

AS MAIS RECENTES PARTÍCULAS: GLUONS, CHARMONIA, BOTTOMONIUM, TOPONIUM E TAU

J.H. FILARDO BASSALO

Departamento de Física da UFPa

Conforme vimos até agora, a classificação das partículas elementares é feita segundo um conjunto de números quânticos que decorre das leis da Mecânica Quântica aplicadas às interações que essas partículas sofrem na natureza. Entretanto, a lei de conservação de cada um desses números quânticos tomados isoladamente, não se aplica a todas quatro interações até o momento conhecidas na natureza, como por exemplo, a célebre observação da não-conservação da paridade nas interações fracas, feita por Lee e Yang, em 1956.

Um dos mais importantes números quânticos é o spin, cuja lei de conservação deverá ser verificada para todos os fenômenos físicos da natureza. Devido a isso, as partículas elementares da natureza são classificadas em duas categorias: *Bósons*, que possuem spin inteiro ($0, 1\hbar, 2\hbar, \dots; \hbar = h/2\pi$), e os *Férmions*⁽¹⁾, que possuem os spins semi-inteiros ($1/2\hbar, 3/2\hbar, \dots$) e que obedecem ao princípio da exclusão de Pauli.

Sendo o spin dos quarks/antiquarks igual a $1/2$, eles enquadram-se segundo o esquema referido acima, como partículas fermiônicas, sujeitas, portanto, à estatística de Fermi-Dirac. No entanto, sendo os bárions constituídos por três quarks, eles teriam, então, os mesmos números quânticos, violando, assim, o princípio de exclusão de Pauli. Muito embora para alguns bárions (o octeto $1/2^+$ e algumas ressonâncias do decuplete $3/2^+$) não haja dificuldades com o princípio de exclusão de Pauli, pois, apesar de serem constituídos por três quarks, apenas dois deles são de mesma espécie, bastando, portanto, supor que tenham spins em sentidos opostos. No entanto, o mesmo não acontece com algumas ressonâncias bariônicas (aquelas que têm um bárion como produto final em seu decaimento), de vez que são constituídas de três quarks da mesma espécie. Por exemplo, a ressonância Δ^{++} deveria ser formada por (uutuu), em frontal contradição com o princípio da exclusão de Pauli.

Inicialmente, tentou-se contornar essa dificuldade através de modelos envolvendo para-estatísticas em que os três

quarks poderiam ocupar o mesmo estado. Mais tarde mostrou-se que isso seria equivalente à introdução de um novo atributo ao quark, isto é, a *cor* ⁽²⁾, como veremos a seguir. Como os bárions e os mésons não apresentavam nenhuma propriedade incomum, a "soma" desse novo número quântico deveria ser nula. Devido à estrutura tríada dos bárions, alguma espécie de simetria triangular era necessária àquela propriedade. Assim, em analogia com a teoria das cores de Young-Helmholtz ⁽³⁾, cada quark seria caracterizado por uma das três cores primárias do espectro luminoso: *vermelho*, *azul* e *verde*. Os antiquarks seriam anticoloridos, e suas cores, seriam, respectivamente, *cyan*, *amarelo* e *magenta*, cores complementares das primeiras acima referidas. Como os bárions apresentavam-se sempre "descoloridos", a regra de quantização desse novo número quântico aditivo - cor (certo tipo de carga mais complexa do que a carga elétrica), seria obtida de modo que os bárions, compostos de quarks coloridos, ficassem brancos. Dessa maneira, os bárions deveriam ser compostos de três quarks coloridos combinados de tal forma que eles se apresentem sempre "descoloridos", para que formem singletos de cor. Por exemplo, o próton, que é formado de três quarks ((*u*)*u*), teria esses quarks coloridos distribuídos de três maneiras, sendo uma delas, a seguinte ((*u*(vermelho)*d*(azul))*u*(verde)). O leitor poderá, facilmente, por sua vez, construir as outras duas. Os mésons, constituídos por dois quarks, e que, também, se apresentam sempre "descoloridos", são formados, desse modo, por um quark colorido e um quark anticolorido. Assim, por exemplo, o K^+ = (*u* \bar{s}), poderá distribuir seus respectivos quarks coloridos e anticoloridos de três maneiras, entre as quais, podemos ter: (*u*(azul) \bar{s} (amarelo)).

A hipótese do quark colorido, inicialmente desenvolvida com o objetivo de resolver o problema da estatística dos quarks, foi mais tarde ampliada, passando a constituir-se a chamada *Cromodinâmica Quântica* - QCD ("Quantum Chromodynamics"), a partir dos trabalhos pioneiros, realizados em 1973, por H.D. POLITZER (R01), e por D.GROSS e F.WILCZEK (R02). Em analogia com a *Eletrodinâmica Quântica* - QED ("Quantum Electrodynamics"), segundo a qual a interação eletromagnética entre cargas elétricas decorre da troca entre as mesmas de fótons, a interação forte entre os quarks seria consequência da troca entre eles de partículas intermediárias denominadas *Gluons* ("glue"-cola, em inglês), partículas essas que seriam, também, responsáveis

pela cor do quark. Portanto, na teoria QCD, o número quântico cor representa o mesmo papel do da carga elétrica na teoria QED. E, assim, um quark ao emitir ou absorver um gluon, mudaria de cor e não de espécie. Como o spin do quark vale $1/2$, igual ao do elétron e ao do próton, os gluons não teriam massa de repouso e seu spin seria igual a 1, como os fótons, porém seriam carregados de cor⁽⁴⁾.

Dentro dessa teoria cromodinâmica, para que os quarks se mantenham sempre juntos sem violar o princípio da exclusão de Pauli, eles deverão constantemente trocar gluons entre si, a fim de mudarem de cor. Por exemplo, um méson formado por um quark vermelho e por um antiquark cyan (quark antivermelho), estará constantemente em estado de singleto de cor devido à troca permanente de gluons entre eles. Assim, o quark vermelho para se transformar em azul, emite um gluon vermelho-amarelo, já que o amarelo é a anticor do azul. O antiquark cyan, ao receber o gluon emitido pelo quark vermelho, transforma-se em amarelo. Em seguida, o quark amarelo emite um gluon verde-amarelo e transforma-se em quark magenta, pois esta é a antiverde. O quark azul ao receber o gluon emitido pelo quark amarelo, transforma-se em verde. Para voltar ao méson inicialmente considerado - quark vermelho e quark cyan -, o quark verde, da terceira etapa considerada acima, emite um gluon verde-cyan, transformando-se em vermelho. O quark magenta ao receber esse gluon transforma-se em cyan. E, assim, continuamente. (O leitor interessado em saber como o singleto de cor de um bárion, composto de três quarks de mesmo sabor, é sempre formado, ver o excelente artigo de FRANÇOIS MARTIN (*La Recherche*, 123, Juin 1981), sobre a *Cromodinâmica Quântica*.)

A procura dessas novas partículas - quarks e gluons - bem como a tentativa de construir-se uma teoria que unificasse as interações sofridas pelas partículas elementares na natureza, levou os físicos a novas grandes descobertas, tais como, a possibilidade da existência de outros quarks além dos previstos pela teoria de Gell-Mann e Zweig, em 1964, ou seja, os quarks *u*, *d* e *s*, assim como a de léptons pesados (aberração semântica, já que léptons significa leve). Essas descobertas foram realizadas em dois tipos fundamentais de experiências: colisão entre feixes de partículas e respectivas antipartículas altamente energéticas, que circulam em sentidos opostos em aparelhos denominados *anéis de colisão* (vide a parte 7 dessas Crô

nicas), e interações de léptons com nucleons em câmara de bolhas.

Embora a descoberta do quarto lépton (neutrino associado ao muon) feita em 1962 e confirmada em 1964, tenha frustrado a idéia de uma simetria universal, a kievliana, conforme vimos anteriormente, o modelo dos quarks elaborado em 1964, fez renascer aquela idéia, desta vez com uma simetria entre os então quatro léptons conhecidos (elétron, muon, neutrino associado ao elétron, neutrino associado ao muon) e quatro possíveis quarks, os três propostos por Gell-Mann e Zweig e um quarto, que se diferenciaria dos três primeiros por apresentar um novo número quântico: o *Charme C*.

Inicialmente a idéia desse novo número quântico surgiu como uma extensão natural dos números quânticos até então conhecidos e que se conservam em uma interação forte hadrônica. Assim, em 1964, D. AMATI e colaboradores (R03), B. J. BJORKEN e SHELDON LEE GLASHOW (Físico norte-americano, 1932- ; PNF, 1979) (os cunhadores do termo charme) (R04), Z. MAKI e Y. OHNUKI (R05) e Y. HARA (R06), usaram as simetrias do grupo SU(4) para estudarem as leis de conservação dos quatro números quânticos que se conservam em uma interação forte, tais como: B, Q, Y e C, relacionados pela fórmula⁽⁵⁾

$$Q = I_z + (Y + C)/2$$

bem como novas fórmulas de massa relacionando mésons ou hádrons de um mesmo multiplete unitário. Nesse modelo foram previstos três mésons charmosos, denotados na época por S_p , D_p , D_p^0 , e um méson pseudoescalar χ sem charme. O sucesso desse modelo foi o acordo encontrado entre a massa desse méson χ (950 Mev/c²) e a da ressonância η_1 (958 Mev/c²) descoberta nesse mesmo ano de 1964, por G. KALBFLEISCH e colaboradores e por M. GOLDBERG e colaboradores, respectivamente, conforme vimos na parte 5 dessas nossas Crônicas.

Posteriormente, em 1970 (R07), a *teoria do charme* foi desenvolvida por S. L. GLASHOW, J. ILIOPoulos e L. MAIANI para a descrição das propriedades de simetria das correntes - a *álgebra das correntes* - nas interações fracas de léptons com a matéria nuclear⁽⁶⁾, objetivando com a mesma, explicar por que razão a reação $K^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ (interação fraca com corrente leptônica neutra), que é permitida pela teoria da estranheza (lembrar que para interações fracas a variação da estranheza vale

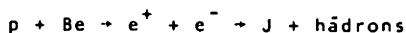
± 1 e, no caso dessa reação essa variação vale -1), quase não se observa na natureza, uma vez que a probabilidade de ocorrência para a mesma é menor do que 10^{-8} . A teoria do charme começou a ganhar consistência ao ser empregada na explicação de fatos experimentais novos, ocorridos a partir de 1973, já que não foi possível explicá-los com o modelo dos três quarks de Gell-Mann e Zweig, elaborado, como vimos anteriormente, em 1964.

Em 1973 (R08), pesquisadores do CERN sob a direção de PAUL MUSSET encontraram evidências de correntes leptônicas neutras em experiências com a câmara de bolhas "Gargamelle", decorrentes de interações de neutrinos com a matéria nuclear. Antes, só conheciam-se interações eletromagnéticas e com corrente leptônica carregada, interações essas que envolviam neutrinos e matéria nuclear. No ano seguinte, em 1974 (R09;10), experiências análogas realizadas com a câmara de bolhas de Hidrogênio do FERMI LAB em Batavia-USA, confirmaram as observações feitas no CERN.

Em novembro de 1974, pesquisadores do anel de colisão - SPEAR da Universidade de Stanford, liderados por BURTON RICHTER (Físico norte-americano, 1931- ; Prêmio Nobel de Física, 1976) (R11) e, independentemente, pesquisadores do acelerador de prótons - AGS de Brookhaven, liderados por SAMUEL CHAO CHAN TING (Físico sino-norte-americano, 1936- ; Prêmio Nobel de Física, 1976) (R12), descobriram uma ressonância de massa muito elevada ($3105 \text{ Mev}/c^2$), de spin paridade $J^P = 1^-$ e de largura muito estreita ($\sim 0.07 \text{ Mev}$). Esta nova partícula foi chamada de ψ por RICHTER que a obteve através da reação:



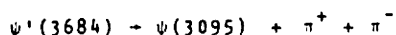
Por seu lado, TING denominou-a de J e a obteve por intermédio da reação⁽⁷⁾:



A existência dessa nova ressonância⁽⁸⁾ foi confirmada na mesma época⁽⁹⁾ por C. BACCI e colaboradores (R13), trabalhando no anel de colisão-FRASCATTI, na Itália. Ainda no mesmo ano de 1974, uma segunda ressonância ψ' ($3695 \text{ Mev}/c^2$; $J^P = 1^-$) foi observada por G.S. ABRAMS e colaboradores (R14), também pesquisadores do SPEAR.

Desde Novembro de 1974 várias ressonâncias ψ/J foram

observadas experimentalmente⁽¹⁰⁾, as quais apresentaram uma espectroscopia análoga à atômica e à nuclear, com as ressonâncias ψ/J de maior massa decaindo em uma de massa menor, com emissão de hádrons, como por exemplo:

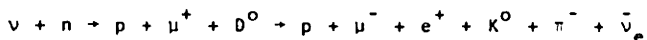


observada em 1975 (R15), por G.S.ABRAMS e colaboradores.

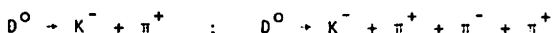
O processo de produção dessas novas ressonâncias por meio de feixes de partículas de natureza variada (fótons, píons, nucleons, léptons) e a medida dos parâmetros característicos de tal processo, indicavam ser as mesmas produzidas por interação forte, isto é, eram hadrônicas. Porém, sua elevada massa e sua vida média relativamente longa, da ordem de 10^{-20} s, não permitiam enquadrá-las no modelo dos quarks de Gell-Mann e de Zweig. Em vista disto, em 1975, T.APPELQUIST e H.D.POLITZER (R16), E.EICHTEN e colaboradores (R17) e S.OKUBO e colaboradores (R18), independentemente, propuseram um modelo baseado na teoria do charme segundo o qual, essas novas ressonâncias seriam estados ligados⁽¹¹⁾ de um novo quark, chamado *charmoso*, denotado c e com as seguintes características: $J = 1/2$, $Q = +2/3$, $B = +1/3$, $S = 0$ e $C = +1$, e de seu antiquark charmoso \bar{c} ($J = 1/2$, $Q = -2/3$, $B = -1/3$, $S = 0$ e $C = -1$). Esse estado ligado - $c\bar{c}$ - denominado por Appelquist e Politzer de *charmonium*, (em analogia ao estado ligação e^+e^- , chamado *positronium*) apresentava o número quântico total de charme nulo. Como algumas ressonâncias ψ/J ou *charmonia* se desintegravam segundo uma interação tipicamente forte ($\sim 10^{-23}$ s), a teoria do charme de CLASHOW, ILIOPOULOS e MAIANI (GIM) previa a existência de partículas charmosas, de massa entre 2 e 3 Gev/c^2 e vida-média entre 10^{-12} e 10^{-14} s, ou seja, partículas cujo número quântico total de charme é diferente de zero. Por exemplo, *mêsons charmosos* - $D^0(c\bar{u})$, $D^+(c\bar{d})$, $F^+(c\bar{s})$ e suas respectivas antipartículas, e *bárions charmosos* com spin $1/2$ e $3/2$, constituídos por três quarks combinados entre os quatro tipos de sabores: u, d, s, c . (A constituição quarkônica dos hádrons charmosos é obtida construindo-se os supermultipletos em $SU(4)$, como se pode ver, dentre muitos textos, o de HÉLIO FREITAS DE CARVALHO (*Espectroscopia dos mêsons pesados e novos quarks*, Tese de Doutorado, DFPUC-RJ, 1977)).

Evidências experimentais sobre a existência de hádrons charmosos têm sido observadas em interações de neutrinos e interações de fótons, analisadas em câmaras de bolhas, e intera-

ções entre partícula e antipartícula, observadas, por sua vez, em anéis de colisão. A partir de 1975, essas evidências experimentais começaram a acumular-se. A primeira delas foi anunciada por H. DE DEN e colaboradores (R19), ao interpretarem a interação de um feixe de neutrinos com nêutrons da câmara de bolhas "Gargamelle" do CERN, como a produtora do méson charmoso D^0 , segundo a reação:



Nesse mesmo ano de 1975, CAZZOLI e colaboradores (R20), anunciavam a evidência de um bárion charmoso, também com uma experiência com um feixe de neutrinos. Mésons charmosos, formados por interação de neutrinos em câmaras de bolhas, foram confirmados em 1976, por J. BLIESTSHAU e colaboradores (R21), no CERN, e por J. VON KROGH e colaboradores (R22), no FERMI LAB. Ainda em 1976, G. GOLDBERGER e colaboradores (R23), pesquisadores do anel de colisão SPEAR do SLAC, anunciavam a existência de um méson charmoso, ao observarem a desintegração de uma ressonância muito estreita de massa $1865 \text{ Mev}/c^2$, sem carga, e com os seguintes modos de decaimento:



Experiências realizadas, também, em anéis de colisão, levaram I. PERUZZI e colaboradores, ainda em 1976 (R24), a identificar um méson charmoso carregado positivamente: $D^+(1875)$. Por outro lado, bárions charmosos, formados em interações de fótons, foram também anunciados, em 1976, nas experiências de B. KNAPP e colaboradores (R25), e identificados como sendo as seguintes partículas: $\Lambda_c(2260)$ e $\Sigma_c(2480)$. A partir daí, novas experiências têm confirmado a existência de hádrons charmosos⁽¹²⁾.

Apesar do grande sucesso conseguido pela teoria do charme na explicação de experiências que envolvem a produção da charmonia e de hádrons charmosos, ela tem apresentado algumas dificuldades ao se tentar explicar os fenômenos envolvendo correntes leptônicas neutras, observadas, como vimos, desde 1973. As experiências sobre correntes leptônicas neutras, isto é, aquelas nas quais partículas interagem sem trocar carga elétrica, têm sido explicadas através da chamada teoria unificada dos campos de interação eletromagnética e fraca - a interação eletrofraca - teoria essa que decorre da analogia entre os pares de

léptons (elétron/pósitron e seu neutrino associado) e (muon/antimuon e seu neutrino associado) e os pares de quarks (u,d) e (s,c). Os primeiros trabalhos realizados sobre uma possível teoria unificada entre as interações eletromagnéticas e fracas, foram realizados em 1967(R26), por STEVEN WEINBERG (Físico norte-americano, 1943- ; PNF,1979), da Universidade de Harvard, e em 1968 (R27), por ABDUS SALAM, do Imperial College⁽¹³⁾. Nessas experiências, por exemplo, na interação de neutrinos com muons, há produção de uma partícula charmosa seguida de uma desintegração na qual é reproduzido o neutrino incidente (condição de corrente leptônica neutra) e a produção de um segundo muon, numa reação do tipo:

$$\nu + \mu \rightarrow C + \dots + \nu + \mu + \dots$$

Um novo fenômeno observado em outubro de 1975, por MARTIN PERL e colaboradores (R28) pesquisadores do anel de colisão SPEAR do SLAC ("Stanford Linear Accelerator Center"), qual seja, a produção de pares de elétrons-muons decorrentes da colisão pósitron-elétron, não foi possível ser explicado através da teoria do charme⁽¹⁴⁾, com a produção de uma partícula charmosa intermediária. Naquela época, o fenômeno foi interpretado como tendo a colisão pósitron-elétron produzido um par de léptons pesados, cada um dos quais decaindo, então, em um lépton carregado e dois neutrinos. Esse lépton pesado, recebeu por parte do grupo liderado por Martin Perl, o nome de partícula U, da palavra "unknown" (desconhecido, em inglês) e sua massa determinada em torno de $2 \text{ Gev}/c^2$, através da reação:

$$e^+ + e^- \rightarrow U^+ + U^- ; U \rightarrow \mu + \bar{\nu}_\mu + \nu_U \text{ ou}$$

$$U \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_U$$

Em 1976, M.Perl e colaboradores (R29) obtiveram um outro evento relacionado com a partícula U. No começo de 1977, o grupo de pesquisadores denominado PLUTO, liderado por HINRICH MEYER (R30;31) anunciava mais um evento relativo à partícula U. Em agosto de 1977, quatro grupos de pesquisadores (PLUTO; DASP do laboratório DESY, em Hambourg; DELCO do SPEAR-East e SPEAR-West) anunciaram no "International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies" (Simpósio Internacional sobre Interações de Léptons e Fótons de Alta Energia), realizado em Hambourg-Alemanha, a existência de um lépton carregado pesado

com massa entre 1.8 e 2.0 Gev/c^2 e que recebeu, naquele simpósio, o nome de partícula τ (15). A possibilidade da existência de mais de dois léptons levou os físicos teóricos a preverem, utilizando a teoria unificada entre interações eletromagnéticas e fracas, a existência de mais dois quarks (16). Assim é que, desde agosto de 1975 (R32), H. HARARI anunciava na "International Conference on Photon and Leptons" (Conferência Internacional sobre Fótons e Léptons) a possível existência de mais dois quarks - (t, b) - caracterizado, respectivamente, pelos números quânticos *verdade* ("truth", em Inglês) e *beleza* ("beauty", em Inglês), e que seriam mais pesados do que os quatro quarks (u, d, s, c) anteriormente previstos.

A primeira evidência da existência de um quinto quark foi apresentada em agosto de 1977 (R33), por pesquisadores da Universidade de Columbia, do FERMILAB, e da Universidade Estadual de New York, liderados por LEON G. LEDERMAN, ao detectarem uma nova ressonância de massa $9.5 \text{ Gev}/c^2$, a qual chamaram de partícula $\text{Upsilon} - T^-$, e que seria, segundo Lederman, uma partícula constituída por um *quark bottom* (17) e por um *antiquark bottom*, ou seja, a partícula $\bar{b}b$. Para Lederman, a partícula Y pareceria ser um méson vetorial, isto é, com spin-paridade igual a 1^- , por causa de seu modo de decaimento em dois muons (18).

NOTAS - 6

- (1) Os Bósons receberam esse nome porque obedecem a estatística de Bose-Einstein. Essa estatística foi desenvolvida pela primeira vez, em 1924, por S.N. BOSE (R34) ao fazer o tratamento formal de um gás de fótons, e A. EINSTEIN (R35), ainda nesse mesmo ano de 1924, estendeu esse formalismo aos materiais gasosos. Os Férmions receberam essa denominação por obedecerem à estatística de Fermi-Dirac. Essa estatística foi desenvolvida pela primeira vez, em 1926, por E. FERMI (R36) ao estudar a distribuição de elétrons em um metal, segundo o princípio da exclusão de Pauli e, independentemente, por P.A.M. DIRAC (R37), ainda nesse mesmo ano de 1926, ao utilizar as funções de onda antissimétricas, para descrever relativisticamente os elétrons no interior de um átomo.

- (2) - O número quântico *color* foi inventado por O. W. GREENBERG, 1964 (R38) e, independentemente, em 1965 (R39), por M.Y. HAN e Y. NAMBU.
- (3) - Em 1801, THOMAS YOUNG (Físico e médico inglês, 1773-1829) e, mais tarde, em 1851, HERMANN LUDWIG FERDINAND VON HELMHOLTZ (Físico e fisiologista alemão, 1821-1894) - o inventor do oftalmoscópio -, formularam uma teoria em que todo o espectro luminoso, inclusive suas nuances, poderia ser obtido da combinação de apenas três cores primárias: vermelho, azul e verde.
- (4) - Enquanto os fótons, isto é, os "quanta vetoriais", da teoria QED, são neutros e únicos, os gluons, ou seja, os "quanta vetoriais" da teoria QCD, são de oito tipos, formados de pares de cor e anticor. Essa diferença decorre das teorias quânticas de campo aplicadas para estudar o fóton e o gluon. A QED é uma teoria de calibre abeliana, enquanto que a QCD é uma teoria de calibre não-abeliana. Essas teorias decorrem de uma generalização feita à teoria de Yang-Mills, formulada em 1954 (para um estudo introdutório dessas teorias, ver J.J. GIAMBIAGI) (R40). Além disso, o potencial de interação entre gluons, para pequenas distâncias, é mais suave do que o potencial de interação entre fótons. Esse comportamento, denominado de *liberdade assintótica* ("asymptotic freedom"), é a base da teoria do confinamento dos quarks, como veremos mais adiante. Já existem algumas evidências da existência de gluons. Assim, em 24 de agosto de 1979, no "International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energies" (Simpósio Internacional sobre Interação de Léptons e Fótons em Altas Energias), quatro grupo de físicos (JADE, MARK J. PLUTO e TASSO) trabalhando no anel de colisão PETRA no DESY, em Hamburg, na Alemanha Ocidental, anunciaram evidências experimentais para a teoria dos gluons (*Science New*, 116, 266, 20 October 1979; *Physics Today*, 17, February 1980). Como o gluon tem uma espécie de carga, conforme vimos anteriormente, eles, eventualmente, poderiam formar um estado ligado, denominado pelos físicos de "gluonium". Pois bem, em 1981, a descoberta da ressonância E(1440), levou JEAN DONOGUE e colaboradores, e, independentemente, MICHAEL CHANOWITZ e colabo-

radadores, a admitirem a possibilidade de ser aquela ressonância, um provável "gluonium". No entanto, PAUL FISHBANE SYDNET MESHKOV e colaboradores, nesse mesmo ano, interpretaram tal evento como sendo um estado ligado de quarks (*La Recherche*, 1120, Octobre 1981). (Um estudo mais detalhado sobre os gluons será apresentado em nossa próxima "Crônica da Cromodinâmica Quântica"). Evidências experimentais químicas da presença de partículas elementares superpesadas, levaram os físicos, a formularem um modelo para uma nova força na Natureza, a *força technicolor*, que, em analogia com a teoria da cor, seria a responsável pela interação entre os *techniquarks*, formando, dessa maneira, as partículas elementares superpesadas, ou, os *technihadrons*, como se chamam essas partículas. Para detalhes sobre essas partículas, ver o trabalho de ROBERT N. CAHN e SHELDON LEE GLASHOW (*Science*, 213, 607, 7 August 1981).

- (5) - Uma fórmula análoga para um novo número quântico foi obtida, em 1966 (R41), por JAYME TIOMNO, com $\nu/3$ ao invés de C.
- (6) - As interações de léptons com a matéria nuclear, isto é, com a matéria hadrônica, podem ser de dois tipos: eletromagnéticas e fracas. Na primeira, os léptons carregados interagem com nucleons através da troca de um fóton virtual (daí a interação chamar-se eletromagnética), reproduzindo o lépton incidente e uma série de hádrons, como por exemplo:

$$e^- + p \rightarrow e^- + p + \pi^+ + \pi^- ; e^+ + p \rightarrow e^+ + p + \rho^0$$

$$\mu^- + p \rightarrow \mu^- + p + \pi^+ + \pi^0 + \pi^- ; \mu^+ + p \rightarrow \mu^+ + \Lambda + K^0$$

Na segunda, os léptons neutros interagem com nucleons através da troca de um boson virtual (W^+, W^-, Z^0), podendo ter um lépton carregado e uma série de hádrons como partículas finais, ou reproduzir o lépton incidente com uma série de hádrons. Essas interações são chamadas, respectivamente, de *Interação Fraca com Corrente Leptônica Carregada*, como por exemplo: $\nu + p \rightarrow p + \mu^- + \pi^+$; e *Interação Fraca com Corrente Leptônica Neutra*, como por exemplo: $\nu + p \rightarrow \nu + n + \pi^+$.

- (7) - Provavelmente, o nome que RICHTER (cujo irmão CHARLES é geólogo e autor da célebre "escala de Richter", a qual caracteriza a intensidade de terremotos) deu à partícula descoberta juntamente com seus colaboradores, seja devido à forma do gráfico em que são relacionadas as seções de choque da colisão e^+e^- , com produção de hádrons e de muons, respectivamente. O nome dado por TING de partícula J, vem do fato de que a partícula foi obtida em uma interação envolvendo corrente eletromagnética, que é denotada por J, em textos de Física Teórica. No entanto, segundo JAMES S. TREFIL (*From Atoms to Quarks*, Charles Scribner's Sons, 1980), talvez a escolha feita por TING tenha sido devido à semelhança entre a letra J e o caracter chinês para a palavra Ting. Hoje, tal partícula não tem uma noção única, já que ela é indistintamente denotada por ψ/J ou por J/ψ , dependendo do autor.
- (8) - A existência de uma nova ressonância com energia de repouso da ordem de 1.6 Gev foi sugerida desde 1963 (R42) com o nome de *bola de fogo* ("fire-ball"), por um grupo de pesquisadores brasileiros liderados por CÉSAR M. G. LATTES, em colaboração com um grupo de pesquisadores japoneses liderados por SHUN-ICHI HASEGAWA, em uma experiência com câmara de emulsões expostas à incidência de raios cósmicos, em Chacaltaya, nos Andes bolivianos.
- (9) - Os três trabalhos (Stanford, Brookhaven e Frascati) foram publicados no mesmo número 33 da Revista *Physical Review Letters*, de dezembro de 1974.
- (10) - Outras ressonâncias gipsions (psigions) foram observadas por J.E. AUGUSTIN e colaboradores, em 1975 (R43), e por L.A. RAPIDIS e colaboradores, em 1977 (R44), ambos os grupos formados por pesquisadores do SPEAR do SLAC. Ressonâncias com spin-paridade diferentes das anteriores, foram descobertas por pesquisadores do anel de colisão DORIS, em Hamburg, Alemanha, tais como: $\psi(2800,0^-)$ e $\psi(3500,0^+)$, que são estados intermediários provenientes da desintegração de $\psi'(3105,1^-)$ e $\psi''(3695,1^-)$, respectivamente.
- (11) - Diversos modelos para esses estados ligados têm sido tentados com o intuito de determinar sua estrutura, bem co-

mo a massa e a vida-média dos mesmos. Potenciais de confinamento dos quarks com troca de gluons, lineares e harmônicos, tanto com tratamento não-relativístico, quanto com tratamento relativístico, têm sido considerados. Segundo os trabalhos realizados em 1975, por H.J.W.MULLER-KIRSTEN (R45), T. GOLDMAN e S.YANKIELOWICZ (R46) e J. F. GUNION e L.F.LI (R47), um tratamento relativístico é necessário para descrever a dinâmica dos quarks confinados. No entanto, como no tratamento relativístico, processos de criação e de aniquilamento - *paradoxo de Klein* - tornam-se importantes à medida que o potencial aumenta com a distância, como no caso de potenciais lineares e harmônicos, MAURO SÉRGIO DORSA CATTANI (Físico brasileiro, 1942-) e NORMANDO CELSO FERNANDES (Físico brasileiro, 1936-), em setembro de 1977 (R48;49), desenvolveram um modelo de confinamento de quarks em que existem *ressonâncias* e não estados ligados para o sistema quark-antiquark, tendo o paradoxo de Klein como principal mecanismo de decaimento na espectroscopia da charmonia. É oportuno salientar que o paradoxo de Klein já havia sido objeto de preocupação para os físicos que estudavam o confinamento de quarks. Assim, BOGOLIUBOV, em 1967 (R50), propusera um modelo segundo o qual os quarks não interagem e se movem num potencial escalar efetivo $\bar{V}(r)$ que é capaz de confinar quarks e antiquarks separadamente, evitando, assim, o paradoxo de Klein. Esse modelo generalizou-se em 1971 (R51) por SMITH e TASSIE. O estudo de potenciais confinantes de quarks tem preocupado, também, outros físicos brasileiros, além de CATTANI e FERNANDES. Por exemplo, NICIM ZAGURY (PUCRJ) e PAULO LEAL FERREIRA (IFT-SP), juntos, têm realizados trabalhos, a partir de 1977 (R52; 53; 54), nos quais são utilizados modelos de potenciais confinantes, tipo oscilador harmônico e tipo potencial efetivo bogoliuboviano, com correções. A relação entre potenciais confinantes e sabores de quarks foi recentemente estudada por dois físicos brasileiros H.F. DE CARVALHO e A.B. D'OLIVEIRA, em trabalho apresentado no "2º Encontro Nacional de Partículas e Campos", realizado em 1980, em Cambuquira, Minas Gerais (R55). (Na "Crônica da Teoria de Campos" que apresentaremos futuramente, veremos que o problema da rela

ção entre potenciais efetivos e confinamento tem sido estudado por vários físicos brasileiros, com destaque maior para o saudoso e inesquecível JORGE ANDRÉ SWIECA.) Além dos modelos de potenciais efetivos de confinamento de quarks, existe um modelo relativístico de confinamento quarkônico desenvolvido a partir de 1974 (R56), por pesquisadores do MIT ("Massachusetts Institute of Technology"), sob a liderança de R.L. JAFFE. Fundamentalmente, neste modelo, os hádrons são confinados em uma certa região do espaço através de uma "pressão" exercida pelo espaço livre. Segundo esse modelo um hádron comporta-se como uma bolha de gás em um fluido perfeito, isotrópico e homogêneo. Como a dinâmica de uma bolha de gás é determinada pelo balanço entre a pressão termodinâmica do gás e a pressão externa exercida pelo fluido, a "pressão" que mantém o hádron confinado em regiões espaciais do espaço, chamado pelos autores de *bag* (bolsa ou sacola, em inglês), é calculada pela relação de Incerteza de Heisenberg ($\Delta x \cdot \Delta p_x \sim \hbar$). Por exemplo, para prótons em que a região de confinamento é da ordem de 1 fermi (1 fermi = 10^{-13} cm), essa "pressão quântica" é da ordem de 8×10^{28} atmosferas. É oportuno considerar, neste momento, que um grande passo para a teoria do confinamento dos quarks foi dado por STEPHEN L. ADLER, em um artigo publicado no *Physical Review D*, de 15 de junho de 1981. (Para alguns comentários sobre esse trabalho, ver M.M. WALDROP (*Science*, 213, 746, 14 August 1981). A teoria do confinamento dos quarks tem perturbado o intelecto de muitos cientistas, a tal ponto de relacioná-la com o "badalado" cubo mágico de ERNO RUBIK, como acaba de fazer o engenheiro e matemático SOLOMON W. GOLOMB. Em trabalho publicado no *American Journal of Physics*, 49, 1030, November 1981, esse cientista relaciona certas rotações do cubo mágico com "quarks" e "antiquarks" matemáticos, concluindo daí que, assim como são existem certas combinações de quarks na Natureza, o mesmo acontece com certas posições do cubo mágico de Rubik. Para um estudo mais detalhado sobre a teoria do confinamento dos quarks, ver o excelente artigo de JAFFE (*Nature*, 268, 201, 21 July 1977).

- (12) - Mésons charmosos, neutro ou carregado positivamente, foram detectados em 1980, através de diversos tipos de experiências (*La Recherche*, 111, Mai 1980) envolvendo mais de cem físicos. Também bárions charmosos têm sido detectados em experiências com feixe de neutrinos através de câmaras de bolhas (*La Recherche*, 104, Outubro 1979). Em janeiro de 1980, cinquenta e quatro físicos do SLAC, do Lawrence Berkeley Laboratory e do Departamento de Física da Universidade da Califórnia, observaram, no detector Mark II do anel de colisão SPEAR do SLAC, a produção de um bárion charmoso Λ_c , com uma massa de $2285 \text{ Mev}/c^2$ (*Physical Review Letters*, 44, 10). Uma evidência, não confirmada, de bárions charmosos do tipo F, foi anunciada no verão de 1979 (*Science News*, 117, 12 January 1980).
- (13) - Em 12 de junho de 1978, RICHARD TAYLOR anunciou em seminário no SLAC, que ele e colaboradores haviam submetido ao *Physics Letters* (R57), um trabalho no qual relatavam o resultado de uma experiência realizada por um grupode pesquisadores do próprio SLAC, da Universidade de Yale, e mais a participação de alguns pesquisadores europeus do CERN, Aachen e de Hamburg. Segundo TAYLOR, o resultado dessa experiência parece ter confirmado algumas previsões do modelo de WEINBERG-SALAM, qual seja, o da unificação entre as interações fraca e eletromagnética. Nessa experiência foi estudado o espalhamento de elétrons polarizados obtidos através de uma fonte de elétrons especialmente construída para essa experiência, elétrons esses com a energia entre 16 e 21 Gev (1 Gev = 10^9 eV). O alvo do espalhamento era constituído de prótons de Hidrogênio pesado líquido. Os pesquisadores observaram que havia violação da paridade, pois os elétrons eram diferentemente espalhados pelo alvo, com os de spin girando para a esquerda, ligeiramente mais espalhados do que os elétrons de spin girando para a direita, numa proporção de 2 para 10 000 de cada espécie. (Uma primeira observação sobre a violação da paridade por parte de elétrons, foi feita por CARL T. CHASE em 1929 (R58), ao observar polarização de elétrons). Ora, admitindo-se que houve uma interação eletromagnética entre o elétron e o próton, o resultado indicava que houve uma violação da conservação da paridade por parte de uma interação ele-

tromagnética, resultado esse que contraria a teoria eletrodinâmica quântica (QED). Assim, segundo os experimentadores, o mecanismo de interação da reação estudada é o da interação fraca com corrente neutra, porque nenhuma carga elétrica é trocada entre o elétron e o próton. Portanto, é o efeito de corrente neutra que provoca a violação da paridade, confirmando com isso, um dos principais resultados da teoria de Weinberg-Salam. A violação da paridade do elétron foi, também, observada nesse mesmo ano de 1978 (R59), por um grupo de pesquisadores russos em Novosibirsk, na Rússia. No início desse mesmo ano de 1978 (R60), outra experiência de corrente neutra havia sido realizada no CERN. Nessa experiência, um grupo de físicos com a colaboração de vários laboratórios europeus (BARI, CERN, Milão, Orsay e Palaiseau), foi estudado o espalhamento elástico de neutrinos altamente energéticos, por elétrons atômicos do hidrogênio pesado usado na câmara de bolhas "Gargamelle", apresentou um resultado incompatível com a teoria unificada entre as teorias das interações eletromagnética e fraca. Em meados de 1978 (R61), CHARLES BALTAY (Universidade de Columbia), ROBERT PALMER e NICHOLAS SAMIOS (Laboratório Nacional de Brookhaven) e seus colaboradores, realizaram uma experiência análoga a do CERN, porém seus resultados apresentaram um bom acordo com as previsões do modelo de Weinberg-Salam. É oportuno salientar que, quer o modelo de Weinberg-Salam sobre a unificação entre as interações fraca e eletromagnética, a então chamada de *interação eletrofraca*, quer o modelo do charme de Glashow, foram consagrados pela Academia Sueca de Ciências, ao ser atribuído, por aquela Academia, o Prêmio Nobel de Física de 1979, a esses três cientistas. Tentativas no sentido de unificar outras interações são constantemente feitas. Assim, em abril de 1978 (R62), P. CALDIROLA, M. PAVSIC e E. RECAMI, fizeram um trabalho no qual admitiram a possibilidade de que a interação forte, que confina os quarks dentro dos hádrons, pode ser descrita por uma equação de Einstein da Relatividade Geral, com "termo cosmológico", e, com isso, a possibilidade de uma unificação entre interação forte e interação gravitacional, torna-se possível. A unificação entre as interações

conhecidas na Natureza (forte, fraca e eletromagnética e gravitacional) vem sendo tentada através de algumas teorias: as do tipo "grande unificação", que procura unificar as forças forte, fraca e eletromagnética (as duas últimas já unificadas, conforme vimos acima), basicamente através do grupo $SU_c(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ conforme foi sugerido por J.C.PATI e Salam (1972), ou através do grupo $SU(5)$, segundo Glashow e Georgi (1974); e as do tipo *supergravidade* ou *supersimetria*, segundo a qual existe uma única força na Natureza, idéia sugerida por diversos físicos, desde 1971. Essas teorias são todas *teorias de campo de gauge* e de difícil teste, já que as unificações propostas por elas ocorrem em regiões de altíssimas energias, e são da ordem de $10^{15} - 10^{20}$ GeV. (Para alguns detalhes sobre essas teorias, ver: DANIEL Z. FREEDMAN and PETER VAN NIEUWENHUIZEN, *Scientific American*, february 1978; GERARD'T HOOFT, *Scientific American*, july 1980; e HOWARD GEOGI and SHELDON LEE GLASHOW, *Physics Today*, september 1980.)

- (14) - A possibilidade da partícula U ser um méson charmoso D foi descartada em 1976 por M. PERL e colaboradores, ao analisarem, cuidadosamente, os seguintes eventos: produção de mésons D ou a de léptons. Observaram, por exemplo, que se houvesse a produção de mésons D, em reações do tipo:

$$D \rightarrow e + \text{hádrons}$$

$$D \rightarrow \mu + \text{hádrons}$$

o momento do elétron/pósitron ou do muon, deveria ser menor do que 100 Mev/c. No entanto, no evento por eles analisado, os elétrons/pósitrons e muons têm momento muito maior do que 100 Mev/c.

- (15) - Sendo essa partícula, provavelmente o terceiro lépton carregado (os dois primeiros são o elétron e o muon), os descobridores da mesma decidiram denominá-la de partícula *tau* (τ), por ser tau a letra que inicia a palavra terceiro, em grego.

- (16) - A existência de outros quarks diferentes dos quatro então conhecidos (u,d,s,c), foi sugerida em 1974, por MICHAEL BARNETT, do SLAC, e logo depois aceita por FEZA GURSEY, da Universidade de Yale, por PIERRE SIKIVIE, da

Universidade de Maryland, e por PIERRE RAMOND, do CALTECH ("California Institute of Technology"), que chegaram a fixar em seis o número total deles.

- (17) - LEDERMAN denominou os quarks de números quânticos *verdade e beleza*, respectivamente, de *top* (topo, em inglês), com carga $+ 2/3$, semelhante aos sabores *u* e *c*, e de *bottom* (fundo, em inglês), com carga $- 1/3$, semelhante aos sabores *d* e *s*.
- (18) - Tanto a ressonância *T*, quanto outros membros de sua família (*T'*, *T''*, *T'''*) foram observados no DESY ("Deutsches Elektronen Synchrotron"), próximo de Hamburg, na Alemanha, no CERN, na Suíça, e no CESR ("Cornelle Electron Storage Ring"), em New York, Estados Unidos. (Para detalhes sobre essas experiências, ver: *Physics Today*, 17, January 1979; *Physics Today*, 19, October 1980; *Science*, 205, 777, 24 August 1979). Essas ressonâncias, também conhecidas como *mêsons B*, evidenciam a existência do 5º quark *bottom* (*b*). Apesar de ainda não haver nenhuma evidência experimental sobre ressonâncias envolvendo o 6º quark *top* (*t*), cálculos teóricos sobre sua massa foram, no entanto, realizados (K. HIKASA and K. IGI, *Z. Physik C*, 6, 47 (1980); A.J. BURAS, *Phys. Rev. Lett.*, 46, 1354 (1981)).

REFERÊNCIAS

- (R01) - Politzer, H.D., *Phys. Rev. Lett.*, 30, 1346 (1973)
- (R02) - Gross, D.J. and Wilczek, F., *Phys. Rev. Lett.*, 30, 1343 (1973)
- (R03) - Amati, D., Bacry, H., Nuyts, J. and Prentki, J., *Il Nuovo Cimento*, 34, 1732 (1964)
- (R04) - Bjorken, B.J. and Glashow, S.L., *Phys. Lett.*, 11, 255 (1964)
- (R05) - Maki, Z. and Ohnuki, Y., *Prog. Theor. Phys.*, 32, 144 (1964)
- (R06) - Hara, Y., *Phys. Rev.* 134B, 701 (1964)
- (R07) - Glashow, S.L., Iliopoulos, J. and Maiani, L., *Phys. Rev.*, D2, 7, 1285 (1970)
- (R08) - Hasert, F.J., Kabe, S., Krenz, W., von Krogh, J., Lanske, D., Morfin, J., Schultze, K., Weerts, H., Bertrand- Core-

- mans, G. H., Sacton, J., van Doninck, W., Vilain, P., Camerini, U., Cundy, D.C., Baldi, R., Danilchenko, I., Fry, W.F., Haldt, D., Natall, S., Musset, P., Osculati, B., Palmer, R., Pattinson, J.B.M., Perkins, D.H., Pullia, A., Rousset, A., Venus, W., Wachsmuth, H., Brisson, V., Degrange, B., Haguenaue, M., Kluberg, L., Nguyen-Khac, U., Petiau, P., Belotti, E., Bonetti, S., Cavalli, D., Conta, C., Fiorini, E., Rollier, M., Aubert, B., Blum, D., Lhounet, L.M., Heusse, P., Lagarrigue, A., Lutz, A.M., Orkin-Lecourtols, A., Vialle, J.P., Bullock, F.W., Esten, M.J., Jones, T.W., McKensie, J., Michette, A.G., Myatt, G. and Scott, W.G., *Phys. Lett.*, 46B, 138 (1973)
- (R09) - Benvenuti, A., Cheng, D.C., Cline, D., Ford, W.T., Imlay, R., Ling, T.Y., Mann, A.K., Messing, F., Piccioni, R.L., Pilcher, J., Reeder, D.D., Rubbia, C., Stefanski, R. and Sulak, L., *Phys. Rev. Lett.*, 32, 800 (1974)
- (R10) - Barish, S.J., Derrick, Y. Cho. M., Hyman, L.G., Rest, J. Schreiner, P., Singer, R., Smith, R.P., Yuta, H., Koetke, D., Barnes, V.E., Carmony, D.D. and Garfinkel, A.F., *Phys. Rev. Lett.*, 33, 448 (1974)
- (R11) - Augustin, J.-E., Boyarski, A.M., Breidenbach, M., Bulos, F., Dakin, J.T., Feldman, G.J., Fischer, G.E., Frygerger, D., Hanson, G., Jean-Marie, B., Larsen, R.R., Luth, V., Lynch, H.L., Lyon, D., Morehouse, C.C., Paterson, J.M., Perl, M.L., Richter, B., Rapidis, P., Schwitters, R.F., Tanenbaum, W.M., Vannucci, F., Abrams, G.S., Briggs, D., Chinowsky, W., Friedberg, C.E., Goldhaber, G., Hollebeek, R.J., Kadyk, J.A., Lulu, B., Pierre, F., Trilling, G.H., Whitaker, J.S., Wiss, J. and Zipse, J.E., *Phys. Rev. Lett.*, 33, 1406 (1974)
- (R12) - Aubert, J.J., Becker, U., Bliggs, P.J., Burger, J., Chen, M., Everhart, G., Goldhagen, P., Lee, Y.Y., Leong, J., McCorriston, T., Rhoades, T.G., Rohde, M., Ting, S.C.C., and Wu, S.L., *Phys. Rev. Lett.*, 33, 1404 (1974)
- (R13) - Bacci, C., Baldini Celio, R., Bernardini, M., Capon, G., Del Fabbro, R., Grilli, M., Iarocci, E., Jones, L., Locci, M., Mencuccini, C., Murtas, G.P., Penso, G., Salvini, G., Spano, M., Spinetti, M., Stella, B., Valente, V., Bartoli, B., Bisello, D., Esposito, B., Felicetti, F., Monacelli, P., Nigro, M., Paoluzi, L., Peruzzi, I., Piano Mortari, G., Piccola, M., Ronga, F., Sebastiani, F., Trasatti, L.,

- Vanoli, F., Barbarino, G., Barbiellini, G., Bemporad, C., Biancastelli, R., Calvetti, M., Castellano, M., Cevenini, F., Costantini, F., Lariccia, P., Patricelli, S., Parascandalo, P., Sassi, E., Spencer, C., Tortora, L., Troya, U. and Vitale, S., *Phys.Rev.Lett.*, 33, 1408 (1974)
- (R14) - Abrams, G.S., Briggs, D., Chinowski, W., Friedberg, C.E., Goldhaber, G., Hollebeek, R.J. Kadyk, J.A., Litke, A., Lulu, B., Pierre, F., Sadoulet, B., Trilling, G.H., Whitaker, J.S., Wiss, J., Zipse, J.F., Augustin, J. -E., Boyarski, A.M., Breidenbach, M., Bulos, F., Feldman, G.J., Fischer, G.E., Fryberger, D., Hanson, G., Jean-Marie, B., Larsen, R.R., Luth, V., Lynch, H.L., Lyon, D., Morehouse, C.C., Paterson, J.M., Perl, M.L., Richter, B., Rapidis, P., Schwitters, R.F., Tanenbaum, W., and Vannucci, F., *Phys.Rev.Lett.*, 33, 1453 (1974)
- (R15) - Abrams, G.S., Briggs, D.D., Chinowsky, W., Friedberg, C. E., Goldhaber, G., Kadyk, J.A., Litke, A.M., Lulu, B.A., Pierre, F.M., Sadoulet, B., Trilling, G.H., Whitaker, J. S., Wiss, J.E., Zipse, J.E., Boyarski, A.M., Breidenbach, M., Bulos, F., Feldman, G.J., Fischer, G.E., Fryberger, D., Hanson, G., Jean-Marie, B., Larsen, R.R., Luth, V., Lynch, H.L., Lyon, D., Morehouse, C.C., Peterson, J. M., Perl, M.L., Rapidis, P., Richter, B., Schwitters, R. F., Tanenbaum, W. and Vannucci, F., *Phys. Rev. Lett.*, 34, 1181 (1975)
- (R16) - Appelquist, T. and Politzer, H.D., *Phys. Rev. Lett.*, 34, 43 (1975)
- (R17) - Eichten, E., Gottfried, K., Kinoshita, T., Kogut, J., Lane, K.D., and Yan, T.-M, *Phys.Rev.Lett.*, 34, 369 (1975)
- (R18) - Okubo, S., Mathur, V.S. and Borchardt, S., *Phys. Rev. Lett.*, 34, 236 (1975)
- (R19) - Deden, H., Hasert, F.J., Krenz, W., von Krogh, J. Lanske, D., Morfin, J., Pohl, M., Schultze, K., Weerts, H., Bertrand-Coremans, G.H., Goossens, M., Mulkens, H., Sacton, J., van Doninck, W., Vilain, P., Burmeister, H., Cundy, D.C., Haidt, D., Lloret, A., Musset, P., Pattinson, J.B.M., Perkins, D.H., Romano, F., Rousset, A., Wachsmuth, H., Beher, L., Brisson, V., Contet, A., Degrange, B., Haguenaer, M., Klumberg, L., Nguyen-Khac, U., Petiau, P., Belloti, W., Bonetti, S., Cavalli, D., Fiorini, E., Pullia,

- A., Rollier, M., Aubert, B., Chounet, L.M., Gandsman, J., Heusse, P., Jaffre, M., Jauneau, L., Longuemare, C., Lutz, A.M., Pascaud, C., Vialle, J.P., Bullock, F. W., Jones, T.W., Michette, A.-G., Myatt, G. and Pinfold, J., *Phys. Lett.*, 58B, 361 (1975)
- (R20) - Gazzoli, E.G., Cnops, A.M., Connolly, P.L., Louttit, R.I., Murtagh, M.J., Palmer, R.B., Samios, N.P., Tso, T.T., and Williams, H.H., *Phys.Rev.Lett.*, 34, 1125 (1975)
- (R21) - Blietschau, J., Deden, H., Hasert, F.J., Krenz, W., Lanske, D., Morfin, J., Pohl, M., Weerts, H., Welch, L., Bertrand-Coremans, G.H., Mulkens, H., Sacton, J., van Doninck, W., Cundy, D.C., Danilchenko, I., Haidt, D., Lloret, A., Matteuzzi, C., Musset, P., Myklebost, K., Pattinson, J.B.M., Perkins, D.H., Pittuck, D., Romano, F., Wachsmuth, H., Blondel, A., Brisson, V., Degrange, B., François, T., Haguenaue, M., Kluberg, L., Nguyen-Khac, U., Petiau, P., Rousset, A., van Dam, P., Aldrovandi, A., Belotti, E., Bonetti, S., Cavalli, D., Fiorini, E., Pullia, A., Rollier, M., Aubert, B., Blum, D., Chounet, L. M., Heusse, P., Jaffre, M., Jauneau, L., Longuemare, C., Lutz, A.M., Pascaud, C., Vialle, J.P., Bullock, F.W., Jones, T.W., Michette, A.G., and Myatt, G., *Phys.Lett.* 60B, 207 (1976)
- (R22) - von Krogh, J., Fry, W., Camerini, U., Cline, D., Loveless, R.J., Mapp, J., March, R.H., Reeder, D.D., Barbaro-Galtieri, A., Bosetti, P., Lynch, G., Marriner, J., Solmitz, F., Stevenson, M.L., Haidt, D., Harigel, G., Washsmuth, H., Cence, R., Harris, F., Parker, S.I., Peters, M., Peterson, V. and Stenger, V., *Phys.Rev.Lett.*, 36, 710(1976)
- (R23) - Goldhaber, G., Pierre, F.M. Abrams, G.S., Alam, M. S., Boyarski, A.M., Breidenbach, M., Carithers, W.C., Chinnowski, W., Cooper, S.C., Devoe, R.G., Dorfman, J.M., Feldman, G.J., Friedberg, C.E., Fryberger, D., Hanson, G., Jaros, J., Johnson, A.D., Kadyk, J.A., Larsen, R.R., Luke, D., Luth, V., Lynch, H.L., Madaras, R.J., Morehouse, C.C., Nguyen, H.K., Paterson, J.M., Perl, M.L., Peruzzi, I., Piccolo, M., Pun, T.P., Rapidis, P., Richter, B., Soudoulet, B., Schindler, R.H., Schwitters, R.F., Siegrist, J., Tanenbaum, W., Trilling, G.H., Vannucci, F., Whitaker, J.S., and Wiss, J.E., *Phys. Rev. Lett.*, 37, 255 (1976).

- (R24) - Peruzzi, I., Piccolo, M., Feldman, G.J., Nguyen, H. K., Wiss, J.E., Abrams, G.S., Alam, M.S., Boyarski, A.M., Breidenbach, M., Carlithers, W.C., Chinowsky, W., Devoe, R.G., Dorfan, J.M., Fischer, G.E., Friedberg, C.E., Fryberger, D., Goldhaber, G., Hanson, G., Jaros, J.A., Johnson, A.D., Kadyk, J.A., Larsen, R.R., Luke, D., Luth, V., Lynch, H.L., Madaras, R.J., Morehouse, C.C., Paterson, J.M., Perl, M.L., Pierre, F.M., Pun, T.P., Rapidis, P., Richter, B., Schindler, R.H., Schwitters, R. F., Siegrist, J., Tanenbaum, W., Trilling, G.H., Vanucci, F. and Whitaker, J.S., *Phys.Rev.Lett.*, 37, 569 (1976)
- (R25) - Knapp, B., Lee, W., Leung, P., Smith, S.O., Wijangco, A., Knaver, J., Yount, D., Bronstein, J., Coleman, R., Gladding, G., Goodman, M., Gormley, M., Messner, R., O'Halloran, T., Sarracino, J., Wattenberg, A., Binkley, M., Gaines, I., and Peoples, J., *Phys.Rev.Lett.*, 37, 882 (1976).
- (R26) - Weinberg, S., *Phys. Rev. Lett*, 19, 1264 (1967).
- (R27) - Salam, A., In *Proc. VIII Nobel Symposium, Lerun*, edited by Nils Svartholm, Wiley Interscience, 367 (1968)
- (R28) - Perl, M.L., Abrams, G.S., Boyarski, A.M., Breidenbach, M., Briggs, D.D., Bulos, F., Chinowsky, W., Dakin, J.T., Feldman, G.J., Friedberg, C.E., Fryberger, D., Goldhaber, G., Hanson, G., Heile, F.B., Jean-Marie, B., Kadyk, J.A., Larsen, R.R., Litke, A.M., Luke, D., Lulu, B.A., Luth, V., Lyon, D., Morehouse, C.C., Paterson, J.M., Pierre, F.M., Pun, T.P., Rapidis, P.A., Richter, B., Sadoulet, B., Schwitters, R.F., Tanenbaum, W., Trilling, G.H., Vannucci, F., Whitaker, J.S., Winkelmann, F.C. and Wiss, J.E., *Phys.Rev.Lett.*, 35, 1489 (1975).
- (R29) - Perl, M.L., Feldman, G.J., Abrams, G.S., Alam, M.S., Boyarski, A.M., Breidenbach, M., Bulos, F., Chinowski, W., Dorfan, J., Friedberg, C.E., Goldhaber, G., Hanson, G., Heile, F.B., Jaros, J.A., Kadyk, J.A., Larsen, R.R., Litke, A.M., Luke, D., Lulu, B.A., Luth, V., Madaras, R.J., Morehouse, C.C., Nguyen, H.K., Paterson, J. M., Peruzzi, I., Piccolo, M., Pierre, F.M., Pun, T.P., Rapidis, P., Richter, B., Sadoulet, B., Schwintters, R.F., Tanenbaum, W., Trilling, G.H., Vannucci, F., Whitaker, J.S. and Wiss, J.E., *Phys. Lett.*, 63B, 466 (1976)
- (R30) - Meyer, H., In *Proc. of the Orbis Scientiae*, Coral Gables (1977)

- (R31) - Burmester, J., Criegee, L., Dehne, H.C., Derikum, K., Devenish, R., Flugge, G., Fox, J.D., Franke, G., Gerke, Ch., Harms, P., Horlitz, G., Kahl, Th., Knies, G., Rossler, M., Schmitz, R., Timm, U., Wahl, H., Waloschek, P., Winter, G.G., Wolff, S., Zimmermann, W., Blobel, V., Koppitz, B., Lohrmann, E., Luhrsen, W., Backer, A., Burger, J., Grupen, C., Zech, G., Meyer, H., and Wacker, K., *Phys.Lett.*, 68B, 297,301 (1977)
- (R32) - Harari, H., in *Conf. on Photon and Leptons* (1975)
- (R33) - Herb, S.W., Hom, D.C., Lederman, L.M., Sens, J.C., Snyder, H.D., Yoh, J.K., Appel, J.A., Brown, C.N., Innes, W. R., Ueno, K., Yamanouchi, T., Ito, A.S. Jostlein, H., Kaplan, D.M., and Kephart, R.D., *Phys.Rev.Lett.*, 39, 252 (1977)
- (R34) - Bose, S.N., *Zs. f. Phys.*, 26, 178 (1924)
- (R35) - Einstein, A., *Sit. d. Preuss. Akad. d. Wiss.*, 261 (1924)
- (R36) - Fermi-E., *Zs. f. Phys.*, 36, 902 (1926)
- (R37) - Dirac, P.A.M., *Proc. Roy. Soc. [London]*, 112 A, 661 (1926)
- (R38) - Greenberg, O.W., *Phys.Rev.Lett.*, 13, 598 (1964)
- (R39) - Han, M.Y. and Nambu, Y., *Phys. Rev.* 139 B, 1006 (1965)
- (R40) - Giambiagi, J.J., "Teoria unificada de interacciones debiles y electromagnéticas", Dep. de Física da Universidade Federal de São Carlos, (Fev. 1978)
- (R41) - Tiomno, J., *Tese de Cátedra, USP* (1966)
- (R42) - Lattes, C.M.G., Orsini, C.Q., Pacca, I.G., da Cruz, M.T., Okuno, E., Fujimoto, Y. and Yokoi, K., *Il Nuovo Cimento*, 28, 614 (1963)
- (R43) - Augustin, J.E., Boyarski, A.M., Breidenbach, M., Bulos, F., Dakin, J.T., Feldman, G.J., Fischer, G.E., Fryberger, D., Hanson, G., Jean-Marie, B., Larsen, R.R., Luth, V., Lynch, H.L., Lyon, D., Morehouse, C.C., Paterson, J.M., Perl, M. L., Richter, B., Schwitters, R.F., Vannucci, F., Abrams, G.S., Briggs, D., Chinowsky, W., Friedberg, C.E., Goldhaber, G., Hollebeek, R.J., Kadyk, J.A., Trilling, G.H., Whitaker, J.S., and Zipse, J.E. *Phys.Rev.Lett.*, 34, 233 (1975)
- (R44) - Rapidis, P.A., Gobbi, B., Luke, D., Barbaro-Galtieri, A., Dorfman, J.M., Ely, R., Feldman, G.J., Feller, J.M., Fong, A., Hanson, G., Jaros, J.A., Kwan, B.P., Lecomte, P., Litke, A.M., Madaras, R.J., Martin, J.F., Mast, T.S., Miller, D. H., Parker, S.I., Perl, M.L., Peruzzi, I., Piccolo, M.,

- Pun, T.P., Ronan, M.T., Ross, R.R., Sadoulet, B., Trippe, T.G., Vuillemin, V. and Yount, D.E., *Phys. Rev. Lett.* 39, 526 (1977)
- (R45) - Muller-Kirsten, H.J.W., *Phys. Rev.*, D12, 1103 (1975)
- (R46) - Goldman, T. and Yankielowicz, S., *Phys. Rev.* D12, 2910 (1975)
- (R47) - Gunion, J.F., and Li, L.F., *Phys. Rev.*, D12, 3583 (1975)
- (R48) - Cattani, M. and Fernandes, N.C., *IFUSP*, P/125 (1977)
- (R49) - Cattani, M. and Fernandes, N.C., *Acta Phys. Polonica*, 8 10, 43 (1979)
- (R50) - Bogolubov, P.N., *Ann. Inst. H. Poincaré*, 8, 163 (1967)
- (R51) - Smith, G.B. and Tassie, J.J., *Ann. of Phys.*, 65, 352 (1971)
- (R52) - Ferreira, P.L. and Zagury, N., *Lett. Nuovo Cimento*, 20 14 (1977)
- (R53) - Abdalla, J., Ferreira, P.L., and Zagury, N., *Nuovo Cimento*, 55A, 215 (1980)
- (R54) - Amaral, M.G. and Zagury, N. (não publicado) (1981)
- (R55) - Carvalho, H.F. e D'Oliveira, A.B., *CATA-IAE, EAV-017/1980*
- (R56) - Chodos, A., Jaffe, R.L., Johnson, K., Thorn, C.B. and Weisskopf, V.F., *Phys. Rev.*, D9, 3471 (1974)
- (R57) - Prescott, C.Y., Atwood, W.B., Cottrell, R.L.A., DeStaebler, H., Garwin, E.L., Gonidec, A., Miller, R.H., Rochester, L.S., Sato, T., Sherden, D.J., Sinclair, C.K., Stein, S., Taylor, R.E., Clendenin, J.E., Hughes, V.W., Sasao, N., Schuler, K.P., Borghini, M.G., Lubelsmeyer, K., Jentschke, W., *Phys. Lett.*, 77B, 347 (1978)
- (R58) - Cahse, C.T., *Phys. Rev.*, 34, 1069 (1929)
- (R59) - Barkov, L.M. and Zolotarev, M.S., *Zh. Eksp. Teor. Fiz. Pis'ma*, 26, 379 (1978)
- (R60) - Alibrand, P., Armenise, N., Bellotti, E., Blondel, A., Blum, D., Bonetti, S., Bonneaud, G., Bourotte, J., Carnesecchi, G., Cavalli, D., Conforto, G., Degrange, B., Erriquez, O., Fiorini, E., Fogli-Muciaccia, M.T., Haguenaer, M., Heusse, P., Gillespie, J., Jacquet, F., Lundborg, P., Lutz, A.M., Matteuzzi, C., Musset, P., Natali, S., Nguyen-Khac, U., Nuzzo, S., Pascaud, C., Pattison, B., Pullia, A., Rollier, M., Romano, F., Sleeman, J., Vialle, J.P., Willutzky, M., Zanotti, L., *Phys. Lett.*, 74B, 422 (1978)
- (R61) - Cnops, A.M., Connolly, P.L., Kahn, S.A., Kirk, H.G., Murtagh, M.J., Palmer, R.B., Samios, N.P., Tanaka, M., Baltay,

C., Caroumbalis, D., French, H., Hibbs, M., Hylton, R., Kalelkar, M., and Shastri, K., *Phys. Rev. Lett.*, 41, 357 (1978)

(R62) - Caldirola, P., Pavsic, M. and Recami, E., *Phys. Lett.*, 66A, 9 (1978)

Nota:- Este artigo é a sexta parte do trabalho "Crônica das Partículas Elementares". As cinco primeiras partes deste trabalho foram publicadas nos Volumes 2 n^{os} 2 e 3 e Volume 3 n^{os} 2, 3 e 4 desta Revista.