

## Introdução à Teoria dos Quarks

por M. H. CARDOSO

(Bolsista do I. A. C. no Instituut voor Kernphysisch Onderzoek, Amsterdão)

### 1. Generalidades

Um dos campos mais interessantes da Física é o da investigação e estudo das partículas elementares. Desde 1896 quando Thomson observou o desvio de raios catódicos por campos eléctricos e magnéticos, e identificou essa radiação como feixes de partículas de carga negativa, os electrões, uma grande história teria de ser contada até hoje em que foram descobertas à volta de 100 partículas a que ainda chamamos elementares, embora o nome de subatómicas, para algumas, fosse mais apropriado. As partículas elementares têm sido encontradas em fontes radioactivas e radiação cósmica (radiação de proveniência extraterrestre, constituída essencialmente por partículas positivas, a maior parte protões, que colidindo a grande velocidade com os componentes da atmosfera produz electrões, positões, fotões, muões, mesões, bariões). Mas o mais eficiente processo de estudo e descoberta de partículas elementares tem sido o da produção artificial em aceleradores, seguida de observação em grandes câmaras de bolhas, onde se produzem reacções que são registadas em centenas de milhar de fotografias. São necessárias grandes energias para produzir reacções novas, e por isso têm-se construído máquinas cada vez maiores. Os maiores valores de energia até hoje atingidos foram obtidos em Serpukhov (USSR) 70 GeV (protões), em Brookhaven (USA) 33 GeV (protões) e no CERN (Europa) 28 GeV (protões), estando já projectada a construção no CERN dum

sincrotrão de protões de 200 GeV com possibilidade de aumento até 300 GeV. O maior acelerador de electrões existe em Stanford (USA) e atinge os 20 GeV.

### 2. Tipos de interacção entre partículas

O modo de interacção de partículas pode ser forte ou fraco conforme as partículas em jogo. Os nucleões (protões e neutrões), por exemplo, interactuam fortemente, enquanto que reacções com leptões (electrões, muões, neutrinos) envolvem interacções fracas.

Atribui-se a interacção forte a um campo mesónico (mesões  $\pi$  e K). Assim, por exemplo, a interacção entre nucleões é devida a uma transferência de piões virtuais de massa em repouso diferente de zero, da mesma forma que o campo electromagnético é transportado por fotões de massa em repouso igual a zero. Os piões têm spin zero (são portanto bosões), paridade negativa, podem ter carga positiva, negativa ou nula e por terem massa em repouso diferente de zero, e portanto grande energia, as forças que originam são de pequeno alcance (1 a 2 fm) embora extremamente fortes.

As interacções fracas, responsáveis por exemplo pelo declínio  $\beta$  ( $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ ) e pelo declínio do muão ( $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ ) supõem-se ser devidas a um bosão intermediário que terá grande massa e vida muito curta mas que nunca foi encontrado.

Se atribuímos o valor 1 à intensidade

da interacção forte, a interacção fraca terá uma intensidade  $3.1 \times 10^{-12}$ , estando portanto entre a interacção electromagnética ( $1/137$ ) e a gravitacional ( $0.8 \times 10^{-36}$ ).

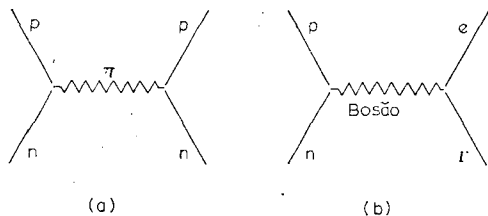


Fig. 1—(a) Troca de um píon virtual entre nucleões. (b) O bóson intermediário origina um par de leptões que, conjuntamente com o prótão, constituem os produtos finais do decaimento do neutrão.

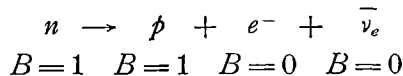
### 3. Números quânticos na classificação das partículas

Em todos os processos até hoje estudados, de macroscópicos até subatômicos, há conservação de energia, de carga, de momento linear e de momento angular dos sistemas. É no entanto útil introduzir outros parâmetros cuja conservação só é violada em determinadas interacções, sendo essa interacção revelada precisamente pela violação da conservação do parâmetro. É o caso dos números quânticos paridade e estranheza que não são conservados em interacções fracas. Há também parâmetros que são introduzidos sem que qualquer significado físico lhes seja associado, mas apenas com o objectivo de que certas leis de conservação sejam satisfeitas, como no caso da estranheza e do número bariónico.

Vejamos então a definição dos números quânticos mais importantes associados às partículas elementares, assim como as respectivas leis de conservação:

$B$ —Número bariónico—número 0, 1 ou  $-1$ . Os bariões ( $p, n, \Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega$ )

possuem número bariónico 1, e as respectivas antipartículas  $-1$ . Todas as partículas que não sejam bariões têm número bariónico zero. Verifica-se sempre a conservação aditiva de número bariónico, o que significa que um barião só pode ser originado por outro barião e que um antibarião corresponderá ao desaparecimento de um barião. Por exemplo, na reacção



$B$  é conservado igual a 1. A lei da conservação do número bariónico é a única justificação para o facto de a reacção  $p \rightarrow e^+ + \gamma$  não se verificar.

$S$ —Estranheza—número associado às partículas chamadas estranhas, e que assim são consideradas porque a sua vida média é longa em relação ao tempo da sua produção. As partículas estranhas são ou bariões que decaem para prótons e píões, ou mesões que decaem para píões ou leptões. Como as partículas estranhas são sempre produzidas em pares, por exemplo  $p + \pi^- \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ , supõe-se que há um número quântico  $S$  que lhes está associado e que é conservado nas interacções fortes e electromagnéticas (assim  $\Lambda^0$  tem  $S=-1$ ; em  $K^0$  tem  $S=1$  uma vez que  $p$  e  $\pi$ , não sendo estranhas, têm  $S=0$ ). Esse número quântico, de que a partícula estranha não se pode ver livre, seria o responsável pela sua longa vida média, pois só pode decair violando a conservação de  $S$  ( $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ ;  $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ ). No dia em que pudessemos ter alvos de  $K^0$  por exemplo, que bombardeados com  $\Lambda^0$ , produzissem  $p$  e  $\pi^-$  com a mesma velocidade da reacção inversa, teríamos um elemento a favor das razões que levaram os físicos a considerar o número  $S$ .

$T$ —Spin isotópico—Este número quântico apareceu primeiro apenas asso-

ciado aos nucleões. Uma vez que  $p$  e  $n$  têm massas não muito diferentes e propriedades semelhantes, diferindo essencialmente na carga, podemos considerá-los como dois aspectos de uma mesma partícula  $N$ , e dizemos que  $N$  é um dublete. Imagine-se então uma função  $T$  que tem o valor  $1/2$  para  $N$  e cuja projecção  $T_3$  no eixo dos  $z$  dum sistema fictício de eixos coordenados, só pode ser  $1/2$  ou  $-1/2$ . No primeiro caso temos o protão e no segundo caso o neutrão. De forma semelhante, dizemos que os piões por exemplo, formam um triplete, pois existem  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  e  $\pi^+$ . Então  $T=1$  para  $\pi$ , e  $T_3=1, 0, -1$  dará os três aspectos da partícula  $\pi$ . Tanto  $\Lambda^0$  como  $\Omega^-$  (báriões) são singletes: têm  $T=0$  e portanto  $T_3=0$ . As partículas são assim distribuídas em grupos de multiplicidade  $2T+1$ , cada grupo possuindo partículas que essencialmente só diferem na carga. Nas interacções que são independentes da carga (interacções fortes) verifica-se conservação do spin isotópico  $T$ .

$Q$  — Carga — conservada em todas as reacções qualquer que seja a interacção em jogo.

$Y$  — Hipercarga —  $Y=2(Q-T_3)=B+S$  (fórmula de Gell-Mann e Nishijima). Uma vez que  $B$  é sempre conservado,  $Y$  é conservado nas interacções fortes e electromagnéticas, tal como o número quântico  $S$ .

As antipartículas têm todas estes números quânticos com o sinal contrário das respectivas partículas, mas têm a mesma massa e a mesma vida média.

#### 4. Quarks

Enquanto que os leptões parecem ser partículas simples, os báriões e os mesões apresentam uma estrutura complexa. Estes últimos são em conjunto denominados hadrões, no sentido de que são as

partículas que interactuam fortemente. Os 6 números quânticos  $B S T T_3 Y Q$  associados aos hadrões propõem-nos uma questão essencial: são essas partículas independentes umas das outras ou apresentam uma estrutura básica comum? Assim como os números  $A$  (número de massa),  $Z$  (número atómico) e  $T$  (spin isotópico) do núcleo, que provêm aditivamente dos números quânticos  $N$  (número nucleónico),  $Q$  e  $T$  de cada um dos nucleões, nos sugeririam que o núcleo é formado por nucleões, mesmo que nunca os tivéssemos observado, também os números quânticos dos hadrões sugerem a existência de blocos na constituição de cada um dos hadrões, e esses blocos, ou partículas, ou elementos de simetria, são os quarks.

TABELA — Números quânticos dos quarks

Os números quânticos dos antiquarks obtêm-se invertendo todos os sinais da tabela.  $p$  e  $n$  não significam protão e neutrão, pelo que daqui em diante escreveremos o símbolo dos nucleões com letras maiúsculas.

	$T$	$T_3$	$S$	$B$	$Y$	$Q$
$p$	$1/2$	$1/2$	$0$	$1/3$	$1/3$	$2/3$
$n$	$1/2$	$-1/2$	$0$	$1/3$	$1/3$	$-1/3$
$\lambda$	$0$	$0$	$-1$	$1/3$	$-2/3$	$-1/3$

Quark é então um triplete unitário  $q$  de elementos  $p, n, \lambda$ .

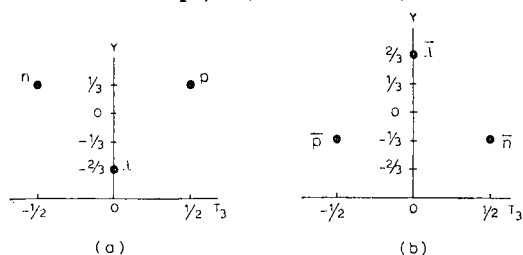


Fig. 2 — (a) Quark  $q$ . (b) Antiquark  $\bar{q}$ .

A teoria matemática de grupos chamada  $SU(3)$  — «special unitary group of arrays of size  $3 \times 3$ » — é a ferramenta

matemática usada no processo de Gell-Mann (chamado «the eightfold way») para, a partir dos tripletes unitários  $q$  e  $\bar{q}$ , obter os hádrões. O processo chama-se «the eightfold way» ou «modo de multiplicidade 8» porque são usados 8 números quânticos: as três componentes do spin isotópico, a hipercarga e as duas componentes de dois novos spins  $U$  e  $V$  relacionados com os números quânticos atrás definidos. Pela teoria  $SU(3)$ , os hádrões ficam distribuídos em grupos de 1, 8, 10 e 27 componentes. Esses grupos são supermultipletes de um determinado spin e paridade em relação aos 8 números quânticos referidos.

Os mesões obtêm-se por composições  $q\bar{q}$ , os bariões por  $qqq$ , e os antibariões por  $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ , sendo os respectivos números quânticos obtidos aditivamente dos números quânticos dos quarks constituintes. Assim, por exemplo, um neutrão  $N$  é formado por  $nn\bar{p}$ ,  $\Omega^-$  por  $\lambda\lambda\lambda$ ,  $K^-$  por  $\bar{p}\lambda$ .

Vejam os quais são os spins e paridades que os hádrões podem ter nos seus estados de menor energia, isto é, quando o seu momento angular é zero. Se supusermos que os quarks têm spin intrínseco  $1/2$ , os mesões, que são formados por elementos  $q\bar{q}$ , podem ter spin 0 ou 1. Para que a paridade dos mesões seja negativa (como corresponde à realidade) supõe-se que os antiquarks têm paridade oposta à dos quarks. Assim, obtemos para os mesões estados  $0^-$  e  $1^-$ . Os bariões, formados por elementos  $qqq$ , terão spin  $1/2$  ou  $3/2$ , e paridade positiva. Obtemos assim para os bariões estados  $1/2^+$  e  $3/2^+$ . Quer dizer, os spins dos hádrões resultam duma soma vectorial dos spins dos quarks.

Bariões  $1/2^+$  formam um octuplete, e bariões  $3/2^+$  um decuplete. Tanto os mesões  $0^-$  como  $1^-$  formam um singlete e um octuplete.

A descoberta da partícula  $\Omega^-$ , pre-

vista pelo «modo de multiplicidade 8», foi a grande vitória desta teoria, dando razões à continuação do estudo de partículas elementares seguindo esta via.

Este método não só prevê as dimensões dos supermultipletes, como explica a di-

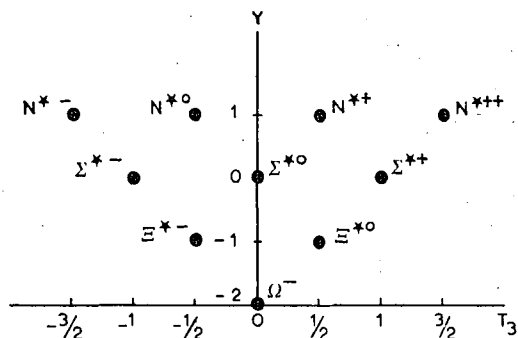


Fig. 3 — Representação de bariões  $3/2^+$ .

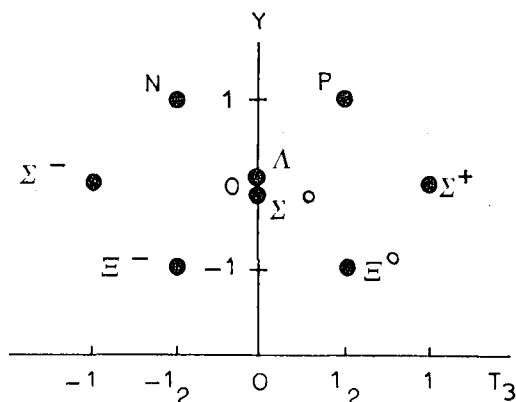


Fig. 4 — Representação de bariões  $1/2^+$ .

ferença de massas entre os respectivos elementos. Generalizações do  $SU(3)$  têm sido feitas, existindo por exemplo o  $SU(6)$  que considera quarks com spins em direcções opostas, portanto quarks com 6 elementos,  $n$ ,  $\bar{p}$ ,  $\lambda$  com uma direcção de spin e  $n$ ,  $\bar{p}$ ,  $\lambda$  com spin oposto.

## 5. Conclusão

Até agora falámos de quarks como se eles na verdade existissem, o que está longe de estar provado. Embora os físicos

experimentais procurem quarks nos produtos de colisões a grandes energias, até 1969 ninguém tinha comprovado a existência de um quark.

Tendo os quarks propriedades muito pouco usuais, tais como uma fracção da carga do electrão e número bariónico fraccionário, a sua identificação não pareceria difícil pela primeira propriedade. Ora se um protão é formado por três quarks, a massa do quark seria à volta de  $1/3$  da massa do protão, no caso de os quarks não estarem fortemente ligados. Mas nessas circunstâncias, produzir-se-iam quarks em grande quantidade nas colisões de partículas de grandes energias, o que não acontece. O que pode portanto suceder é os quarks terem massa muito superior à do protão e estarem assim sujeitos a grandes energias de ligação. Neste caso a impossibilidade de observação de quarks seria devida a uma dificuldade técnica — a obtenção de energias maiores do que as actualmente disponíveis.

Em Setembro de 1969, dois físicos australianos declararam ter observado quatro traços em câmaras de bolhas, que apenas se podem atribuir a partículas de carga  $2e/3$ , provenientes de «chuveiros» produzidos por radiação cósmica. Todavia este trabalho não foi considerado pelos especialistas suficientemente claro.

A questão está portanto ainda em aberto. Mesmo que os quarks não apresentem existência independente, têm certamente valor pedagógico, pois constituem uma forma elegante e prática do estabelecimento duma «hierarquia» entre os hadrões. De qualquer forma, a possibilidade de encontrar quarks não está posta de lado; talvez venham a ser observados em Serpukhov (cujo acelerador há pouco tempo começou a funcionar) ou daqui a uns anos na CERN.

#### BIBLIOGRAFIA

- M. GELL-MANN, Y. NE'EMAN, *The Eightfold Way*, New York: W. A. Benjamin, Inc., 1964.
- H. ENGE, *Introduction to Nuclear Physics*, Addison-Wesley publishing company, 1966.
- L. BROWN, *Quarkways to Particle Symmetry*, Physics Today, Vol. 19, No. 2, p. 44, February 1966.
- R. GOUIRAN, *Particles and Accelerators*, Weidenfeld and Nicolson Limited, 1967.
- V. BARGER, D. CLINE, *High Energy Scattering*, Scientific American, Vol. 217, No. 6, p. 77, December 1967.
- L. VAN HOVE, *Quarks as Additive Constituents of Mesons and Baryons*, Comments on Nuclear and Particle Physics, Vol. 1, No. 1, p. 8, 1967.
- C. B. A. MC CUSTER, I. CAIRS, *Evidence of Quarks in Air-shower Cores*, Physical Review Letters, Vol. 23, No. 12, p. 658, September 1969.

## Noticiário

### Encontro de estudo sobre trabalho científico

Com o patrocínio da Secção Regional de Lisboa da Ordem dos Engenheiros, um grupo de profissionais de Ciência promoveu, nos dias 1 e 3 de Junho passado, um encontro de estudo subordinado aos temas:

- 1.º — Concepção e organização do trabalho científico (moderador: Dr. David-Ferreira).
- 2.º — O trabalho científico como profissão (moderador: Prof. Torre de Assunção).

Nos debates foram focados o interesse da ciência como factor de desenvolvi-