

## PARTÍCULAS E INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

Orimar Antônio Battistel

Departamento de Física, Centro de Ciências Naturais e Exatas.UFSM.  
Santa Maria, RS.

## RESUMO

Nós apresentamos uma discussão de algumas das idéias e fatos que levaram à concepção da estrutura fundamental da natureza em termos de constituintes básicos e interações fundamentais. Numa abordagem quase-histórica, apresentamos a construção das idéias que levaram à hipótese da existência dos quarks. São discutidas, brevemente, as implicações fenomenológicas e conceituais que brotam deste modelo. As principais características da interação fundamental de cor entre os quarks, baseada na troca de glúons, são então discutidas. Ao final, mencionamos o ordenamento que brota a partir disto e a nova concepção a respeito da estrutura fundamental da natureza que foi então estabelecida.

## SUMMARY

BATTISTEL, O. A., FUNDAMENTAL INTERACTIONS AND PARTICLES. *Ciência e Natura*, 14: 71-103, 1992.

We present a discussion of some of the ideas and facts that led to the modern conception of the structure of matter in terms of basic constituents and fundamental interactions. We discuss the construction of the quark model in a historical context, stressing that the phenomenological knowledge of particle properties induced the mathematical formalism. The interaction between quarks is discussed in the framework of the color force based on the exchange of gluons. For the sake of completeness we mention briefly the microworld structure that emerged from these new ideas.

## 1. INTRODUÇÃO

A humanidade está entrando numa nova fase do seu conhecimento a respeito da natureza. Talvez o avanço que está sendo conseguido, depois de anos de trabalho árduo e sistemático, possa ser considerado como o mais importante fato já acontecido em toda a história da ciência. Pelo menos no que diz respeito às implicações conceituais que decorrem destas descobertas. Nós estamos chegando muito próximo, ao que se acredita ser, aos mais profundos segredos da matéria. O passo que estamos dando vai na direção de desvendar os mais intrincados segredos até então escondidos no mundo submicroscópico da matéria, o que nos permite uma aproximação definitiva de respostas a perguntas que vão desde o que é a matéria na sua mais profunda essência e quais são seus mecanismos dinâmicos, até nos levar à conexões com a origem do universo, e seu atual estágio de evolução e nos dizer qual o papel desempenhado por cada uma das peças fundamentais em cada fase do seu desenvolvimento. O mais importante

é que estas descobertas têm nos mostrado uma natureza extremamente simples e profundamente bela, o que parecia impossível até mesmo imaginar a apenas uns poucos anos atrás. As conseqüências desta evolução para a ciência são incomparáveis a outras já ocorridas, e para a humanidade, ainda imprevisíveis. Para entendermos melhor o significado e a natureza deste avanço, basta lembrarmos a trajetória que nos levou ao conhecimento do átomo, tal qual nós o conhecemos hoje, e o que nos permitiu praticamente todo o progresso e conforto que hoje desfrutamos em termos de tecnologia em todas as áreas da atividade humana dos nossos dias. Não é exagero dizer que nossa sociedade de hoje é função quase que exclusiva do conhecimento que obtivemos a respeito do átomo. Este estágio de conhecimento teve uma história semelhante à evolução que estamos nos referindo, e não remonta muito aos dias de hoje.

### 1.1. O Átomo

Não faz muito tempo que a ciência, através de seus pensadores, concebeu idéias fundamentalistas a respeito da natureza. Ou seja, de que a vasta multiplicidade de coisas apresentadas pela natureza, apesar de serem aparentemente diferentes entre si, têm em comum o fato de serem todas construções diferentes feitas a partir de um certo número finito de entes com identidade própria. A primeira vez que esta idéia veio à tona na ciência foi através da afirmação de Lavoisier: "*Na natureza nada se cria nada se perde, tudo se transforma*". Esta afirmação pode ser colocada noutra versão equivalente: "*Na natureza tudo é constituído a partir de elementos químicos*". Foi, entretanto, Dalton que os denominou átomos, classificando-os como as últimas coisas a possuírem identidade na natureza. Esta idéia permitiu a Mendeleev, em 1869, construir, através da observação e análise de todo o conhecimento acumulado até então a respeito das propriedades dos elementos químicos, observando certas regularidades existentes entre eles, a tabela periódica dos elementos. A sistematização decorrente foi certamente importantíssima, mas abria uma nova etapa de perguntas: - Como seria o átomo? O que faria com que átomos diferentes tivessem propriedades tão parecidas? Todas estas perguntas eram feitas sob o ponto de vista das bem sucedidas teorias eletromagnética de J.C. Maxwell, e mecânica, de Newton, somadas à descoberta do elétron em 1897 por J.J. Thomson. Todos os átomos eram constituídos de elétrons, uma partícula carregada negativamente, mas os átomos eram neutros como um todo. Como então compatibilizar a existência de cargas positivas com os elétrons de modo a se ter uma estrutura estável compatível com todas as propriedades já conhecidas na época? Foi o próprio Thomson que formulou o primeiro modelo atômico, baseado nestas idéias, por volta de 1910. Nesta época, o acúmulo de evidências experimentais forneciam uma estimativa para o número  $Z$  de elétrons que cada átomo possui. Este número era apontado como sendo da ordem de  $A/2$ , onde  $A$  é o peso atômico. Sendo assim, Thomson propôs que os átomos seriam uma espécie de pudim de passas, onde as passas seriam os elétrons e o pudim as cargas positivas do átomo. Os espectros

óticos, já amplamente conhecidos na época, eram imaginados como sendo devido à oscilações dos elétrons em torno das posições de equilíbrio que ocupavam em cada átomo, devido à perturbações externas, as quais eram expostos. Os problemas para o modelo de Thomson eram muitos. Mas foi devido à interpretação dada por Rutherford a uma série de experimentos feitos por Geiger e Marsden que o modelo foi definitivamente sepultado. Segundo Rutherford, não se poderia explicar o espalhamento de partículas alfa pelo átomo se a carga positiva  $Ze$  estivesse distribuída uniformemente por todo o volume do átomo (estimado através do número de Avogadro). Ao invés disto, seria necessário que a carga positiva estivesse localizada espacialmente numa região muito menor, com um raio cerca de 10 mil vezes menor que o raio do átomo. De acordo com Rutherford então, o átomo deveria ser composto por um núcleo extremamente pequeno, com toda a carga positiva e praticamente toda a massa, orbitado pelos elétrons, responsáveis pelo volume atômico. Várias perguntas passaram então a serem feitas à luz do conhecimento da época. Como tal, os elétrons movendo-se ao redor do núcleo sob a ação de forças coulombianas, tal como pequenos planetas orbitando ao redor de um pequeno sol, segundo a teoria eletromagnética deveriam irradiar continuamente espiralando até entrarem em colapso com o núcleo, já que seriam partículas aceleradas e carregadas. Alguns espectros atômicos já eram bem conhecidos e por isso estabeleciam vínculos qualitativos e quantitativos às respostas necessárias. Porque os elétrons não irradiavam? O que tornaria todos os átomos idênticos entre si dentro de cada espécie, já que o movimento dos elétrons poderia ser, em princípio, qualquer desde que conservasse a energia mecânica? E porquê os espectros atômicos eram discretos e governados por certas regras de seleção? Foi Bohr quem conseguiu colocar um pouco de luz na estabilidade do átomo de Rutherford. Baseado num pequeno número de postulados, Bohr propôs o primeiro modelo atômico bem sucedido. Na sua teoria, ele incorporou resultados da teoria de Einstein sobre o efeito fotoelétrico. Além disto, introduziu, pela primeira vez, a quantização do momento angular orbital dos elétrons. Os postulados, aparentemente sem grandes justificativas, conduziam a resultados surpreendentemente em acordo com os resultados empíricos conhecidos na época, com grande precisão, a respeito dos espectros do átomo de hidrogênio. E mais, fazia novas previsões que foram confirmadas posteriormente. Parte das explicações viriam com a proposta revolucionária de de Broglie. Segundo ele, a natureza permitia à matéria um comportamento dual; ela pode, tal qual a radiação, comportar-se como um corpúsculo ou uma onda. A matéria poderia, então, exibir propriedades exclusivas das ondas, como interferência e difração, o que foi confirmado experimentalmente. Isto explicava porque os átomos eram idênticos por espécie, pois sendo ondas, os elétrons somente podem se mover no campo coulombiano do núcleo, em órbitas fechadas nas quais o número de comprimentos de onda seja um número inteiro, ou seja, uma onda estacionária. Esta idéia abriu caminho para uma nova e revolucionária teoria a respeito da matéria. Schrödinger (e independentemente Heisenberg) propôs uma equação de onda para a matéria, baseado numa prescrição particular e na



conservação da energia mecânica total não-relativística. A teoria chamada então de "Mecânica Quântica" ou ondulatória, conseguiu incorporar todo o conhecimento acumulado nesta longa trajetória, consistentemente, dentro de suas regras. Algumas informações novas e profundamente detalhadas podiam ser obtidas da teoria, a respeito da estrutura eletrônica dos átomos, responsável pelas propriedades químicas destes. Faltava então apenas um ingrediente importante para a descrição totalmente satisfatória. Este ingrediente não poderia estar presente na teoria de Schrödinger pois é essencialmente relativístico e esta teoria é não-relativística por construção. Baseados nas experiências feitas por Stern e Gerlach, Uhlenbeck e Goudsmit propuseram uma teoria na qual os elétrons possuem um momento magnético intrínseco denominado spin, igualmente quantizado, porém, para os elétrons de magnitude igual à metade do momento magnético orbital de Bohr. Este último ingrediente deu a fundamentação necessária ao princípio da Exclusão de Pauli, segundo o qual a estrutura eletrônica dos átomos era devido a uma propriedade estatística fundamental da natureza. Os elétrons, sendo partículas de spin semi-inteiro, poderiam popular um certo átomo de tal modo que em cada estado permitido pela teoria ondulatória, somente um elétron pudesse ser encontrado. Desvendava-se assim um grande mistério e mais, tornava-se possível a determinação e manipulação de todas as propriedades químicas dos elementos da tabela periódica. A vastidão de coisas apresentadas pela natureza podia então ser apreciada como construções feitas a partir dos mesmos ingredientes e que podiam ser confeccionadas à vontade com precisão e previsão. O mistério da natureza íntima da matéria, entretanto, não acabava no entendimento das propriedades do átomo, pois restava então o núcleo para ser entendido.

## 1.2. O Núcleo Atômico

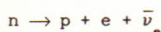
Após a conclusão de Rutherford a respeito da existência de um núcleo atômico, veio imediatamente a pergunta "De que o núcleo é feito?". Parte da resposta veio em 1919 com a identificação do próton, o que abria uma nova fase de investigações. Os prótons sendo positivamente carregados deveriam se repelir mutuamente com uma intensidade fantástica, devido às pequenas distâncias. O fato de a relação carga sobre massa do núcleo precisar ser compatibilizada levou, inicialmente, à suposição de que existiam  $2Z$  prótons no núcleo com  $Z$  elétrons dentro e  $Z$  elétrons fora do núcleo. Esta interpretação era, na verdade, induzida e forçada pelo conhecimento do decaimento beta. Embora existissem argumentos contrários a esta idéia, vindos da mecânica quântica de Schrödinger, mais especificamente através do princípio de incerteza de Heisenberg, não existia outra alternativa até a descoberta do nêutron por Chadwick em 1932. A descrição em termos de prótons e nêutrons era certamente compatível com a relação carga sobre massa necessária. A estabilidade do núcleo, entretanto, exigia que estes se mantivessem ligados entre si e aos prótons, e pelo fato de não terem carga elétrica, não poderia ser via forças coulombianas (as forças gravitacionais são incrivelmente fracas



para se contraporem às forças repulsivas dos prótons). Seria necessário, então, conceber a existência de uma nova força na natureza, fantasticamente forte, entre os prótons e nêutrons. Apesar de esta força ser desconhecida, saberia que do ponto de vista de constituintes fundamentais tinha-se chegada à resposta final. Aparentemente, toda a natureza era composta de átomos e estes compostos por apenas três partículas fundamentais. Deveria existir na natureza três tipos de forças ou interações básicas: eletromagnéticas, explicando a estabilidade do átomo e as ligações químicas, as forças nucleares, explicando a estabilidade do núcleo, e as forças gravitacionais, explicando a estabilidade dos sistemas planetários. Mas o que parecia o fim da busca dos constituintes fundamentais, passaria a ser apenas o início. Na busca de um melhor entendimento das forças nucleares, começavam a surgir novas partículas, e a existência de uma quarta força, a força fraca, responsável, entre outras coisas, pelo decaimento beta dos núcleos. Assim que começavam a aparecer as novas partículas, o problema passou a ser o conhecimento e o entendimento das suas propriedades e interações. E desta busca surge uma nova concepção da matéria, pouco a pouco.

## 2. AS PRIMEIRAS PARTÍCULAS

No início da década de 30, o mundo das partículas elementares se reduzia ao conhecimento de umas poucas partículas: o próton, o nêutron e o elétron, como constituintes básicos da matéria estável. O fóton, que foi introduzido como consequência da quantização da energia por Planck, pela interpretação de Einstein do efeito fotoelétrico e de Compton sobre o efeito que leva o seu nome. O neutrino, que foi postulado por Pauli, em 1931, para explicar a aparente não conservação da energia no decaimento beta do nêutron:



### 2.1. Teorias para a Descrição das Partículas

A teoria ondulatória de Schrödinger, não-relativística em sua essência, não conseguia prever a existência do momento magnético de Spin das partículas, um grau de liberdade intrinsecamente relativístico, e uma importante propriedade das mesmas. Este fato encorajou muitos físicos teóricos a desenvolverem equações relativísticas seguindo a prescrição de Schrödinger. A primeira tentativa foi feita por Klein e Gordon, em 1926, que não conseguiram o sucesso esperado e abandonaram a teoria. Este trabalho foi mais tarde retomado por Pauli e Weisskopf que argumentaram que podiam ser obtidos resultados satisfatórios dando-se uma interpretação apropriada. Segundo eles a equação, definindo uma função de onda análoga àquela vinda da teoria de Schrödinger, deveria, na verdade, definir um "campo" e este deveria ser quantizado à luz da então surgida teoria quântica de campos. Além disto,

esta equação somente seria apropriada para partículas de spin zero (tais como os píons), sendo, portanto, incapaz de descrever o elétron relativístico. Foi P.A.M. Dirac, em 1930, que desenvolveu uma teoria apropriada para o elétron. Esta teoria conseguiu fazer surgir, naturalmente, o spin do elétron e teve o sucesso desejado. Na verdade, como ficou claro mais tarde, a equação de Dirac serve não apenas para descrever o elétron mas para qualquer partícula de spin  $\frac{1}{2}$ . Outras equações relativísticas foram desenvolvidas posteriormente, uma para cada spin, e todas foram tratadas à luz da teoria quântica de campos. Em particular, o campo eletromagnético clássico, um campo de spin 1 com vínculos estabelecidos pelas equações de Maxwell, após quantizado consistentemente, levou à eletrodinâmica quântica, a mais bem sucedida e precisa teoria já desenvolvida. A eletrodinâmica quântica tem servido de guia para o tratamento dos outros tipos de interações.

## 2.2. Antipartículas

Um dos mais impressionantes resultados obtidos pela teoria de Dirac, para o elétron, foi a introdução do conceito de antipartículas. Na solução do problema de Dirac aparecem estados correspondentes a "frequências positivas e negativas" simetricamente. Estes resultados foram interpretados como correspondendo à existência de uma partícula com a mesma massa do elétron, mesmo spin, porém com carga oposta. Esta partícula, a qual se denominou pósitron, foi identificada por Anderson alguns anos mais tarde (1932). Além disto observou-se que fótons energéticos podiam criar um par elétron-pósitron e estes podiam se aniquilar num fóton. Este resultado, obtido para o elétron é, na verdade, uma propriedade geral da natureza, uma simetria fundamental. A cada partícula corresponde a existência de uma antipartícula, que é absolutamente idêntica sob certos aspectos, porém com certos números quânticos (ou características) opostos.

## 2.3. Bósons e Férmions

Uma das importantes características da natureza, no que diz respeito às partículas, é a "estatística quântica" que obedecem. Verifica-se que todas as partículas que possuem spin inteiro, obedecem a um tipo de estatística chamada estatística de Bose-Einstein e são, por isso, denominadas Bósons. As partículas que possuem spins semi-inteiros obedecem à estatística quântica de Fermi-Dirac e são denominadas Férmions. Esta "classificação" tem profundas implicações para as propriedades da matéria. Elas diferem fundamentalmente na maneira com que partículas idênticas ocupam os estados energéticos permitidos, ou seja, no que diz respeito ao princípio de exclusão. Tal princípio afirma que para um sistema de partículas idênticas, se elas forem Bósons, todas podem ocupar o estado permitido de menor energia. Se elas forem férmions, apenas uma das partículas pode ocupar um estado identificado por um conjunto de números quânticos que identificam um estado de energia. As conseqüências desta propriedade fundamental determinam, como tal, as estruturas eletrônica e

nuclear dos átomos, como também os próprios mecanismos das interações. A natureza seria completamente diferente se não existisse esta distinção.

#### 2.4. Interações-Teoria de Campos

Uma consideração necessária para o estudo das partículas é a adoção de uma prescrição para o tratamento das interações entre elas. Uma das mais frutíferas idéias já introduzidas na física é o conceito de campo. Este conceito foi introduzido inicialmente em substituição ao conceito de interação a distância, para simplificar a linguagem utilizada nas discussões dos diferentes problemas envolvendo interações. Dentro da visão de interação à distância, as partículas exercem forças umas sobre as outras diretamente, levando em consideração a distância que as separa, explicitamente. Dentro da visão de campo cada partícula usa seu próprio campo. A interação é vista como sendo devida à presença do campo. Desta maneira, por exemplo, uma carga elétrica possui um campo elétrico na região que a cerca. Este campo é bem definido em todos os pontos por uma intensidade e por uma direção. Quando outra partícula carregada eletricamente penetra na região onde existe este campo ela sente uma força devido à intensidade do campo no ponto onde esta se encontra. Não há necessidade de mencionar a carga ou a distribuição de cargas que está associada à presença deste campo. O problema de determinar o campo devido a uma distribuição é considerado separadamente da discussão de como outra carga ou distribuição interage com este campo. Nós podemos visualizar o campo de uma carga elétrica como se fosse um fluido tênue, que se torna cada vez mais denso à medida que nos aproximamos do ponto onde se encontra a carga. Este fluido move-se com uma certa velocidade em cada ponto do espaço, indo para o infinito (saindo da fonte que é a carga), ou convergindo para a carga (sendo, portanto um sorvedouro), de acordo com o sinal desta carga. O campo e a carga, entretanto, estão sempre associados. Não existe campo sem carga e nem carga sem campo. Uma carga interage porque percebe o campo e não precisa necessariamente conhecer (ou perceber) a carga, ou as cargas que são as "donas" do campo.

A teoria quântica de campos também interpreta a interação entre partículas como sendo devido à presença de um campo associado a estas. Entretanto, quando "quantizamos" o campo, surge desta prescrição uma interpretação diferente e até certo ponto surpreendente. Uma partícula interage com outra trocando energia e momento em quantidades quantizadas ou em pacotes chamados quanta. Cada quantum tem o "status" de partícula. Dentro desta idéia o campo elétrico de uma partícula carregada é devido a um mecanismo de constante emissão e absorção de fótons, o quantum da interação eletromagnética. O campo de uma carga pode, então, ser imaginado como sendo a carga cercada por uma nuvem de fótons (como se fosse uma nuvem de poeira tênue ao invés do líquido tênue clássico). Uma carga interage com outra trocando um quantum, ou seja, um fóton com energia e momentum bem definidos. Apenas cargas elétricas podem emitir e absorver fótons.



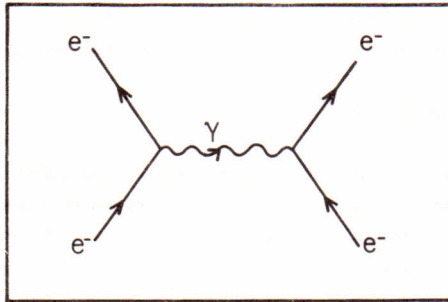


Figura 1. Um diagrama representando a interação eletromagnética entre dois elétrons, trocando um fóton, segundo a teoria quântica de campos.

Dentro da teoria quântica de campos é usualmente usada uma linguagem diagramática conveniente chamada "diagramas de Feynman", para representar os processos que ocorrem entre as partículas. Os diagramas têm certas propriedades tais como a de que se o processo ocorre com as setas apontando numa "direção" ocorre com estas apontando na direção contrária, ou seja, trocando as partículas por antipartículas.

## 2.5. As Forças Nucleares

Baseado no mecanismo básico da eletrodinâmica quântica, de que as cargas interagem via troca de fótons, Yukawa propôs em 1935 uma idéia revolucionária a respeito das complicadas forças nucleares. Ele afirmou que tal qual os elétrons, as partículas do núcleo atômico interagiriam via troca de partículas. Estas partículas, entretanto, deveriam possuir uma certa quantidade de massa de repouso, para compatibilizar o fato de estas forças serem de curto alcance, diferentemente das forças eletromagnéticas que por serem mediadas por fótons, partículas de massa zero, têm alcance infinito. Yukawa baseado nas propriedades da força nuclear chegou a estimar a massa dessa partícula, como sendo da ordem de 140 MeV.

Quando mais tarde foi detectada, por Anderson e Neddermeyer, em 1936, a presença de uma partícula com uma massa da ordem de 105 MeV, chegou-se a pensar que fosse a partícula de Yukawa. Entretanto, as propriedades observadas desta partícula não se mostraram compatíveis com esta idéia. O muon, como foi posteriormente denominado, não interagia via força nuclear. Além disto, decaía em um elétron e um anti-neutrino num tempo da ordem de microssegundos. A partícula descoberta não passava, na verdade, de um "irmão gordo" do elétron, totalmente idêntico exceto pela massa de repouso. Mas em 1946 foram feitas experiências usando as técnicas de emulsão, introduzidas por Powell, cuja interpretação em 1947 revelou a presença da partícula de Yukawa, denominada então de méson pi ou pión. A partir daí, com o início do uso de aceleradores, os pions passavam a ser produzidos com facilidade através do

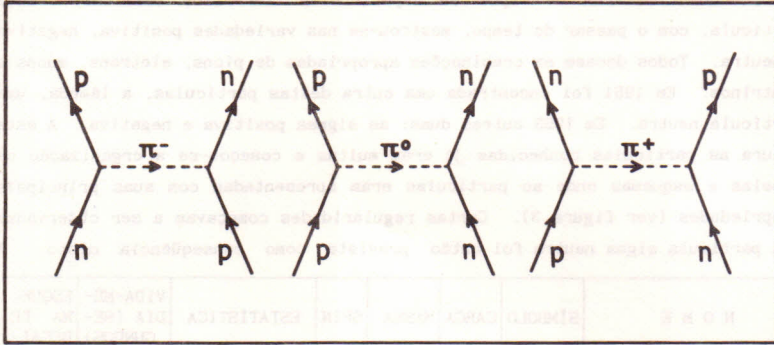


Figura 2. O mecanismo de Yukawa para a força nuclear entre prótons e nêutrons dentro do núcleo.

choque entre partículas fortemente interagentes (núcleos propriamente ditos). Foi verificado que os píons decaem em muons e elétrons acompanhados por neutrinos (píons carregados) e em fótons (pion neutro).

## 2.6. Interações e Tempos Característicos

As quatro interações fundamentais da natureza podem ser distinguidas entre si por vários aspectos. Dentre estes, a intensidade, o alcance e os tempos característicos estão entre os mais importantes. A força forte é mais intensa e tem um alcance de aproximadamente  $10^{-13}$  cm, que é aproximadamente o diâmetro de uma partícula fortemente interagente. O tempo característico é da ordem de  $10^{-23}$  segundos. A segunda em ordem de intensidade é a força eletromagnética, da ordem de 1% da força forte. O alcance desta força é infinito. O tempo característico é da ordem de  $10^{-21}$  segundos. A força fraca tem uma intensidade de  $10^{-14}$  da força forte. Tem um alcance extremamente curto e por isso não é responsável por nenhum sistema ligado conhecido. O tempo característico é da ordem de  $10^{-9}$  segundos. A última e mais fraca delas é a gravitacional, com alcance infinito. Esta força é completamente desprezível no mundo das partículas, mas importante nos fenômenos de grande escala. As forças se manifestam não somente na geração de sistemas ligados, mas também em processos de colisão entre partículas, de onde vêm importantes informações sobre as mesmas.

## 2.7. As Partículas Estranhas

A partir de 1946, a natureza nos permitiu o conhecimento de um novo ingrediente. Neste ano, foi observada a primeira de um conjunto de partículas com características completamente novas, as partículas estranhas. O próprio nome dado a estas partículas dá uma idéia da novidade que representaram na época. A primeira encontrada foi o méson Kaon, por Rochester e Butler em

1946, usando câmaras de vapor em experiências com raios cósmicos. Esta partícula, com o passar do tempo, mostrou-se nas variedades positiva, negativa e neutra. Todos decaem em combinações apropriadas de píons, elétrons, múons e neutrinos. Em 1951 foi encontrada uma outra destas partículas, a lâmbda, uma partícula neutra. Em 1953 outras duas: as sigmas positiva e negativa. A esta altura as partículas conhecidas já eram muitas e começou-se a organização de tabelas e esquemas onde as partículas eram apresentadas com suas principais propriedades (ver figura 3). Certas regularidades começavam a ser observadas e a partícula sigma neutra foi então prevista como consequência disto. A

NOME	SÍMBOLO	CARGA	MASSA	SPIN	ESTATÍSTICA	VIDA-MÉDIA (SEGUNDOS)	ESQUEMA DE DECAIMENTO
FÓTON	$\gamma$	0	0	1	BOSE-EINSTEIN	ESTÁVEL	
GRAVITON	G	0	0	2	BOSE-EINSTEIN	ESTÁVEL	
NEUTRINO	$\nu$	0	0	$\frac{1}{2}$	FERMI-DIRAC	ESTÁVEL	
ELÉTRON	e	-	1	$\frac{1}{2}$	FERMI-DIRAC	ESTÁVEL	
PÓSITRON	p	+	1	$\frac{1}{2}$	FERMI-DIRAC	ESTÁVEL	
MÉSON MU POSITIVO	$\mu^+$	+	210	$\frac{1}{2}$	FERMI-DIRAC	$2.1 \times 10^{-6}$	$\mu^+ \rightarrow p + 2\nu$
MÉSON MU NEGATIVO	$\mu^-$	-	210	$\frac{1}{2}$	FERMI-DIRAC	$2.1 \times 10^{-6}$	$\mu^- \rightarrow e + 2\nu$
MÉSON PI NEUTRO	$\pi^0$	0	265	0	BOSE-EINSTEIN	$10^{-15}$	$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
MÉSON PI POSITIVO	$\pi^+$	+	276	0	BOSE-EINSTEIN	$2.6 \times 10^{-8}$	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
MÉSON PI NEGATIVO	$\pi^-$	-	276	0	BOSE-EINSTEIN	$2.6 \times 10^{-8}$	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$
MÉSON ZETA	$\zeta$	$\pm$	550	?	?	$10^{-12}$	$\zeta \rightarrow \pi + ?$
PARTÍCULA V NEUTRA	$V^0$	0	850	?	?	$10^{-10}$	$V^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
MÉSON TAU	$\tau$	$\pm$	975	?	BOSE-EINSTEIN	$10^{-8}$	$\tau \rightarrow 3\pi$
MÉSON KAPPA	$\kappa$	$\pm$	1100	?	?	?	$\kappa \rightarrow \mu + ?$
MÉSON CHI POSITIVO	$\chi^+$	+	1400	?	?	$10^{-9}$	$\chi^+ \rightarrow \pi^+ + ?$
MÉSON CHI NEGATIVO	$\chi^-$	-	1400	?	?	$10^{-9}$	$\chi^- \rightarrow \pi^- + ?$
PRÓTON	P	+	1836	$\frac{1}{2}$	FERMI-DIRAC	ESTÁVEL	
NEÚTRON	N	0	1838.5	$\frac{1}{2}$	FERMI-DIRAC	750	$N \rightarrow P + e + \nu$
PARTÍCULA V NEUTRA	$V_1^0$	0	2190	?	FERMI-DIRAC	$3 \times 10^{-10}$	$V_1^0 \rightarrow P + \pi^-$
PARTÍCULA V POSITIVA	$V^+$	+	2200	?	?	$10^{-9}$	$V^+ \rightarrow P + ?$

Figura 3. Uma tabela contendo as informações conhecidas a respeito das partículas já identificadas (publicada em 1953 num artigo de F. Dyson)<sup>1)</sup>. Note que não há nenhum agrupamento de partículas por propriedades semelhantes, havendo apenas uma ordenação na massa. Além disto contém muitas dúvidas e imprecisões.



descoberta das partículas estranhas permitiu (e obrigou) um novo tipo de raciocínio; o de quantidades conservadas nos decaimentos. Isto se deve ao fato de que este conjunto de partículas sempre apareciam aos pares. O prolongamento das trajetórias formavam sempre um V nas câmaras de nuvens. Por isso chegaram a ser chamados de partículas V por alguns físicos. Os eventos envolvendo estas partículas foram cuidadosamente estudados. Notou-se que as partículas  $\Lambda^0$  e  $\Sigma^+$  sempre decaíam em prótons, nêutrons e pions, mas o produto final sempre continha o próton. As partículas estranhas eram, portanto, criadas em processos envolvendo interações fortes e decaíam em partículas fortemente interagentes. Sendo assim, deveriam interagir via força forte e se comportar como tal. Ocorre que estas decaíam em tempos da ordem de  $10^{-8}$  a  $10^{-10}$  segundos. Ou seja, viviam muitas ordens de grandeza além do que os esperados  $10^{-23}$  segundos, característicos das interações fortes. Notou-se também que os processos inversos dos decaimentos individuais não ocorriam. Assim, estas partículas eram criadas em processos fortes, sempre aos pares, decaíam em partículas fortemente interagentes, porém em tempos não característicos destas interações, mas sim das interações fracas. Além disto, não permitiam ser criadas em processos inversos aos quais decaíam, por processos fortes. Por isso foram chamadas de estranhas.

## 2.8. O Isospin

Um conceito que mostrou extrema utilidade para a sistematização do conhecimento obtido ao longo dos anos, e que acabou desempenhando um papel fundamental, é o conceito de "isospin" ou "spin isotópico", como foi inicialmente denominado. Foi observado que as forças entre as partículas do núcleo atômico eram independentes da carga elétrica, ou seja, a força existente entre dois prótons, dois nêutrons ou um próton e um nêutron são iguais, no que diz respeito à força nuclear. O estudo dos chamados núcleos "espelhos", que são núcleos com igual número de partículas constituintes, porém com o número de prótons e nêutrons trocados, apontava nesta direção. Os prótons e os nêutrons pareciam se comportar como idênticos perante a força forte. Isto levou Heisenberg a desenvolver um formalismo, dentro do qual o próton e o nêutron eram encarados como idênticos, completamente análogo àquele de spin para o elétron. O elétron, uma partícula de spin  $\frac{1}{2}$  pode orientar seu momento magnético paralelamente ou antiparalelamente a uma certa direção do espaço, um certo eixo z, tendo projeções  $+\frac{1}{2}$  e  $-\frac{1}{2}$ , respectivamente. Como conseqüência disto, o elétron quando colocado na presença de um campo magnético pode aparecer em duas "variedades": "up" e "down" (projeções  $+\frac{1}{2}$  e  $-\frac{1}{2}$  na direção do campo). Entretanto, quando não estiver na presença deste campo, as duas variedades tornam-se indistinguíveis. O formalismo de isospin é completamente análogo. O próton e o nêutron são variedades diferentes de uma mesma partícula: o nucleon. Este possui isospin  $\frac{1}{2}$  com duas projeções possíveis:  $+\frac{1}{2}$ , correspondente ao próton, e  $-\frac{1}{2}$ , correspondente ao nêutron. Este espaço hipotético de isospin, entretanto,











	PARTÍCULA
	<b>XI</b>
	<b>SIGMA</b>
	<b>LAMBDA</b>
	<b>NUCLEON (PROTON, NEUTRON)</b>
	<b>KAON</b>
	<b>PION</b>
	<b>MUON</b>
	<b>ELETRON</b>
	<b>NEUTRINO</b>
	<b>FÓTON</b>

Figura 4. Ilustração das partículas conhecidas até 1957<sup>2)</sup>. A organização já obedece a alguns critérios: multipletos de isospin, partículas e antipartículas. As partículas que não participam de interação forte aparecem separadas das demais.

nada tem a ver com o espaço tridimensional real, tendo apenas existência matemática consistente. As projeções "up" e "down" do nucleon são completamente idênticas do ponto de vista das interações fortes. Quando na presença de um campo eletromagnético, devido a possuírem cargas elétricas diferentes, se diferenciam. Com a teoria de Yukawa a respeito das forças nucleares, introduzindo os pions, Nicholas Kemmer argumentou que se a interação não distingua prótons e nêutrons, não deveria distinguir também os pions quanto a suas cargas. Os pions deveriam ser, portanto, idênticos quanto a interação forte. Sendo assim, deveria corresponder a um isospin 1. As

projeções +1, 0 e -1 têm correspondentes cargas elétricas. Desta forma o pión e o nucleon fazem parte de dois "multipletos" de isospin. O nucleon, um "dubleto" e o pión, um "triplete". Os centros de cargas dos multipletos estão em  $+\frac{1}{2}$  e zero, respectivamente.

Com o surgimento das partículas estranhas, fortemente interagentes, passou-se a questionar se estas partículas também podiam ser tratadas como multipletos de isospin, ou seja, se o isospin era uma simetria aplicável a todas as partículas fortemente interagentes. O tempo mostrou que este é o caso. As partículas então passaram a ser organizadas em multipletos (figura 4).

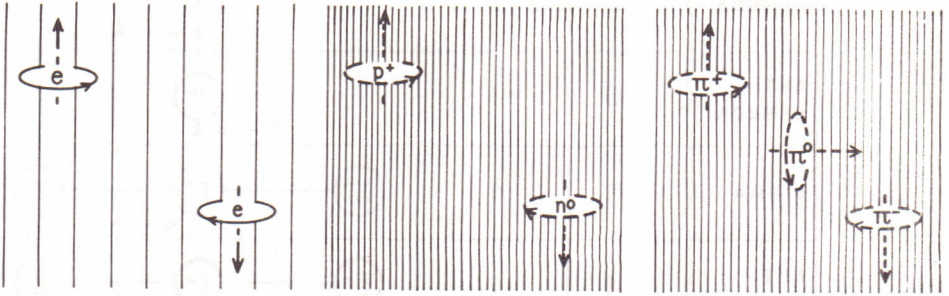


Figura 5. Ilustração do conceito de isospin em analogia àquele do spin. As partículas do multiplo são idênticas na ausência do campo eletromagnético. do ponto de vista das interações fortes comportam-se como uma partícula caracterizada por um certo valor do isospin cada uma das variedades de carga sendo uma das "projeções z" do isospin.

### 2.9. A Estranheza

A disposição das partículas em multipletos de isospin permitiu a observação de um conceito igualmente importante: o de estranheza. Ocorre que quando os centros de cargas dos multipletos são considerados em relação aos multipletos do pión e do nucleon, é possível definir uma nova propriedade fundamental, um novo número quântico: a estranheza. Desta maneira separavam-se as partículas fortemente interagentes em dois grupos: um deles tendo a estranheza definida em relação ao nucleon, outro em relação ao pión. Como tal, a partícula estranha  $\Lambda^0$  aparece sozinha num multiplo (um singlete) e tem, portanto, isospin zero. O centro de cargas correspondente é a carga zero. Sua estranheza deve ser definida em relação ao nucleon, como sendo -1 (duas vezes o deslocamento  $-\frac{1}{2}$  em relação ao centro de cargas do multiplo, em relação ao nucleon). Quanto à partícula sigma, de isospin 1, seu centro de cargas está também em zero. Deve ter, portanto, estranheza -1. Já a partícula cascata ( $\chi$ ), tem isospin  $\frac{1}{2}$ , aparece nas variedades negativa e neutra, tendo centro de cargas em  $-\frac{1}{2}$ . O deslocamento é, portanto, -1 e a estranheza atribuída deve ser -2. A estranheza correspondente a uma antipartícula é sempre oposta.



PARTICULA	ISOSPIN	ESTRANHEZA	CARGA				
			-1	-1/2	0	+1/2	+1
NUCLEON	1/2	0			$n^0$		$p^+$
ANTI-NUCLEON	1/2	0	$\bar{p}^-$		$\bar{n}^0$		
LAMBDA	0	-1			$\Lambda^0$		
ANTI-LAMBDA	0	+1			$\bar{\Lambda}^0$		
SIGMA	1	-1	$\Sigma^-$		$\Sigma^0$		$\Sigma^+$
ANTI-SIGMA	1	+1	$\bar{\Sigma}^-$		$\bar{\Sigma}^0$		$\bar{\Sigma}^+$
XI	1/2	-2	$\Xi^-$		$\Xi^0$		
ANTI-XI	1/2	+2			$\bar{\Xi}^0$		$\bar{\Xi}^+$
PION	1	0	$\pi^-$		$\pi^0$		$\pi^+$
KAON	1/2	+1			$K_1^0$ $K_2^0$ } $K^0$		$K^+$
ANTI-KAON	1/2	-1	$\bar{K}^-$		$\bar{K}^0$ } $K_1^0$ $K_2^0$		

Figura 6. A organização das partículas fortemente interagentes, em multipletos de isospin, permite a introdução do conceito de estranheza<sup>2)</sup>. Note a definição da estranheza do kaon em relação ao pion. As outras partículas têm sua estranheza definida em relação ao nêutron.

## 2.10. O Kaon

O sucesso inicial mais importante da introdução da estranheza, como uma propriedade fundamental das partículas foi a explicação das intrigantes propriedades do kaon. O kaon aparece nas variedades positiva, negativa e neutra. À primeira vista deveria constituir um tripleto, como o pión. Entretanto, as propriedades do kaon neutro indicavam dois tipos de comportamento. Parecia haver duas variedades de kaon neutro. Dentro da hipótese da estranheza, isto se deve ao fato de um dos kaons neutros ser a antipartícula do outro, com estranhezas correspondentes opostas. Ao invés do tripleto o kaon forma um dubleto com o correspondente dubleto de antikaons. Tem isospin  $\frac{1}{2}$ , centro de carga em  $+\frac{1}{2}$  e, portanto, estranheza +1 (relativo ao centro de cargas do multiplete do pión). Os dois kaons neutros são, portanto, criados em situações diferentes, mas uma vez criados transformam-se em dois tipos de kaons;  $K_1^0$  e  $K_2^0$ . Ambos decaem, porém, em tempos característicos diferentes. Em outras palavras, quando um processo de criação é compatível com o valor +1 da estranheza é criado o  $K^0$ , quando o valor for -1, o  $\bar{K}^0$  é criado (antikaon). Entretanto, se uma certa quantidade de kaons é criada, de qualquer um dos dois, metade destes se comportam como  $K_1^0$  e a outra metade com  $K_2^0$ , independentemente do processo de criação. Pode-se verificar isto porque o estudo do decaimento de uma certa quantidade de kaons revela que esta amostra se comporta como uma mistura de dois tipos de partículas, cada uma decaindo com seu tempo característico (vida-média).

## 2.11. Outras Partículas: As Ressonâncias

Com o aperfeiçoamento das técnicas experimentais e a entrada em funcionamento dos aceleradores de partículas, tornou-se possível a identificação de um vasto conjunto de novas partículas fortemente interagentes. Em 1952 foram feitos experimentos de espalhamento pión-próton. Neste tipo de experimentos os píons são acelerados e "atirados" sobre os prótons em repouso. Observa-se, após o choque, o comportamento das partículas. O que é medido é a "seção de choque", que é basicamente a probabilidade de o espalhamento ocorrer de uma certa forma (mudança de trajetória do pión...). Assim, a seção de choque é uma medida da maneira e da intensidade com que as partículas interagem. Para cada energia "efetiva" do sistema pión-próton (que é basicamente a soma das energias de repouso do próton e do pión mais a energia cinética do pión em relação ao próton) é feito um experimento. Quando esta quantidade é colocada num gráfico contra a seção de choque, observa-se "picos" para algumas energias efetivas, ou espécies de ressonância no espalhamento. Cada ressonância possui certas quantidades bem definidas, tais como: momento angular, paridade, energia (massa)... Elas não deixam evidências diretas nos detectores, uma vez, que devido a terem vidas médias da ordem de  $10^{-23}$  segundos, somente conseguem andar uma distância da ordem do seu próprio tamanho. Elas, entretanto, do ponto de vista das interações fortes devem ser consideradas como entidades com o "status" de partículas, visto que são bem caracterizadas. Este tipo de experimento nos

Partícula	Spin	Massa de Repouso	Vida Média (segundos)	Esquemas de Decaimentos	
XI	$\xi^-$	$\frac{1}{2}$	2585	$10^{-10}$ to $10^{-9}$	$\Lambda^0 + \pi^-$
	$\xi^0$	$\frac{1}{2}$	não encontrado		
SIGMA	$\Sigma^+$	$\frac{1}{2}$	2325	$.7 \times 10^{-10}$	$p + \pi^0$ $n + \pi^+$
	$\Sigma^-$	$\frac{1}{2}$	2341	$1.5 \times 10^{-10}$	$n + \pi^-$
	$\Sigma^0$	$\frac{1}{2}$	2324	não medido	$\Lambda^0 + \gamma$
LAMBDA	$\Lambda^0$	$\frac{1}{2}$	2182	$2.7 \times 10^{-10}$	$p + \pi^-$ $n + \pi^0$
PRÓTON	p	$\frac{1}{2}$	1836.1	estável	
NÊUTRON	n	$\frac{1}{2}$	1838.6	em torno de 1.000	$p + e^- + \bar{\nu}$
MÉSON K	$K^+$	0	966.5	$1.2 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$ $\pi^+ + \pi^0$ $\pi^+ + \pi^+ + \pi^-$ $\pi^+ + \pi^0 + \pi^0$ $\mu^+ + \nu + \pi^0$ $e^+ + \nu + \pi^0$
	$K^-$	0	966.5	$1.2 \times 10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}$ $\pi^- + \pi^0$ $\pi^- + \pi^- + \pi^+$ $\pi^- + \pi^0 + \pi^0$ $\mu^- + \bar{\nu} + \pi^0$ $e^- + \bar{\nu} + \pi^0$
	$K_1^0$	0	965	$1 \times 10^{-10}$	$\pi^+ + \pi^-$ $\pi^0 + \pi^0$
	$K_2^0$	0	965	$3 \times 10^{-8}$ to $10^{-6}$	$\pi^+ + e^- + \bar{\nu}$ $\pi^- + e^+ + \nu$ $\pi^+ + \mu^- + \bar{\nu}$ $\pi^- + \mu^+ + \nu$ $\pi^+ + \pi^- + \pi^0$ $\pi^0 + \pi^0 + \pi^0$
PÍON	$\pi^+$	0	273.2	$2.6 \times 10^{-8}$	$\mu^+ + \nu$
	$\pi^-$	0	273.2	$2.6 \times 10^{-8}$	$\mu^- + \bar{\nu}$
	$\pi^0$	0	264.2	$10^{-16}$ to $10^{-15}$	$\gamma + \gamma$
MUON	$\mu^-$	$\frac{1}{2}$	206.7	$2.2 \times 10^{-4}$	$e^+ + \nu + \bar{\nu}$
ELÉTRON	$e^-$	$\frac{1}{2}$	1	estável	
NEUTRINO	$\nu$	$\frac{1}{2}$	0	estável	
FÓTON	$\gamma$	1	0	estável	

Figura 7. Uma tabela de propriedade das partículas de 1957<sup>23</sup>). A organização separa as partículas em quatro grupos: pela estatística (spin) e pelo tipo de interações que participam. A partícula  $\xi^0$  aparece como parte de uma simetria prevista mas, até então, não encontrada.

revelou a existência de uma quantidade enorme de partículas fortemente interagentes, que ainda não tinham sido observadas até então. Isto se deve ao fato de que as observações limitavam-se a processos disponíveis na natureza, através dos raios cósmicos, e cuja vida média fosse suficientemente longa para que deixassem evidências diretas em algum aparato experimental. O uso de aceleradores, e os experimentos de espalhamento, permitiram o estudo de fenômenos ocorrendo em energias e situações não disponíveis nos processos "naturais". Outros experimentos foram feitos com partículas, indicando a



presença de uma infinidade de outras. O conhecimento destas informações permitiu uma melhor sistematização das propriedades fundamentais das partículas, e como conseqüência, a observação de simetrias, fato até então não permitido pela natureza. A organização deste conhecimento, apropriadamente, foi que permitiu, pouco a pouco, a descoberta de segredos inimagináveis.

### 3. SIMETRIAS E LEIS DE CONSERVAÇÃO

O crescente acúmulo de informações a respeito das partículas elementares permitiu que fossem organizados esquemas cada vez mais elucidativos no que diz respeito às propriedades e às relações existentes entre elas. Foi observado que certas características quantitativas atribuídas às partículas eram mantidas balanceadas durante os decaimentos ou reações que ocorriam. Estas observações caracterizavam certas simetrias existentes na natureza e estas, por sua vez, indicam a presença de leis de conservação. Algumas destas leis são obedecidas por todas as interações; outras são às vezes violadas. No que diz respeito às interações fortes, existem algumas quantidades importantes que se revelaram úteis e convenientes para o estudo das propriedades fundamentais destas entidades. Elas estabelecem vínculos, ao que qualquer teoria deve se mostrar compatível.

#### 3.1. A Carga Elétrica Q

A carga elétrica é uma importante característica de uma partícula. Ela aparece em quantidades positivas, negativas ou nula, mas sempre múltiplos inteiros de uma quantidade básica: a carga do elétron. A conservação da carga elétrica é observada em todos os processos. Ela se dá aditivamente, ou seja, a conservação implica que a soma algébrica das cargas antes de um processo deve ser igual a mesma soma depois.

#### 3.2. O Número Bariônico B

A observação de que um certo conjunto de partículas fortemente interagentes, decaía de diferentes maneiras, mas produziam sempre como produto final um próton, levou à denominação destes com bárions. Foi atribuído a estas partículas uma quantidade chamada "número bariônico". Ao próton foi dado o valor +1 (ao antipróton -1) e aos outros bárions um número relativo a este. Este número mostrou-se sempre conservado e é responsável pela estabilidade do próton, que não decai porque é o bárion de menor massa. Como não pode "consumir" o número bariônico, permanece estável. A conservação deste número é igualmente aditiva. O número bariônico é uma propriedade exclusiva dos bárions, e serve para distingui-los dos mésons que não possuem esta característica. Os bárions e os mésons são genericamente denominados de hádrons, as partículas fortemente interagentes.

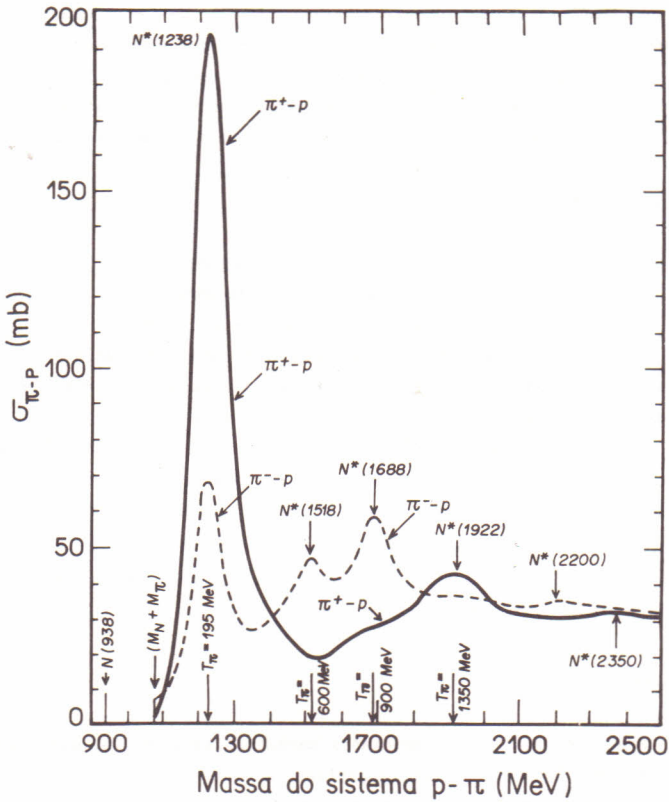


Figura 8. Um gráfico da seção de choque total para os espalhamentos  $\pi^+p$  e  $\pi^-p$ . Os picos indicam a existência de outras partículas fortemente interagentes:  $N^*$  e  $\Delta$ , de isospins  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{2}$ , respectivamente

### 3.3. O Momento Angular $J$

As partículas possuem um momento angular intrínseco ou spin. Esta quantidade é quantizada e pode aparecer em múltiplos inteiros ou semi-inteiros de uma quantidade fundamental. Este momento angular pode ser imaginado como sendo uma medida de como elas giram em torno de si mesmas. Notou-se que para os bárions (férmions) esta quantidade aparece em múltiplos semi-inteiros:  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,  $\frac{5}{2}$ , .... Já para os mésons (bósons) ela aparece em quantidades inteiras. A conservação desta quantidade ocorre de um modo um pouco diferente das quantidades habituais. A conservação obriga que o momento angular final seja um número (inteiro ou semi-inteiro) entre o módulo da diferença e o módulo da soma dos momentos angulares iniciais ("somados" desta forma dois a dois).

### 3.4. A Paridade Intrínseca P

Os processos envolvendo interações fortes foram observados como não distinguindo esquerda e direita, ou seja um processo e sua imagem espectral são idênticos. A simetria associada a esta invariância por reflexão está associada a uma lei de conservação denominada conservação da paridade. A mecânica quântica nos manda atribuir os valores  $\pm 1$  para a paridade intrínseca de uma partícula. O número quântico paridade é um número multiplicativo. A conservação desta quantidade é feita considerando as paridades de todas as partículas que participam do processo, multiplicando-os antes e depois e então comparando-os. A paridade dos bárions é atribuída relativa ao próton, ao qual é atribuído o valor  $+1$  (positiva). Os píons têm paridade absoluta e negativa. Existe uma relação muito próxima entre a paridade e o momento angular, da qual decorre que quando há uma mudança de momentos angulares num processo, há uma correspondente contribuição no balanço de paridade, além daquele devido às paridades intrínsecas das partículas.

### 3.5. O Isospin I

Nós já mencionamos o isospin. O formalismo de isospin é totalmente análogo àquele do momento angular. Por isso, a conservação do isospin se dá de maneira idêntica. Assim, identificando os isospins de cada uma das partículas que participam do processo, a conservação do isospin total, implica que o processo somente ocorre quando o isospin final for um número contido entre o módulo da diferença e da soma dos iniciais. Por exemplo, no mecanismo de Yukawa das forças nucleares. O nucleon tem isospin  $\frac{1}{2}$ , o pión isospin 1. Como pode então o nucleon absorver o pión e conservar o isospin? O módulo da diferença é  $|\frac{1}{2} - 1| = \frac{1}{2}$ ; a soma é  $\frac{3}{2}$ . Portanto, os valores permitidos são os valores  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{2}$ . Sendo o nucleon de isospin  $\frac{1}{2}$ , é possível a absorção (ou emissão) de um pión por um nucleon. O conceito de isospin se aplica somente às interações fortes.

### 3.6. A Hiper carga Y

O conceito de hiper carga é um conceito importante na organização dos múltiplos. Ela acomoda o conceito de estranheza e a conservação deste número quântico. Nós definimos a conservação de hiper carga como sendo a soma do número bariônico mais a estranheza. Alternativamente, duas vezes a subtração da carga elétrica pela componente z do isospin da partícula. Esta quantidade se conserva nas interações fortes. Entretanto, devido ao fato de a estranheza não se conservar fora destas, este é um conceito que se aplica somente a estas interações.

### 3.7. A Paridade G



Este conceito é um atributo exclusivo dos mésons de hipercarga zero (não estranhos) e está associado a propriedades de invariância sob certas transformações no espaço de isospin. A conservação é multiplicativa e estabelece, por exemplo, certas restrições no número de pions que podem aparecer no estado final de processos fortes. A paridade G do pion é  $-1$ .

### 3.8. Energia e Momento Linear

As quantidades conservadas governam todos os processos envolvendo as partículas. Basta que um deles seja violado para sabermos que ele não ocorre. Eles podem ser utilizados para fazer previsões a respeito de processos ainda não observados. Além destas quantidades é exigido que a conservação da energia e do momento linear sejam igualmente satisfeitos. Isto faz com que processos que respeitem todas as leis de conservação necessitem de um balanceamento energético favorável para que ocorram. Uma manifestação imediata disto é a relação entre as massas dos estados inicial e final. Uma partícula não pode decair, por exemplo, em duas outras cuja soma das massas seja superior à desta. Estas quantidades discutidas aqui servem para "rotular" as partículas e organizá-las de modo a permitir observações mais abrangentes e precisas a respeito dos "parentescos" existentes entre elas. Assim nas tabelas de propriedades, aparecem todas estas informações; massa, isospin, carga, hipercarga, spin, paridade... Estes "vínculos" estabelecidos pela natureza nas relações entre as partículas devem ser encarados como enigmas a serem decifrados num nível mais fundamental do que simplesmente descritivo.

### 3.9. Supermultipletos

A organização das partículas quanto a propriedades comuns ou relacionadas, nos permite a identificação de famílias ainda maiores que aquelas dos multipletos de isospin. E é desta organização e da identificação destes supermultipletos que emerge a indicação definitiva de que as nossas entidades até aqui referidas como elementares parecem perder este "status". Quando nós organizamos as diferentes "espécies" em disposições de spin e paridade comuns, nós notamos que surgem simetrias verdadeiramente fantásticas, se nós soubermos retirar as informações relevantes aos atributos da interação forte. Dentro do conjunto de partículas agrupadas deste modo, nós observamos que existem diferenças de massa pequenas dentro de cada multipletto de isospin. Também entre multipletos de isospins diferentes (diferentes hipercargas) mas que é também pequena. Além disto existem certas regularidades entre estas diferenças de massas o que nos permite atribuir estas diferenças a outras causas que não o aspecto hadrônico das partículas (eletromagnéticas, por exemplo). Quando isto é feito nós observamos que todas as partículas se agrupam em supermultipletos com números bem definidos de integrantes, que diferem em hipercarga e projeção z do isospin. Cada uma das partículas do

supermultiplete pode ser encarada como uma entidade caracterizada por um valor de hipercarga e um valor da projeção  $z$  do isospin. Uma destas entidades pode ser obtida a partir de qualquer outra por transformações no plano  $Y, T_z$ . Mas as transformações são tais que somente relacionam as partículas (ou entidades) dentro do mesmo supermultiplete. Este tipo de situação é bastante conhecida nos mecanismos matemáticos chamados "teoria de grupos". Esta situação, embora um pouco mais complexa, é análoga àquela encontrada no tratamento quântico do momento angular. Cada valor do momento angular  $L$  permite  $2L+1$  projeções  $z$  deste vetor. Todas as projeções são "estados" permitidos e fazem parte do mesmo objeto caracterizado pelo valor de  $L$ , um multiplete. Existem transformações que associam as diferentes projeções  $z$  do momento angular  $L$ . Tais operações são análogas àquelas que encontramos nas propriedades das partículas. No momento angular (e conseqüentemente no isospin), o grupo de operações matemáticas definidas é denominado  $SU(2)$ . As "representações irredutíveis" do grupo são caracterizadas pelo valor de  $L$ . Aqui as representações irredutíveis são mais complicadas pois são caracterizadas pelos

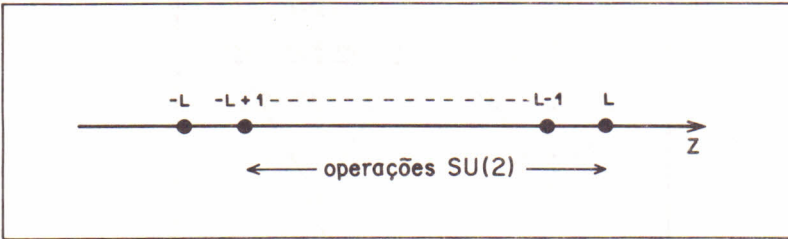


Figura 9a. Operações  $SU(2)$ . Cada ponto no eixo, que indica a projeção  $z$  do momento angular (ou do isospin), representa um elemento da representação irredutível caracterizada pelo valor de  $L$ . Operações do grupo  $SU(2)$  relacionam todos os  $2L+1$  elementos do multiplete.

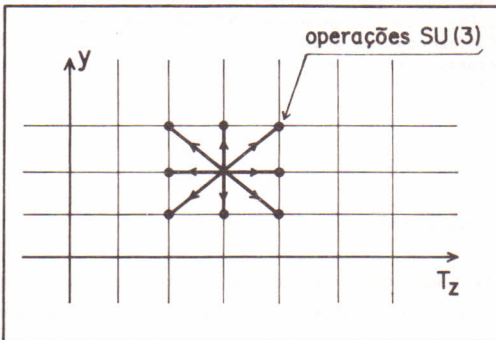


Figura 9b. Operações  $SU(3)$ . Cada ponto no plano  $Y, T_z$  representa um elemento de uma representação irredutível do grupo  $SU(3)$ . Operações relacionam todos os pontos que formam um supermultiplete. Cada supermultiplete possui um número bem definido de pontos neste diagrama (número de elementos do supermultiplete).

valores de dois números: a hipercarga e o isospin. O grupo que trata destas relações é o grupo SU(3), uma extensão do SU(2). Mas o que nos importa é a conclusão que isto nos permite extrair daqui. A identificação dos supermultipletos com as representações irredutíveis do grupo SU(3), nos permite (e nos força) a concluir que estas entidades não são fundamentais. Elas são manifestações da combinação de três elementos básicos, os elementos fundamentais do grupo. Sendo assim, o que nós observamos são as combinações destes "tijolos" básicos e não estes. É necessário então identificar as características destes tijolos, os quais compõem os hádrons e que devem ser as partículas que merecem o atributo elementar.

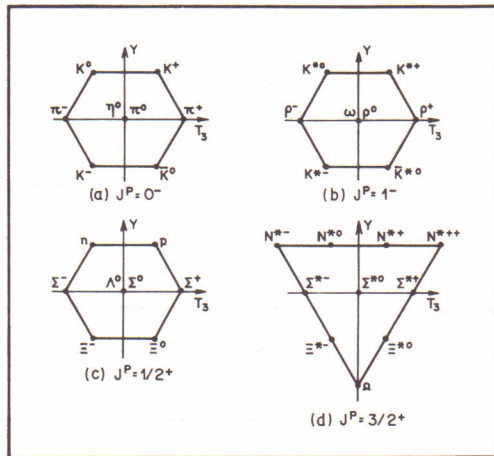


Figura 10. Supermultipletos de hádrons<sup>4)</sup>. Quando organizados por spin e paridade em diagramas  $Y, T_z$ , os hádrons exibem estruturas de supermultipletos que são identificados com as representações irredutíveis do grupo SU(3). Isto sugere que não são elementares pois a representação fundamental do grupo, a partir do qual podem ser construídas as representações irredutíveis por repetidos produtos tensoriais, possui 3 elementos apenas.

## 4. OS QUARKS

### 4.1. Os Três Primeiros Quarks

A possibilidade de organizar as partículas em agrupamentos, os supermultipletos, que correspondem às representações irredutíveis do grupo SU(3), nos leva a inferir as características necessárias aos três elementos básicos a partir dos quais estas representações são construídas. As diferentes combinações devem então ser compatíveis com as características das partículas observadas. A atribuição dos números quânticos apropriados aos "quarks", como são denominados, pode ser feita na base da tentativa e do erro.



O resultado disto é a definição dos quarks u ("up"), d ("down") e s ("strange"), conforme figura 11.

	Carga Q	Isospin T	Componente z $T_z$	Hipercarga Y	Estranheza S	Número Ba- riônico B
u	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
d	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
s	$-\frac{1}{3}$	0	0	$-\frac{2}{3}$	-1	$\frac{1}{3}$

Figura 11. Os números quânticos apropriados aos quarks u, d e s<sup>4)</sup>. Os correspondentes anti-quarks têm números opostos (exceto o isospin total que é o mesmo).

Com estes quarks nós podemos construir os bárions, através das combinações de três quarks: qqq. Os mésons, por sua vez, podem ser construídos pela combinação de um quark com um anti-quark: q $\bar{q}$ . Nós podemos ver que esta escolha é compatível com todas as observações e além disto, nos fornece a possibilidade de prever novos resultados, bem como nos dar informações detalhadas de certos processos conhecidos. Os quarks devem ter, ainda, spin semi-inteiro (fêrmions) para serem compatíveis com o fato de os bárions serem fêrmions e de os mésons serem bósons.

	Carga	Número Bariônico	Estranheza	Partícula
u $\bar{d}$	+ 1	0	0	pion $\pi^+$
d $\bar{u}$	- 1	0	0	pion $\pi^-$
s $\bar{u}$	- 1	0	- 1	kaon $k^-$
u $\bar{s}$	+ 1	0	+ 1	kaon $k^+$
d $\bar{s}$	0	0	+ 1	kaon $k^0$
s $\bar{d}$	0	0	- 1	kaon $\bar{k}_0$

Figura 12a. Alguns mésons construídos pela combinação de um quark e um anti-quark q $\bar{q}$ <sup>5)</sup>.

	Carga	Número Bariônico	Estranheza	Nome da Partícula
uud	+ 1	1	0	próton
udd	0	1	0	nêutron
uds	0	1	- 1	lambda $\Lambda^0$
uss	0	1	- 2	cascata $\Xi^0$

Figura 12b. Alguns bárions construídos pela combinação dos 3 quarks uds; qq $\bar{q}$ <sup>5)</sup>

## 4.2. Os Quarks e o Grupo SU(3)

Uma vez que identificamos os agrupamentos de partículas, em grupos de mesmo spin e paridade, em diagramas  $(Y, T_z)$ , com representações irreduzíveis do grupo SU(3), e que identificamos os três elementos básicos necessários para construir as partículas, estes três objetos, os quarks, passam a constituir a representação básica de três elementos a partir dos quais se constrói todos os hádrons dentro do grupo SU(3). Assim, podemos usar a álgebra do grupo para mostrar que aquelas figuras (os supermultipletos) que encontramos podem ser de fato obtidas a partir dos quarks que adotamos.

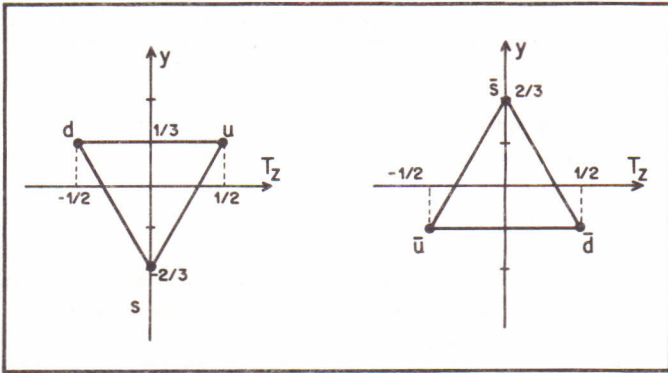


Figura 13. As representações básicas do grupo SU(3) hadrônico<sup>6)</sup>, constituídas pelos quarks  $u, d, s$  e pelos antiquarks  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ .

Para construir representações irreduzíveis a partir das básicas, fazemos "reduções" do "produto tensorial". Isto significa combinar todos os elementos que participam de uma representação que está sendo multiplicada, com todos os elementos da outra, e organizar estas possibilidades em supermultipletos compostos por elementos relacionados entre si. Por exemplo, para construir os mésons, multiplicamos tensorialmente as representações dos quarks com aquela dos antiquarks. Isto pode ser ilustrado graficamente colocando o centro do triângulo  $(u, d, s)$  sobre cada um dos antiquarks  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ . Os pontos que surgem nesta operação são elementos que compõem as representações irreduzíveis contidas neste produto. A figura obtida corresponde ao supermultipletto (octeto)  $0^-$  dos mésons que já havíamos construído na figura 10. Dentro da figura estão os mésons  $\eta^0$  e  $\pi^0$ . Existe um último que não faz parte deste octeto e constitui sozinho um supermultipletto de um elemento (singletto), que é o  $\eta^{\prime 0}$ . Se efetuamos operações semelhantes com o produto de três quarks, ou seja, os bárions, veremos que os supermultipletos que surgem desta operação são: um decupletto, dois octetos e um singletto, como aqueles que construímos para os bárions  $\frac{1}{2}^+$  e  $\frac{3}{2}^+$  na figura

10. Sendo assim, nós confirmamos, pelo menos fenomenologicamente, a hipótese de que os hádrons não são elementares mas sim construções feitas a partir de três elementos fundamentais: os quarks.

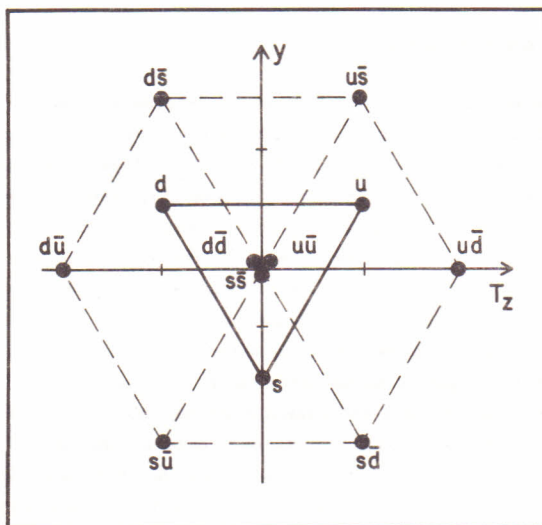


Figura 14. O octeto  $0^-$  dos mésons obtido através da combinação quark-antiquark graficamente.

#### 4.3. Implicações e Resultados do Modelo de Quarks

A hipótese dos quarks consegue colocar ordem no imenso jardim zoológico das partículas. A simplicidade que brota desta idéia é absolutamente incrível. As partículas que são elementares são os quark. Os hádrons são compostos de três quarks (os bárions) e de um par quark antiquark (os mésons). Os quarks apresentam-se em três "sabores": "up", "down" e "strange". Estes possuem cargas fracionárias. Entre os sucessos iniciais do modelo está a explicação da diferença existente entre os kaons neutros. O  $k^0$  ( $d\bar{s}$ ) e o  $\bar{K}^0$  ( $\bar{d}s$ ) são de fato diferentes. Além disto explica o fato de existirem bárions com estranheza  $-2$  mas não existirem tais mésons. Existem também bárions carregados positivamente com estranheza  $-1$  mas isso não ocorre com os mésons. O bárion  $\Omega^-$  ( $sss$ ) com estranheza  $-3$  foi previsto como decorrente do modelo de quarks e foi posteriormente encontrado com a massa prevista pelo modelo. Os quarks tendo spin  $\frac{1}{2}$  levam à existência dos mésons pseudo-escalares ( $J^P = 0^-$ ) e vetoriais ( $J^P = 1^+$ ) e de bárions com  $J^P = \frac{1}{2}^+$  e  $\frac{3}{2}^+$ . Os estados excitados (as ressonâncias de spins mais altos) são previstos pelo modelo consistentemente. Entretanto, os quarks nunca foram observados livres e isto indica que a força que existe entre eles deve gerar uma energia de ligação maior que suas massas. E esta deve ser a verdadeira força forte da



natureza. A força existente entre dois hádrons não passa de uma força efetiva, ou seja, é aquilo que "sobra" do mecanismo de força que existe entre os quarks.

#### 4.4 A Interação entre os Quarks

Os quarks que compõem os hádrons são sistemas ligados. Como tal, têm características comuns a estes sistemas: a força não pode ser atrativa em todas as distâncias entre as partículas, pois isto levaria ao "colapso" do sistema. Além disto deve ter um mínimo na energia, onde a força que atua sobre as partículas é essencialmente nula, ou seja, as partículas em torno desta distância estão livres (ponto de equilíbrio). Quando a distância aumenta, em geral, a força diminui de intensidade de modo a existir uma distância a partir da qual a ligação é quebrada. É neste último ponto que a força que existe entre os quarks se torna diferente das demais. À medida que a distância aumenta, a partir de um certo valor, a força cresce incrivelmente de modo a exigir uma energia extremamente grande que é suficiente para a criação de um par quark-antiquark. Assim, torna-se impossível ionizar os quarks (isto é, retirá-los do confinamento). Eles são, por isso, confinados<sup>7)</sup>. Além disto, o mecanismo de força existente não pode ser semelhante àqueles conhecidos para outras interações. Uma indicação disto vem do princípio de Pauli, que como já dissemos, explica entre outras coisas as estruturas atômica e nuclear. O hádron  $\Omega^-$  possui spin  $\frac{3}{2}$  e é constituído por três quarks estranhos (sss), que têm spin  $\frac{1}{2}$ . De acordo com o princípio de Pauli este sistema não deveria existir já que, no estado fundamental, todos os números quânticos dos componentes (fermiônicos) são idênticos. Deve, portanto, existir um outro grau de liberdade que os torne diferentes. Para explicar isto, foi proposta em 1964 uma nova propriedade chamada "cor" ou "carga de cor". Esta proposta estabelece que os quarks existem em "cores" e "sabores". Cada um dos sabores pode ainda existir em três cores diferentes. Para cada cor existe uma anticor correspondente. Apesar do nome dado, a cor é simplesmente um novo número quântico, nada tendo a ver com o significado cotidiano nosso de cor. Os sistemas ligados são aqueles destituídos de cor com um todo, ou seja, aqueles cuja "mistura" de cores gere o branco. Para conseguir isto existem apenas três combinações possíveis: as três cores diferentes, as três anticores e uma cor com sua anticor. Isto é, portanto, compatível com a existência de hádrons em combinações  $q q q$ ,  $\bar{q} \bar{q} \bar{q}$  e  $q \bar{q}$ . Vários experimentos e cálculos teóricos feitos, mostraram-se compatíveis com a existência de três cores. A existência das cores explica, portanto, as características da força, restando ainda estabelecer o mecanismo da força. Como ocorre a interação entre os quarks? Na visão da teoria quântica de campos, a interação entre duas partículas ocorre via troca de outras partículas trocadas pelos quarks. Para isto foi proposta a existência dos "gluons", que são os bósons mediadores da força de cor. A diferença fundamental existente entre estes e os outros mediadores das forças é que os

gluons podem carregar o tipo de carga da interação que mediam. Por isso podem interagir entre si diretamente. Existem muitas semelhanças estruturais entre a "cromodinâmica quântica", a teoria que trata da força de cor, e a eletrodinâmica quântica, que trata da interação eletromagnética. Entretanto, as diferenças entre elas fazem com que os problemas tornem-se insolúveis matematicamente dentro da cromodinâmica quântica (QCD) apesar de a eletrodinâmica quântica (QED) nos fornecer a melhor descrição teórica que conhecemos. Apesar disto parece não haver dúvida entre os físicos teóricos quanto a veracidade da QCD.

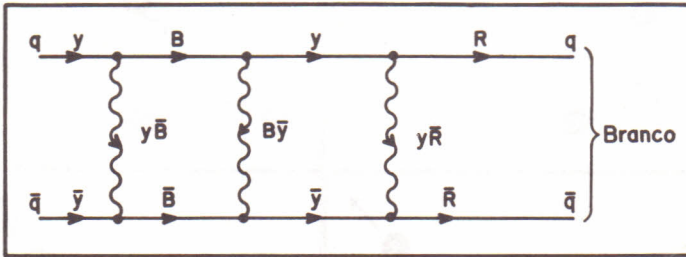


Figura 15a. Ilustração da interação quark-antiquark<sup>6)</sup>, dentro de um méson, através da troca de gluons. Os gluons carregam cores e anticolors em combinações tais que o resultado seja sempre branco (cor-anticor) para o méson. O código de cores adotado é: amarelo, Y, azul, B e vermelho, R. Com suas correspondentes anticolors.

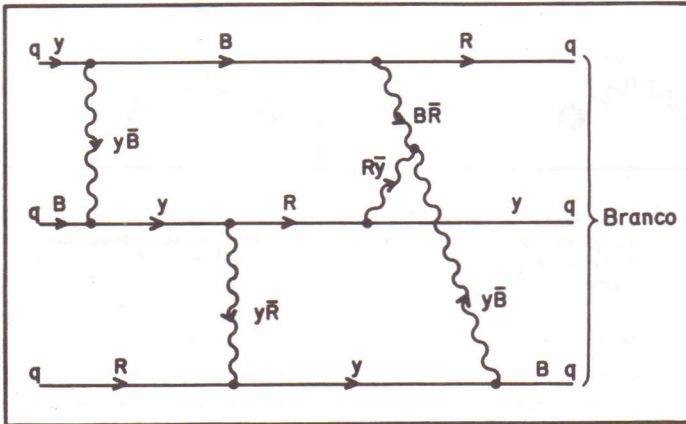


Figura 15b. Ilustração da interação entre 3 quarks<sup>6)</sup>, dentro de um bárion, trocando gluons. Os gluons mediadores da interação entre os quarks, podem interagir entre eles. As trocas são tais que o resultado final é sempre branco (RYB).

#### 4.5. As Interações Fortes e os Quarks

Com o estabelecimento dos quarks como as partículas fundamentais e da força de cor como a força fundamental, todos os processos hadrônicos passam a ser vistos como devido aos quarks e suas interações. Sendo assim, aquilo a que sempre nos referimos como interações fortes, as forças existentes entre os hádrons, perde o "status" de fundamental. As interações hadrônicas, como as forças nucleares, não passam de forças efetivas ou, como já nos referimos antes, é o resultado das "sobras" dos mecanismos de cor entre os quarks. Isto

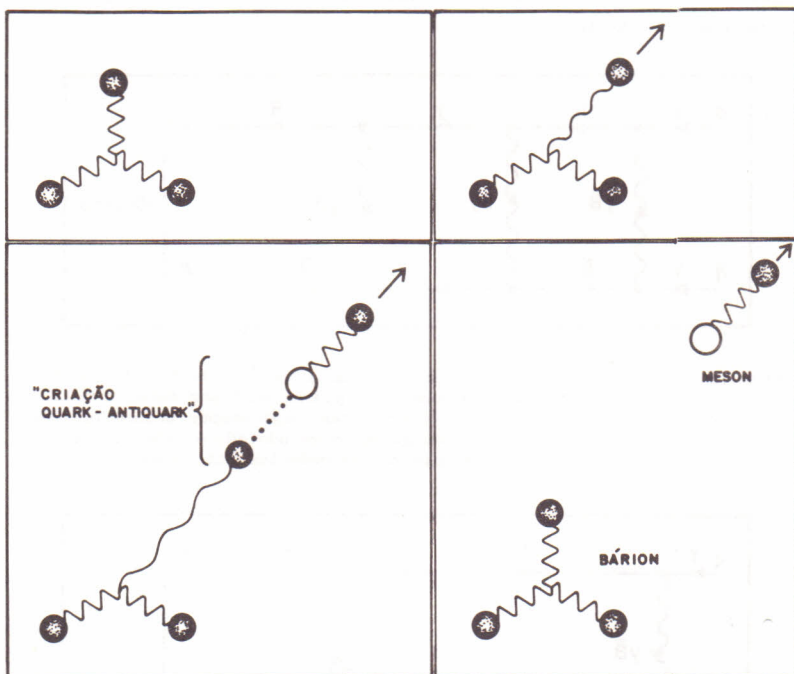


Figura 16. Ilustração da criação de um méson por um bárion<sup>5)</sup>. A intensidade da força de cor gera uma energia de ligação muito grande quando comparada às massas dos quarks o que acaba por confiná-los dentro dos hádrons.

é semelhante ao caso das forças moleculares. As partículas que formam os átomos interagem entre si de tal forma que acabam criando certas assimetrias na distribuição de cargas dos átomos, que são neutros. Estas assimetrias terminam por criar um campo efetivo de forças, o qual permite as ligações moleculares. Ou seja, os átomos participantes não possuem cargas líquidas mas acabam ligados por forças eletromagnéticas. No caso dos hádrons, estes não possuem "cor líquida", pois são "brancos"; entretanto, os mecanismos da força de cor termina por criar forças fortes efetivas. Em processos envolvendo baixas energias (em distâncias não muito pequenas) os graus de liberdade internos dos hádrons são irrelevantes e estes podem ser tratados como



"fundamentais" interagindo entre si via trocas de partículas hadrônicas (mésons propriamente ditos), como é o mecanismo da força nuclear de Yukawa. A não solubilidade da QCD faz com que a física dos hádrons, feita a nível hadrônico, desempenhe um papel importante na física das partículas fortemente interagentes, de onde obtemos nossos resultados experimentais diretos.

## 5. AS PARTÍCULAS E AS INTERAÇÕES FUNDAMENTAIS

O roteiro de discussões que seguimos até aqui nos permitiu estabelecer os quarks como partículas fundamentais e a interação de cor como uma força fundamental, bem como elucidar alguns aspectos importantes das características destas partículas e desta interação. Isto nos permitiu uma simplificação fantástica das discussões a respeito das variedades fenomenológicas das partículas. Resta-nos agora o estabelecimento de um ordenamento compatível com as idéias que brotam da teoria de quarks, para as partículas verdadeiramente elementares e suas possíveis interações.

### 5.1. Os Outros Quarks

Até aqui mencionamos a existência de apenas três dos elementos da família dos quarks. Na verdade os quarks  $u$ ,  $d$  e  $s$  são apenas os elementos mais leves desta família e, portanto, os mais importantes para a fenomenologia de baixas energias. Além destes nós temos evidência de existência de outros três sabores: o "charm"  $c$ , o "top"  $t$  e o "bottom"  $b$ . Observações indiretas indicam que a natureza é compatível com a existência de apenas seis sabores para os quarks. Estes seis quarks são as únicas partículas da natureza a possuírem carga de cor e, portanto, experimentar a força mais forte da natureza, a força de cor. Além disto, os quarks são as únicas partículas a participarem das quatro forças fundamentais da natureza, pois além da força forte, participam da interação fraca, da eletromagnética e da interação gravitacional.

### 5.2. Os Léptons e as Interações Fracas

As interações fracas responsáveis por certos processos como decaimentos radioativos hadrônicos, tal qual o decaimento beta do nêutron, dentro da teoria dos quarks, são vistas como sendo interações diretas entre os léptons e entre os quarks e os léptons. Os léptons são uma família de partículas que não interagem fortemente. Desta família fazem parte: o elétron, o muon, o taon e seus neutrinos respectivos (obviamente cada qual com sua antipartícula). Cada um dos léptons carrega um número quântico conservado nas reações envolvendo estas partículas que é o número leptônico (do elétron, do muon e do taon). As interações fracas são vistas como sendo mediadas pelos bósons intermediários  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ . Os processos de decaimentos fracos hadrônicos ocorrem via a interação entre quarks e léptons mediada pelos bósons

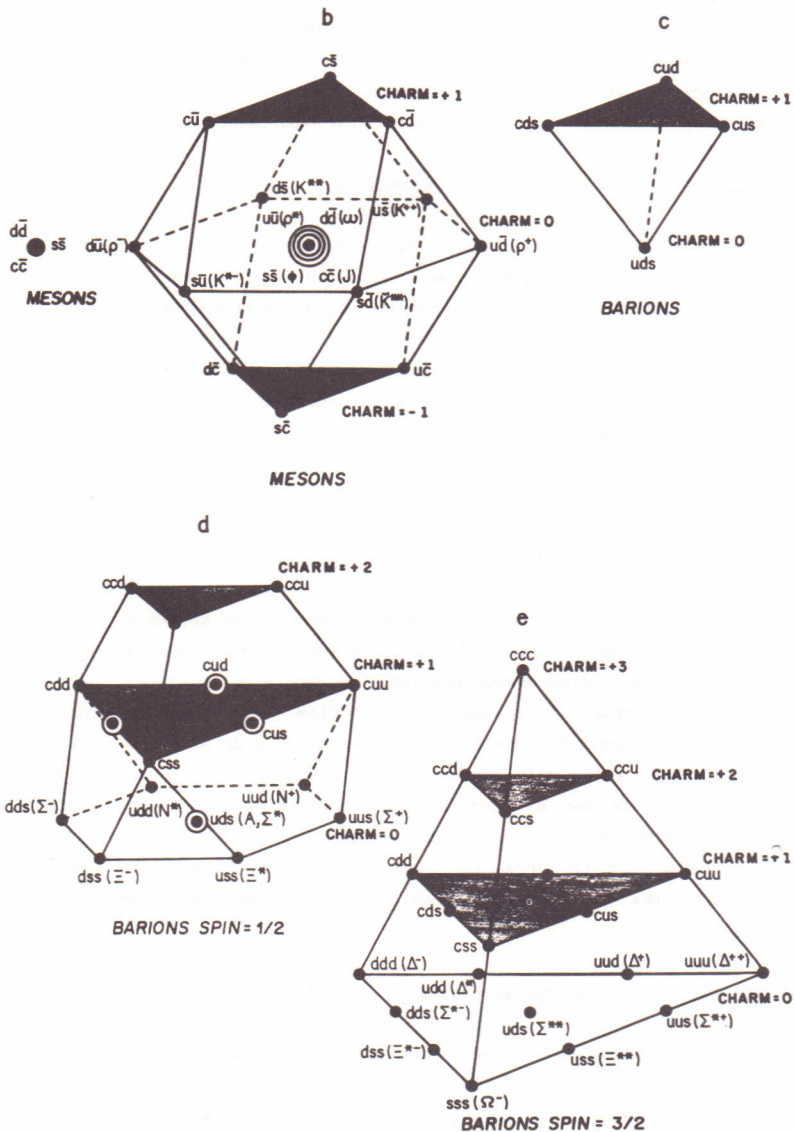


Figura 17. Os supermultipletos de hádrons<sup>5)</sup> com a inclusão do quark "charm" c. De modo semelhante aos supermultipletos SU(3), os poliedros são caracterizados por spin e paridade. Os cortes horizontais correspondentes a charm = 0, são os multipletos SU(3) identificados anteriormente.

$W^\pm$  e  $Z^0$ . A força fraca, como já mencionamos, é de curtíssimo alcance e cerca de  $10^{-5}$  vezes menos intensa que a força forte. Os bósons  $W^\pm$  e  $Z^0$  possuem massas extremamente grandes na escala das partículas.

### 5.3. Os Bósons Intermediários e as Interações Fundamentais

Para completar o ordenamento das partículas fundamentais, basta apenas os bósons intermediários, ou seja, aquelas partículas que mediam as interações entre as partículas. Sendo assim, nós temos o fóton que, como já dissemos, é o mediador das interações eletromagnéticas. O fóton não tem massa nem carga elétrica e possui spin 1. As interações fracas têm os mediadores  $W^{\pm}$  e  $Z^0$ , que são extremamente massivos. Os bósons  $W^{\pm}$  têm massas de aproximadamente 83 GeV. O bóson  $Z^0$ , por sua vez, tem uma massa aproximada de 93 GeV. Todos têm spin 1. As interações eletromagnéticas e as fracas foram recentemente unificadas em um único contexto<sup>8)</sup>. A nova interação é chamada de "eletrofraca". Os gluons são partículas de massa zero, carga elétrica nula e spin 1, e mediam as interações fortes entre os quarks. Finalmente, as interações gravitacionais são mediadas pelos grávitons, que não têm massa e, diferentemente dos outros mediadores, possuem spin 2.

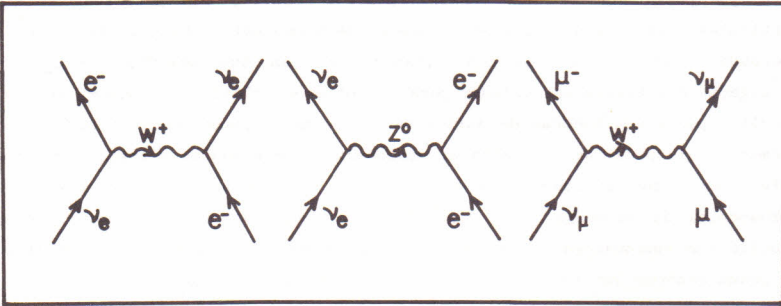


Figura 18. As interações fracas entre léptons trocando os bósons intermediários  $w^{\pm}$  e  $z^0$ .

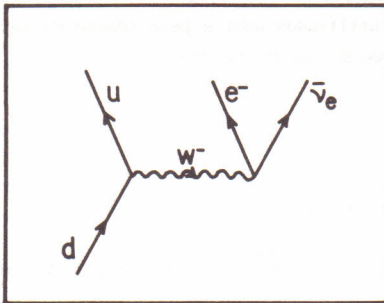


Figura 19. O decaimento fraco do nêutron (decaimento beta). O nêutron (udd) tem um de seus quarks d convertido em um quark u através da interação fraca lépton-quark. O nêutron transforma-se assim num próton (uud).

## 6. COMENTÁRIOS FINAIS

Nós apresentamos aqui, numa discussão amena, as idéias que levaram à concepção atual da estrutura fundamental da natureza, no que diz respeito aos seus constituintes e interações fundamentais. Como esta concepção surgiu a partir do modelo dos quarks, nós estabelecemos como idéia central a construção deste modelo. Nós abordamos o problema das "partículas elementares" hadrônicas num enfoque histórico, tentando reproduzir o caminho de idéias que levavam à conclusão de que estas são constituídas de quarks. Uma vez feito isto, discutimos implicações da implantação desta idéia, e então estabelecemos as características principais da interação entre os quarks. O novo ordenamento surgido, ou a nova estruturação das peças fundamentais de natureza é então abordada. É preciso, entretanto, ressaltar que não nos preocupamos com o caráter quantitativo além daquilo que consideramos relevante para que nos permitisse as conclusões que estávamos interessados. Sendo assim, chamamos a atenção para o fato de que seria aconselhável ao leitor mais interessado consultar tabelas contendo informações numéricas mais completas<sup>9)</sup> para que possa refinar sua sensibilidade a respeito das propriedades das partículas. Esperamos, entretanto, que a idéia central tenha sido eficazmente abordada. As referências que citamos são, em sua maioria, textos de divulgação científica apropriadas para os curiosos iniciantes. Nestes textos, escritos por pesquisadores de mais alta expressão, (quase todos ganhadores do prêmio Nobel) podem ser encontradas discussões interessantes e completas sobre estes temas que abordamos brevemente aqui. O conhecimento da estrutura fundamental da natureza, seus constituintes e interações fazem parte, hoje, daquilo que denominamos conhecimento global e não de conhecimento específico de pesquisadores que se dedicam a estudos nas áreas correlacionadas.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos amigos João Carlos Terassi e Gina pela confecção dos desenhos utilizados aqui e pela edição do texto, respectivamente, ambos da Universidade de São Paulo (USP).

## BIBLIOGRAFIA

1. Freeman J. Dyson  
Scientific American, abril de 1953 (Field Theory).
2. Murray Gell-Mann and E.P. Rosenbaun  
Scientific American, julho de 1957 (Elementary Particles).
3. Geoffrey F. Chew, Murray Gell-Mann and Arthur H. Rosenfeld  
Scientific American, fevereiro de 1964 (Strongly Interacting Particles).
4. Sidney D. Drell  
Scientific American, junho de 1975 (Electron-Positron Annihilation and the New Particles).
5. Sheldon Lee Glashow  
Scientific American, outubro de 1975 (Quarks with Color and Flavor).



- 
6. Yoichiro Nambu  
Scientific American, novembro de 1976 (The Confinement of Quark).
  7. Kenneth A. Jhonson  
Scientific American, julho de 1979 (The Bag Model of Quark Confinement).
  8. Steven Weinberg  
Scientific American, julho de 1974 (Unified Theories of Elementary Particle Interaction).
  9. Review of Particle Properties  
Phys.Lett. E204, (1988) 1-486.

