, força; q, carga; B, indução magnética; v, velocidade da carga.

Considera-se que todas estas forças actuam a distância, de corpúsculo a corpúsculo, através do vácuo.

#### Conceito de força de troca

A Mecânica Quântica conduz à introdução dum novo tipo de força, que não pode ser descrito como uma combinação de forças dos tipos precedentes.

Consideremos um ião molecular de hidrogénio,  $H_2^+$ ; é constituído por dois prótons e um electrão. Do ponto de vista da teoria clássica, o electrão pode, nalguns casos, descrever uma órbita em forma de oito à volta dos dois prótons (fig. 21).

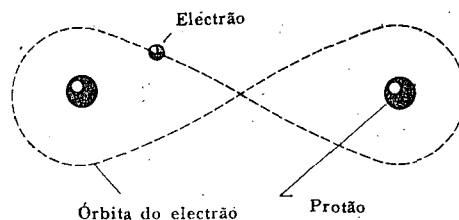


Fig. 21 — No ião hidrogénio molecular, o electrão descreve uma órbita em forma de oito à volta dos dois prótons. A descrição correcta do movimento só pode fazer-se pela equação de Dirac.

Este modelo serve para a introdução, no caso mais simples, da força de troca.

Um tal sistema é relativamente fácil de quantificar, quer pelo método de Bohr-Sommerfeld, quer pelo de Schrödinger-Dirac; a quantificação pode fazer-se para qualquer valor da distância entre os dois prótons (aqui supostos em repouso). É evidente que a energia de cada estado quântico é uma função dessa distância. Chegamos agora à parte mais delicada do argumento. É bem

sabido que a derivada da energia em ordem à distância é uma força. Desta maneira, introduzimos, pela só intervenção da quantificação, uma espécie de força inteiramente nova (fig. 22).

Deve notar-se que esta força depende do nível quântico ocupado pelo electrão. De facto, à parte um caso improvável de igualdade, a derivada da energia em ordem à distância entre os dois protões depende dos números quânticos  $n_i$  introduzidos pela teo-

Se observamos o fenómeno mais de perto verificamos que ele está associado com a possibilidade do electrão ser trocado entre a zona de acção dum protão, e a zona de acção do outro; foi por isto que se deu a esta força o nome de «força de troca»\*.

Finalmente, a distância normal de separação dos dois protões (à parte oscilações eventuais introduzidas numa versão mais elaborada da teoria) corresponde ao equilíbrio entre a força de troca respeitante ao nível

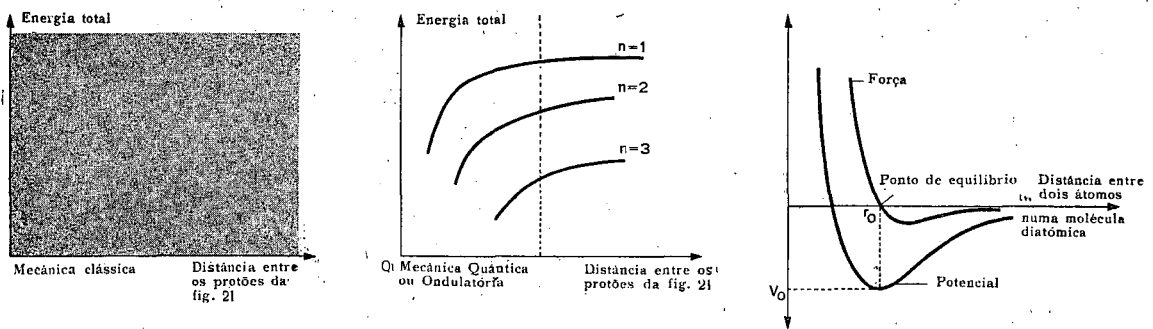


Fig. 22 — Ilustração do conceito de força de troca: se, num sistema como o da fig. 21, se faz o gráfico da energia total (cinética + potencial) como função da distância entre os protões, uma nova espécie de força, a chamada força de troca, aparece imediatamente. No sistema da Mecânica Clássica, o electrão pode ter qualquer energia para qualquer valor da distância; por isso o diagrama correspondente é uma mancha uniforme. Por outro lado, na Mecânica Quântica, ou Ondulatória, apenas alguns valores da energia, os chamados valores próprios, são possíveis para cada valor da distância. No gráfico vê-se que os pontos correspondentes pertencem a um certo número de curvas, identificadas pelos respectivos números quânticos (admitimos, para simplificar, que apenas existe um tipo de números quânticos). Ao longo de cada curva aparece assim uma nova força — igual à derivada da energia em ordem à distância.

Em princípio nada se modifica se a partícula trocada é materializada num extremo da sua trajectória, e desmaterializada no outro.

Fig. 23 — No modelo da figura 21, os dois protões tendem a colocar-se numa posição tal que a força de troca puramente quântica iguale a força de repulsão electrostática.

ria de Sommerfeld, ou do valor próprio introduzido pela teoria de Schrödinger-Dirac.

É fácil compreender porque não existem tais forças em Mecânica Clássica. Com efeito, na ausência de condições quânticas (isto é, de condições restritivas) o electrão podia ter qualquer energia para qualquer distância entre os dois protões. A força de troca aparece como uma derivada da energia em ordem à distância entre os protões para um dado valor dos números quânticos (ou do valor próprio).

quântico de menor energia e a repulsão electrostática de Coulomb (fig. 23). A análise de pequenas oscilações em torno deste ponto mostra que o equilíbrio é estável (pelo menos se a orientação do spin do electrão é correcta).

Convem salientar que esta força de troca não é do tipo newtoniano.

\* O leitor já um pouco familiarizado com a Mecânica Quântica encontrará uma explicação satisfatória desta questão em Joos, Theoretical Physics, London 1956, pág. 704 e seg. (N. T.).

### Generalização: a força de troca conterá como casos particulares os outros tipos de força?

A análise precedente constitui o primeiro passo para uma teoria da estabilidade molecular e cristalina. Permite-nos interpretar as forças de coesão e as forças de ligação química como resultantes da troca dum electrão entre os átomos pertinentes.

Em breve se concluiu que as forças eléctricas e magnéticas se podiam interpretar através dum formalismo semelhante. De facto, compreendeu-se que elas resultam duma troca de fotões (guiados pelas ondas electromagnéticas) entre partículas eléctricamente carregadas. Consideremos, por exemplo, dois prótões que passam perto um do outro (figs. 24 a 27). Pode dizer-se que o prótão n.º 1 emite, num certo instante, um

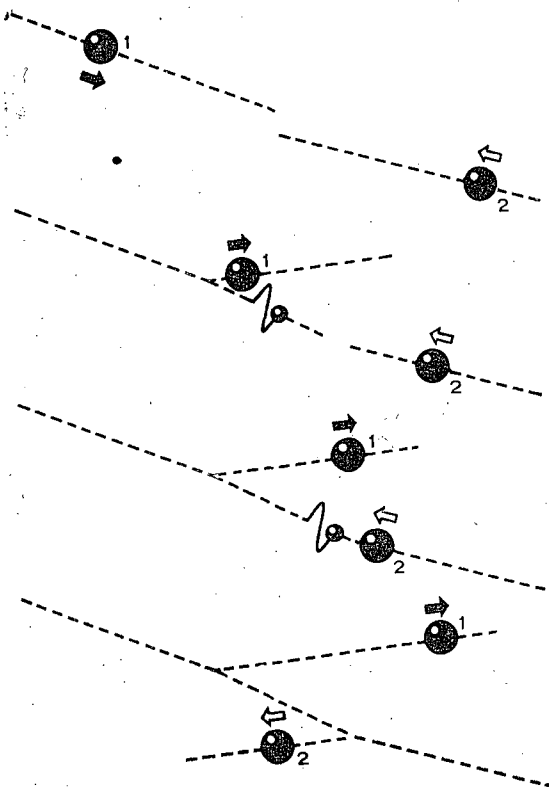


Fig. 24 a 27 — A repulsão electrostática entre dois prótões resulta dum grande número de trocas de fotões.

fotão que caminha em direcção ao prótão n.º 2, levando consigo momento e energia; ao ser capturado por esse prótão transfere-lhe esse momento e essa energia. Desta forma, ambos os prótões modificam as suas trajectórias. Pode dizer-se que as trajectórias reais não são curvilíneas, mas sim constituídas por linhas quebradas com um número enorme de segmentos.

Podemos ainda considerar que o prótão emite fotões mesmo quando não há outro prótão nas vizinhanças; contudo estes fotões são «virtuais» e, eventualmente, são recapturados pelo prótão emissor. A lei de conservação da energia pode mesmo ser temporariamente violada se o intervalo de tempo entre a emissão e a captura fica dentro dos limites admitidos pelas relações de incerteza de Heisenberg ( $\Delta E \Delta t = h$ ).

O campo electromagnético das partículas carregadas é o resultado da presença destes fotões virtuais.

Fisicamente, é mais difícil interpretar uma força atractiva do que uma força repulsiva; mas, usando a Mecânica Ondulatória, o caso é diferente. A derivada da energia em ordem à distância, que define a força de troca, tanto pode ser negativa como positiva. A dificuldade é assim inerente ao nosso modelo, demasiado concreto.

Tem agora interesse examinar a lei matemática deduzida por meio deste formalismo. O potencial de Coulomb escreve-se, na notação usual (no sistema racionalizado MKSA),

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

O potencial resultante da troca de fotões tem uma forma um pouco mais complicada:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \cdot e^{-(2\pi m_0 c/h) \cdot r}$$

( $m_0$  = massa em repouso do fotão;  $c$  = velocidade da luz;  $h$  = constante de Planck).

A equação interpreta-se facilmente. O factor proporcional ao inverso da distân-

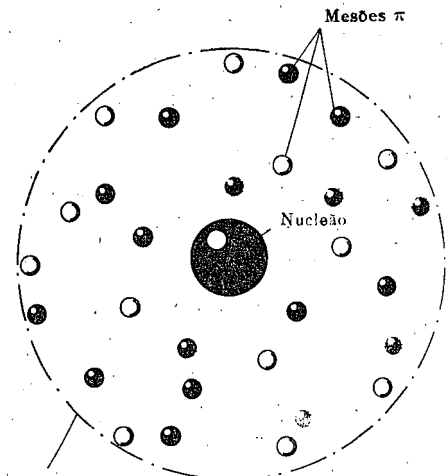
cia (correspondendo a uma força variando com o inverso do quadrado da distância) condiciona a distribuição espacial dos fótons à medida que se afastam do centro de força. O factor exponencial toma em consideração o decréscimo adicional devido ao facto dos fótons apenas se poderem deslocar de uma distância finita durante o intervalo de tempo em que a conservação da energia é violada.

Se a massa do fóton é exactamente zero, as duas expressões anteriores são iguais; isto deve-se ao facto de um corpúsculo com massa zero poder violar a conservação da energia por uma quantidade arbitrariamente pequena, isto é, o tempo durante o qual se tolera essa violação pode tornar-se arbitrariamente grande, e assim o fóton pode percorrer uma distância arbitrariamente grande.

É certo que o fóton tem uma massa em repouso muito pequena, várias ordens de grandeza abaixo da do electrão; mas não é certo que seja exactamente zero. Deve salientar-se que os testes precisos da lei de Coulomb feitos até aqui se têm restringido à escala laboratorial. Fenómenos como os observados na coroa solar (que é um gás electrónico em equilíbrio entre a atracção gravítica e a repulsão electrostática) parecem indicar que a lei de Coulomb não é válida para distâncias da ordem de grandeza da distância Terra-Lua. Isto corresponderia a uma massa em repouso do fóton da ordem de  $10^{-68}$  kg (em números redondos, a do electrão é  $10^{-30}$  kg).

Yukawa transpôs para o campo nuclear a teoria acima delineada. Na realidade, a experiência mostra que as forças especificamente nucleares diminuem muito rapidamente com o inverso da distância, muito mais rapidamente do que as forças newtonianas. Desta forma concluiu que, se elas são forças de troca, a massa das partículas trocadas deve ser bastante elevada. De facto, identificaram-se experimentalmente estas partículas com os mesões  $\pi$ , cuja massa é 272 vezes a do electrão.

Contudo, a troca de mesões  $\pi$ , no núcleo, está longe de ser tão simples como a dos fótons discutida acima. Devem introduzir-se correcções que tomem em consideração a possibilidade da troca simultânea de vários mesões  $\pi$ , assim como a existência, para o próton e o neutrão, de alguma espécie de *estrutura espacial*, que será discutida adiante.



Limite da zona do deslocamento permitido aos mesões  $\pi$  sem violação da lei de conservação da energia

Fig. 28 — Quando a massa em repouso das partículas trocadas é diferente de zero, existe uma zona limite para além da qual as partículas não podem deslocar-se sem violarem a lei da conservação da energia. Quanto maior é a massa das partículas trocadas, menor é o alcance das forças de troca.

A lista está quase completa; faltam ainda as forças gravíticas, que já dissemos podem interpretar-se também como forças de troca. As partículas que se trocam, os gravitões, têm um massa ainda menor do que a do fóton, e o seu spin é quatro vezes o do electrão. Isto permite-nos interpretar não só a lei de Newton, mas também a correcção de Einstein para distâncias intergalácticas, e alguns aspectos da relatividade geral.

A lista está agora completa, e a resposta à nossa pergunta inicial parece ser «sim». Todas as forças indicadas são forças de troca ou, pelo menos, podem interpretar-se como tal.

Infelizmente, esta unidade não é absoluta e, em breve encontraremos uma nova dificuldade.

### Interação corpuscular

A conclusão de que todas as forças são forças de troca leva-nos a pensar que o próprio conceito de força é acessório em Física Corpuscular; o verdadeiro conceito fundamental é o de interação.

O que é uma interação? É um conceito muito geral que diz respeito à influência mútua de partículas a pequena distância umas das outras. Contudo, limitamo-nos a considerar por agora as interações que conduzem a forças de troca; são de três espécies:

a) Um corpúsculo com massa gravitacional  $M$  emite ou absorve um gravitão  $g$ :

$$M \leftrightarrow M + g$$

Esta é a interação gravitacional; a atracção newtoniana resulta de um número, em geral muito grande, de tais interações.

b) Um corpúsculo com carga eléctrica  $E$  emite ou absorve um fóton  $\gamma$ :

$$E \leftrightarrow E + \gamma$$

Esta é a interação electromagnética; a força de Coulomb e a força magnética resultam de um número, em geral muito grande, de tais interações.

c) Um nucleão ou qualquer corpúsculo com uma «carga nuclear» ou «carga mesónica»  $N$  emite ou absorve um mesão  $\pi$ :

$$N \leftrightarrow N + \pi$$

Esta é a interação nuclear, designada actualmente por «interacção forte» por razões que veremos adiante: as forças especificamente nucleares ou forças mesónicas resultam de tais interações.

Estas três espécies de interações permitem-nos explicar conjuntamente os fenómenos gravitacionais e electromagnéticos e, no campo nuclear, a estabilidade geral das estruturas nucleares, a grande maioria das

reações nucleares, a desintegração alfa e gama, etc. Infelizmente, as desintegrações beta e mesão  $\pi$ -mesão  $\mu$ , etc., não podem ser explicadas da mesma maneira. Todos estes fenómenos requerem a intervenção duma nova espécie de interacção, a chamada «interacção fraca». Mas, não só estas interações

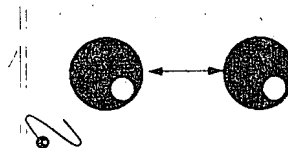


Fig. 29 — Exemplo de uma interacção elementar. Um corpúsculo emissor emite (materializa) ou absorve (desmaterializa) uma partícula de troca.

são ainda muito pouco compreendidas, como parecem ficar completamente fora do esquema geral das forças de troca. E isto está longe de ser a única dificuldade característica das interações fracas.

### Comparação das interações entre si

Torna-se importante salientar nesta altura que as quatro espécies de interacção têm intensidades extremamente diferentes.

É fácil comparar a intensidade relativa das forças gravitacionais, eléctricas e nucleares, pois que cada potencial é o produto duma função hiperbólica por uma exponencial. Se considerarmos uma distância  $a$  que a exponencial tenha um valor suficientemente perto da unidade, a comparação entre os factores hiperbólicos é imediata: basta comparar os seus coeficientes numéricos.

Consideremos então dois protões muito perto um do outro: atraem-se gravitacionalmente, repelem-se electrostáticamente, e atraem-se nuclearmente. Neste passo não estamos interessados no sinal de cada força, mas sim na sua intensidade.

Vê-se imediatamente que a atracção gravítica entre os dois protões é dezenas de vezes inferior em ordem de grandeza às duas

outras; estas são também bastante diferentes entre si: a força nuclear é duas ordens de grandeza maior do que a electromagnética.

Onde devemos colocar a interacção fraca? A comparação é menos simples porque estamos fora do campo das «forças de troca»; podem, contudo, usar-se métodos indirectos (por exemplo, através da noção de «duração da interacção»); conclui-se que a interacção fraca está cerca de doze ordens de grandeza abaixo da electromagnética. É o que se representa na fig. 30.

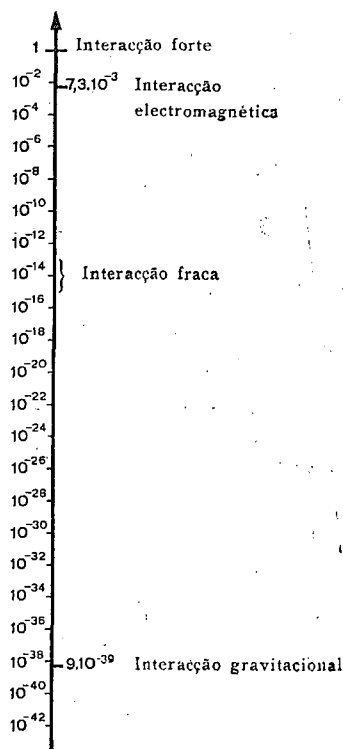


Fig. 30 — Representando num gráfico logarítmico as intensidades relativas das quatro espécies de interacções vê-se imediatamente que as suas ordens de grandeza são bastante diferentes. Deve notar-se que a interacção fraca, que não respeita a forças de troca, só pode ser localizada por métodos indirectos (duração da interacção, taxa de reacção, etc.).

Uma tal diferença nas intensidades das interacções forte e fraca conduzirá normalmente, se tivermos de tratar com forças no sentido ordinário do termo, a que as últimas sejam completamente desprezáveis em face

das primeiras. Isto é de facto verdade para os fenómenos estáticos. Mas é importante recordar que a força, com o seu carácter de continuidade, foi substituída pela interacção isto é, por um fenómeno de «tudo-ou-nada». Nesta imagem descontínua, as interacções fracas não são desprezáveis, pois se podem manifestar num estado puro: a desintegração beta é um dos exemplos mais importantes em que isto acontece.

As figs. 31 a 34 exemplificam os quatro tipos de interacção que acabamos de introduzir.

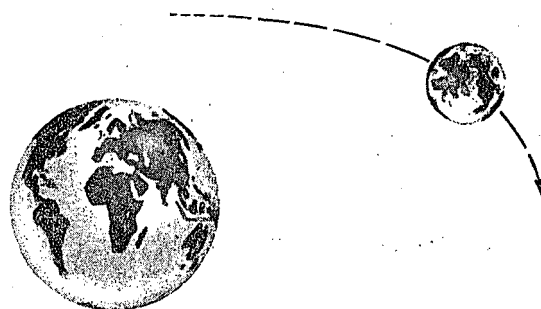
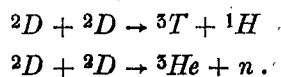


Fig. 31 — Exemplo de interacção gravítica: o movimento do sistema Terra-Lua é condicionado pelas interacções gravíticas, apesar da sua relativamente pequena intensidade, pois que os corpos não estão carregados electricamente duma maneira apreciável, e estão muito para além do alcance das forças nucleares.

A interacção gravítica é mencionada apenas no intuito duma classificação completa; a sua ordem de grandeza separa-a inteiramente das outras.

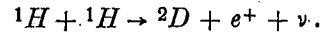
A interacção electromagnética, isto é, principalmente a repulsão electrostática entre os dois protões, predomina a pequenas energias cinéticas (fig. 32).

No que respeita à interacção forte, torna-se especialmente difícil arranjar uma imagem. Se os corpúsculos que interactivam são deutões, a interacção forte aparece, a energias cinéticas relativamente pequenas, na forma de uma ou outra das reacções nucleares seguintes:



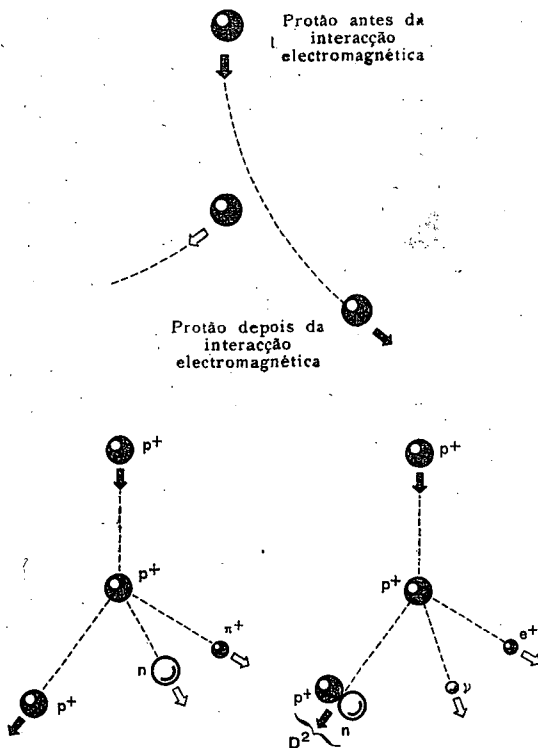
Se os corpúsculos são dois protões, a única interacção forte possível implica a materialização de mesões  $\pi$  ou o aparecimento das chamadas «partículas estranhas», a que mais tarde nos havemos de referir. Estas reacções necessitam de energias ciné-

vista químico, quer energético, permite que a interacção fraca se manifeste. Ela origina a seguinte reacção (fig. 34).



Com a ajuda da energia cinética, um dos protões transforma-se num neutrão (que é capturado pelo outro protão, formando um deuterão). O resíduo da transformação, um positrão e um neutrino, aparecem como radiação emitida.

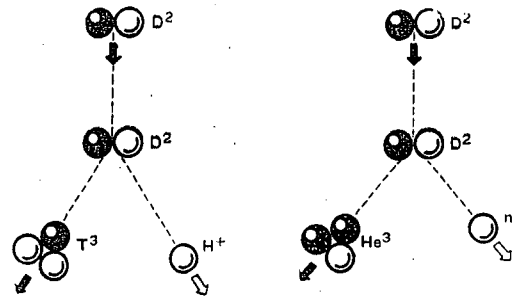
Esta interacção é tão fraca que a taxa da reacção é, a uma dada energia, cerca de  $10^{20}$  vezes menor do que a da reacção  ${}^2D + {}^2D$  indicada acima. De facto, um tal processo nunca foi observado no laboratório, mas a sua existência é, no entanto, considerada como certa em virtude de certas observações astrofísicas. Observa-se efectivamente, duma maneira indirecta mas segura, o resultado da reacção — criação de deutério e de energia. Para mais, a interacção forte está completamente excluída neste intervalo de



Figs. 32, 33, 34 — Interacções electromagnéticas, forte e fraca, dum protão com outro protão: dois protões que se repelem electrostáticamente sofrem uma interacção electromagnética (fig. 32). Esta espécie de interacção é a mais importante a baixas energias. Para energias da ordem de várias centenas de MeV, aparecem as interacções fortes, a mais simples das quais envolve a materialização dum mesão  $\pi$  (fig. 33). Contudo, a baixas energias existe uma interacção fraca (fig. 34) que faz aparecer, em vez do mesão  $\pi$ , um par electrão-positrão. A taxa a que esta reacção se dá é extremamente baixa.

ticas muito grandes, que apenas se podem atingir com os aceleradores de partículas mais potentes.

Esta circunstância singular, acrescida do facto do balanço do efeito da interacção electromagnética ser zero quer do ponto de



Figs. 35 e 36 — A interacção fraca é inobservável com deuterões porque, mesmo às energias mais baixas, duas importantes interacções fortes são energeticamente possíveis.

energia. Isto constitui um exemplo da maneira pela qual se podem observar interacções fracas.

A desintegração espontânea dum neutrão (dando protão + electrão + antineutrino) é um outro exemplo; de facto, este é o exemplo mais simples da desintegração beta. Também aqui a interacção forte correspondente,

isto é, a desintegração dum neutrão num próton e num mesão  $\pi$  negativo, é energeticamente proibida (pelo menos como resultado final). A interacção fraca observa-se assim num estado puro. Não há interacção electromagnética competitiva porque o neutrão é electricamente neutro.

Na continuação deste artigo veremos

como as interacções fracas, devido às suas estranhas características, modificam completamente a estrutura da Física Corpuscular; trataremos das partículas elementares, das partículas estranhas e da lei da paridade.

(Continua)

## Antologia

*A Gazeta de Física inicia, no presente fascículo, uma secção destinada à reprodução, sempre que possível na língua original, de memórias relativas a descobertas notáveis no domínio da Física.*

*Julga-se contribuir, desta maneira, para um melhor conhecimento das referidas memórias pelos leitores da Gazeta de Física.*

*Parece-nos interessante começar essa publicação com as primeiras notas de H. Becquerel e dos Esposos Curie, inseridas no «Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences» (Paris) e referentes à descoberta da radioactividade e do rádio.*

PHYSIQUE — *Sur les radiations émises par phosphorescence.* Note de M. Henri Becquerel. [*Comptes rendus*, t. CXXII, p. 420, (1896)].

«Dans une précédente séance, M. Ch. Henry a annoncé que le sulfure de zinc phosphorescent interposé sur le trajet de rayons émanés d'un tube de Crookes augmentait l'intensité des radiations traversant l'aluminium.

«D'autre part, M. Niewenglowski a reconnu que le sulfure de calcium phosphorescent du commerce émet des radiations qui traversent les corps opaques.

«Ce fait s'étend à divers corps phosphorescents et, en particulier, aux sels d'urane dont la phosphorescence a une très courte durée.

«Avec le sulfate double d'uranium et de

potassium, dont je possède des cristaux formant une croûte mince et transparente, j'ai pu faire l'expérience suivante:

«On enveloppe une plaque photographique Lumière, au gélatinobromure, avec deux feuilles de papier noir très épais, tel que la plaque ne se voile pas par une exposition au Soleil, durant une journée.

«On pose sur la feuille de papier, à l'extérieur, une plaque de la substance phosphorescente, et l'on expose le tout au Soleil, pendant plusieurs heures. Lorsqu'on développe ensuite la plaque photographique, on reconnaît que la silhouette de la substance phosphorescente apparaît en noir sur le cliché. Si l'on interpose entre la substance phosphorescente et le papier une pièce de monnaie, ou un écran métallique percé d'un dessin à jour, on voit l'image de ces objets apparaître sur le cliché.