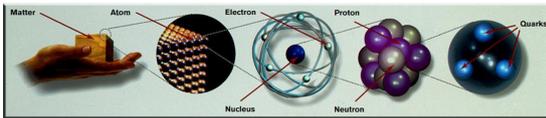


O Modelo Padrão

Marina von Steinkirch
Instituto de Física da USP

O Modelo Padrão é o modelo das interações fundamentais, que descreve três das quatro forças conhecidas, ou seja, a interação eletromagnética, a interação fraca e a interação forte, mas não descreve a quarta interação, a gravitacional. A estrutura base do Modelo Padrão é a teoria quântica da força eletromagnética, que já foi testada e verificada com a precisão de uma parte em um bilhão. Embora alguns aspectos do Modelo Padrão, como a detecção do bóson de Higgs, por exemplo, ainda não tenham sido verificadas, a maioria dos físicos acredita que a estrutura básica do Modelo Padrão descreve corretamente a física subatômica. O Modelo Padrão foi formulado nos anos 70 e estabelecido empiricamente no início dos anos 80. Atualmente, aceleradores como Fermi National Accelerator Laboratory, e em alguns meses, o LHC, devem produzir as partículas que completam o Modelo Padrão ou talvez possam comprovar a teoria do Modelo Padrão de Mínima Supersimetria. Essa teoria é mais amplamente favorecida como substituta do Modelo Padrão. Nesse modelo, todos os tipos de partículas conhecidas possuem uma supercompanheira, relacionada a elas pela supersimetria e surgem evidências indiretas da supersimetria quando se faz a extrapolação das interações para altas energias. No Modelo Padrão, as três forças tornam-se semelhantes, mas não com a mesma intensidade.

I. AS PARTÍCULAS ELEMENTARES



MUITO APRENDIZADO NÃO NOS ENSINA A COMPREENDER.

HERÁCLITO, "O OSCURO", 540AC-480AC

O Modelo Padrão da Física de partículas é uma teoria que descreve as forças fundamentais fortes, fracas, e eletromagnéticas, bem como as partículas fundamentais que fazem toda a matéria. Desenvolvida entre 1970 e 1973, é uma teoria quântica de campos, consistente com a mecânica quântica e a relatividade especial. Há duas partículas fundamentais:

- Os **férmions** são partículas que constituem a matéria, com spin semi-inteiro e que obedecem o princípio de exclusão de Pauli, no qual férmions idênticos não podem compartilhar do mesmo estado quântico. Há doze tipos diferentes de *sabores* dos férmions. Na matéria ordinária do próton, do nêutron, e do elétron, apenas o último é uma partícula fundamental. O próton e o nêutron são agregados de umas partículas menores conhecidas como *quarks*, que são mantidos juntos pela interação forte. Assim, os férmions são:

1. Os Léptons (elétron, múon, tau e seus neutrinos).
2. Os Quarks (up, down, charm, strange, top e bottom).

- Os **bósons** são os transmissores das interações na natureza, possuem o spin inteiro e não obedecem o princípio de exclusão de Pauli. São:

1. Os fótons, que mediam a interação eletromagnética.
2. Os bósons W^+ , W^- e Z , que mediam a interação fraca.
3. Os oito espécies dos glúons, que mediam a interação forte. Seis destes glúons são rotulados como pares de *cores* e de *anti-cores*. Outras duas espécies são uma mistura mais complexa das cores e anti-cores.
4. Os bósons de Higgs, que induzem a quebra espontânea de simetria dos grupos de calibre e são responsáveis pela existência da massa inercial.

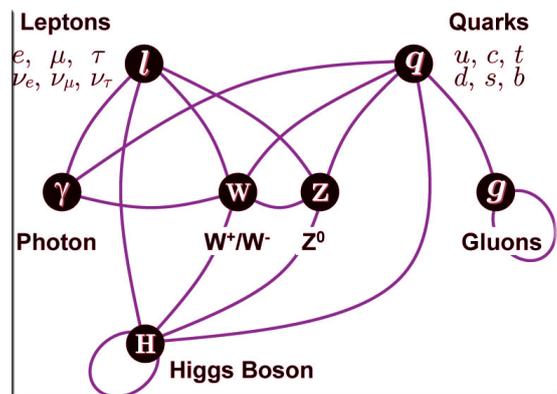


Figura 1: As partículas fermiônicas (matéria) e bosônicas (interações) do modelo Padrão [11].

A. Teorias de Calibre (Gauge)

A teoria da interação eletrofraca (QED) (que descreve as interações fracas e eletromagnéticas) é combinada com

a teoria da cromodinâmica quântica (QCD). Ambas são teorias de calibre, ou seja, a Lagrangiana de cada conjunto de bósons mediadores é invariante sob uma transformação chamada de *transformação de calibre (gauge)*, e esses bósons mediadores são bósons de calibre. As suas transformações de calibre podem ser descritas usando um grupo unitário chamado *grupo de calibre*. O grupo de calibre da interação forte é o $SU(3)$, e o grupo de calibre da interação eletrofraca é o $SU(2) \times U(1)$. Conseqüentemente, o modelo padrão é frequentemente referido como $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. O bóson de Higgs é o único bóson na teoria que não é um bóson de calibre. Os Grávitons, bósons que se acredita mediar a interação gravitacional, não são explicados no modelo padrão.

Para se construir uma teoria de campo, isto é, especificar uma Lagrangeana para levar em conta as simetrias importantes, às vezes pode-se criar dificuldades indesejadas. Consideramos, como exemplo, o caso de dois elétrons separados por uma distância d . Se estes elétrons estão descritos por uma certa função de onda $\psi(x, t)$, então pode-se mudar a fase desta função arbitrariamente, já que não aparecerá nas probabilidades. Mas, se a fase é a mesma em qualquer região onde estão os elétrons, a mudança de fase é feita simultaneamente para as duas partículas, e portanto para dois elétrons separados por d , a informação viajaria com velocidade maior do que a luz. Pode-se, então, resolver a contradição, deixando que as fases mudem localmente, e constrói-se uma dinâmica que contém derivadas da função $\psi(x, t)$, e estas atuarão na fase. Para cancelar termos indesejados, pode-se adicionar à Lagrangeana uma função arbitrária, e esse termo adicional pode ser identificado como o potencial do campo eletromagnético. Assim, resumindo, caso se imponha que a invariância de fase seja local, a teoria "devolve" um potencial que dita a forma pela qual interagem os elétrons. Ou seja, impôr a invariância de calibre (gauge) é impôr que a Lagrangeana descreva a mesma física se for feita uma transformação de fase. Essas teorias de calibre (gauge) têm a vantagem de serem automaticamente isentas de divergências (são renormalizáveis).

B. Férmions - As Partículas de Matéria

Como foi visto no item anterior, os férmions têm a propriedade intrínseca de *spin* $1/2$ e, assim, obedecem o princípio de exclusão de Pauli. Juntamente com suas antipartículas, há 12 diferentes tipos de partículas de matéria (sabores): 6 **quarks** (up, down, strange, charm, top e bottom) e 6 **léptons** (elétron, múon, tau, e seus neutrinos correspondentes). A origem semântica de "*quark*" vem de "Three Quarks for Muster Mark", da obra *Finnegans Wake*, de James Joyce, enquanto *lépton* tem origem grega e significa leve.

Como se pode ver na figura 2, pares de cada grupo formam uma geração (de cima para baixo: primeira geração, segunda geração e terceira geração). Dentro de cada uma dessas gerações, os quatro férmions comportam-se sem-

pre exatamente como seus contrapontos na outra geração, com exceção de suas massas e de seus sabores. Toda a matéria ordinária é feita da primeira geração. As gerações mais altas de partículas decaem rapidamente para a primeira geração e somente podem ser geradas por um curto tempo em experimentos de grande energia.

| LEPTONS | |
|--|---|
| FIRST FAMILY | Elétrons  Neutrino de Elétrons  |
| SECOND FAMILY | Muon  Neutrino do Muon  |
| THIRD FAMILY | Tau (descoberto em 1975)  Neutrino do Tau (não descoberto ainda)  |
| QUARKS | |
| Up  | Down  |
| Charm (descoberto em 1974)  | Strange (descoberto em 1964)  |
| Top  | Bottom  |

Figura 2: As 12 partículas da matéria, os férmions, separados nas três gerações.

Os léptons são partículas de interação fraca e, diferentemente dos quarks, eles não possuem uma qualidade chamada *cor*, e suas interações são somente eletromagnética e fraca, que, por sua vez, diminuem com a distância. A cor entre os quarks faz com que a força entre eles aumente com a distância, de forma que eles sempre são encontrados em combinações neutras chamadas de **hádrons**, fenômeno conhecido como *confinamento*, figura 3. A massa de cada agrupamento de quarks excede a massa de seus componentes devido à energia de ligação.

1. Hádrons e Confinamento

As partículas compostas feitas de quarks e anti-quarks são os **hádrons**. Estes incluem os **mésons**, os quais obtêm os seus números quânticos de um quark e de um anti-quark, e os **bárions**, os quais obtêm os seus números quânticos de três quarks. Com o confinamento é impossível medir as propriedades dos quarks, e, ao invés disso, elas devem ser inferidas pela medição das propriedades das partículas compostas. Tais inferências são mais fáceis de serem feitas adicionando números quânticos chamados

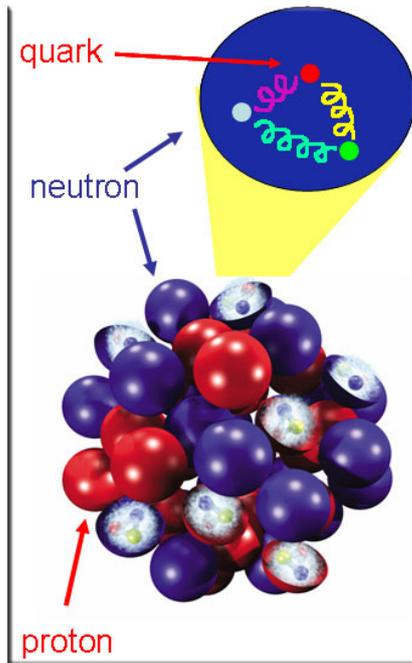


Figura 3: O confinamento hadrônico [10].

de *sabor* (flavor). Cada sabor define um número quântico que será conservado durante a interação forte, mas não na interação fraca.

2. Sabores : Números quânticos

- Número leptônico: $L \rightarrow$ A cada quark é atribuído um numero leptônico nulo $L = 0$.
- Número bariônico: $B \rightarrow$ A cada quark é atribuído um número bariônico, $B = \frac{1}{3}$.
- Carga Elétrica: $Q \rightarrow$ A cada quark é atribuído uma carga elétrica fracionária, $Q = \frac{+2}{3}$ ou $Q = \frac{-1}{3}$.
- Estranhesa: $S \rightarrow$ própria dos quarks estranhos.
- Charme: $C \rightarrow$ própria dos quarks charmosos.
- Isospin fraco: $T_z \rightarrow$ A cada quark é atribuído um isospin fraco: $T_z = \frac{+1}{2}$ para um quark up e $T_z = \frac{-1}{2}$ para um quark down. Cada vez que se dobra o isospin fraco tem-se uma nova geração de quarks.
- E outras: Isospin, Hipercarga Fraca, Hipercarga, Inferioridade, Superioridade.

3. Spin

Desde que os **mésons** (um quark e um anti-quark) são bósons (têm spin inteiro), e **bárions** (três quarks) são férmions (têm spin semi-inteiro), o modelo dos quarks

implica que os quarks são férmions. Além disto, o fato de bárions mais leves terem spin igual a $\frac{1}{2}$ implica que cada quark pode ter spin $\frac{1}{2}$. O princípio de exclusão de Pauli implica que os três quarks de valência devem estar em uma combinação assimétrica em um bárion, isso implica que existem outros números quânticos internos, os quais poderão então compôr combinações assimétricas. A isto se dá o nome de Cor: este número quântico é a carga envolvida na teoria de calibre (gauge) chamada de Cromodinâmica Quântica (QCD).

Finalmente, um breve resumo das características dos quarks descritas pode ser observado na tabela I.

| Nome | Geração | Carga | Massa(MeV) | Propriedades |
|----------------|---------|----------------|-------------------|--|
| up | 1 | $\frac{+2}{3}$ | 1.5 a 4.0 | $I_z = \frac{+1}{2}, T_z = \frac{+1}{2}$ |
| down | 1 | $\frac{-1}{3}$ | 4 a 8 | $I_z = \frac{-1}{2}, T_z = \frac{-1}{2}$ |
| strange | 2 | $\frac{-1}{3}$ | 80 a 130 | $S=-1, T_z = \frac{-1}{2}$ |
| charm | 2 | $\frac{+2}{3}$ | 1150 a 1350 | $C=1, T_z = \frac{+1}{2}$ |
| bottom | 3 | $\frac{-1}{3}$ | 4100 a 4400 | $B'=-1, T_z = \frac{-1}{2}$ |
| top | 3 | $\frac{+2}{3}$ | 172700 ± 2900 | $T=1, T_z = \frac{+1}{2}$ |

Tabela I: Um resumo das propriedades dos Quarks, no Modelo Padrão.

Todas as partículas do modelo padrão foram esquematizadas em um modelo das oito dobras (do inglês, *eight-fold way*) por Gell-Mann, em um clara referência aos octetos do modelo das oito dobras do Budismo. Pode-se observá-los nas figuras 4, 5 e 6.

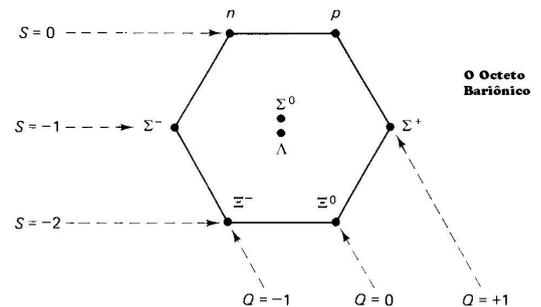


Figura 4: O octeto Bariônico. [14].

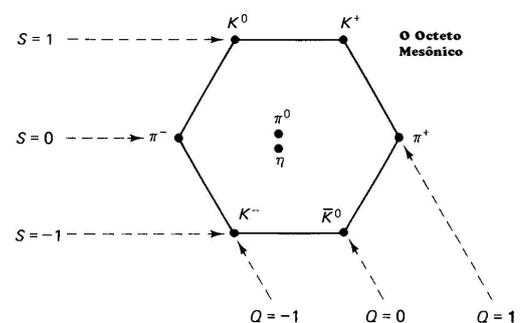


Figura 5: O octeto Mesônico. [14].

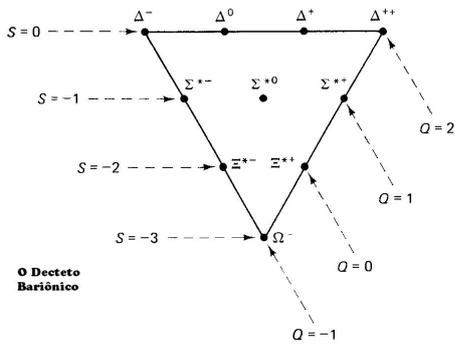


Figura 6: O Deceto Bariônico. [14].

E para os quarks e anti-quarks tem-se a representação nas figuras 7 e 8.

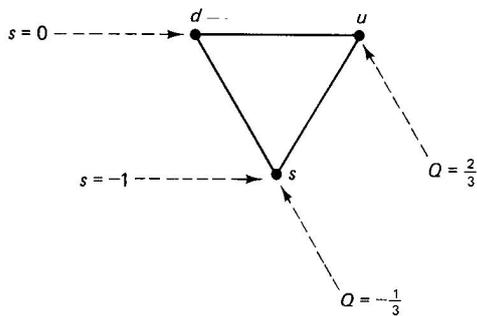


Figura 7: Os quarks. [14].

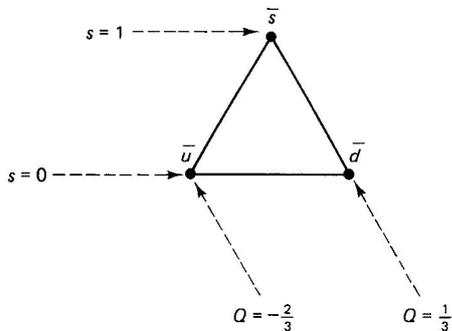


Figura 8: Os anti-quarks. [14].

C. Bósons - Os Tipos de Interações

Nenhuma informação pode ser transmitida mais rápido do que a velocidade da luz: é necessário um mediador entre duas partículas. As partículas responsáveis pelas interações são:

- **Fóton: eletromagnetismo** → Mantém os áto-

mos juntos e tem o maior papel no dia-a-dia das pessoas. O magnetismo e a eletricidade são simplesmente diferentes manifestações dessa força. É sentida por todas as partículas, com exceção dos neutrinos (que não têm cargas).

- **8 Glúons (combinação das cores dos quarks): interação forte** → Sentida apenas pelos quarks, essa força mantém o núcleo unido.
- **Bósons vetoriais: interação fraca** → Responsável pelo decaimento β , os mediadores têm massa e foram descobertos no CERN, em 1983. É sentida por todas as partículas da matéria.
- **Gráviton: gravidade** → É a força mais fraca e responsável pela atração dos objetos astronômicos. O gráviton ainda não foi observado. É sentida por todas as partículas.

Um esquema oportuno de como essas partículas são organizadas no modelo padrão pode ser visto na tabela II.

| Força | Bóson | Fonte | Intensidade |
|-------------------------|---------------|-------------|---------------------------------|
| Eletromagnetismo | fóton | Carga | $\alpha = \frac{1}{137}$ |
| Força Fraca | W^+, W^-, Z | Carga Fraca | $G_{Fermi} = 10^{-5}$ |
| Força Forte | glúons | Cor | $\alpha_s \approx 1$ |
| Gravidade | gráviton | Massa | $\alpha_G = 5,9 \cdot 10^{-39}$ |

Tabela II: As forças do Modelo Padrão: seus bósons de interação, suas fontes e suas intensidades.

O último item da tabela II, intensidade, é representado (em geral) por um α característico da interação, de forma que seu valor é associado aos vértices de interações dos diagramas de Feynman. Na eletrodinâmica quântica, ela é chamada de constante de estrutura fina (equação 1, onde e é a carga elementar da do elétron, \hbar a constante de Planck sobre 2π e c a velocidade da luz no vácuo), e é uma constante de acoplamento que representa a força de interação entre elétrons e fótons.

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \quad (1)$$

Na teoria eletrofraca, que unifica a interação fraca com o eletromagnetismo, a constante de estrutura fina é absorvida em duas outras constantes de acoplamento associadas com os campos de calibre eletrofracos. Nessa teoria, a interação eletromagnética é tratada como uma mistura de interações associadas aos campos eletrofracos.

Nas teorias de calibres não-abelianas (ou seja, com álgebras não comutativas), tem-se funções betas negativas (na teoria quântica de campo, a função beta codifica os parâmetros de acoplamento), e um exemplo disso é a função beta para a cromodinâmica quântica (QCD), e é um resultado da diminuição do acoplamento em altas energias. Esse acoplamento decresce logaritmicamente, fenômeno conhecido como *liberdade assintótica*, e, dessa

forma, o α_s das interações fortes pode ser dado, aproximadamente, pela equação 2, onde β_0 é a constante computada pelos cientistas Wilczek, Gross e Politzer.

$$\alpha_s(k^2) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{g_s^2(k^2)}{4\pi} \approx \frac{1}{\beta_0 \ln(k^2/\Lambda^2)} \quad (2)$$

Em outras palavras, esse resultado significa que o acoplamento é bastante grande em baixas energias, resultando no já discutido confinamento dos hádrons. As outras constantes de acoplamento da tabela têm os mesmo significados.

Finalmente, as quatro interações podem ser observadas, por exemplo, em um distúrbio no campo gravitacional, que pode ser descrito como a troca de dois grávitons. O eletromagnetismo age entre partículas eletricamente carregadas e o fóton carrega a informação (momento e energia) entre as partículas carregadas, não tendo nem carga nem massa. É a troca de fótons entre elétrons negativos e o núcleo positivo do átomo que o mantém intacto e determina seu tamanho (quanto maior o tamanho, mais fraca a interação). A interação entre quarks e o fato deles serem mantidos juntos nos hádrons (confinamento) é feita pelos glúons. Essa interação, Forte, é a mais poderosa das quatro interações. A interação Fraca (figura 9) é responsável pela transformações das partículas (exemplo: um neutron em um próton), ou seja, os decaimentos atômicos.

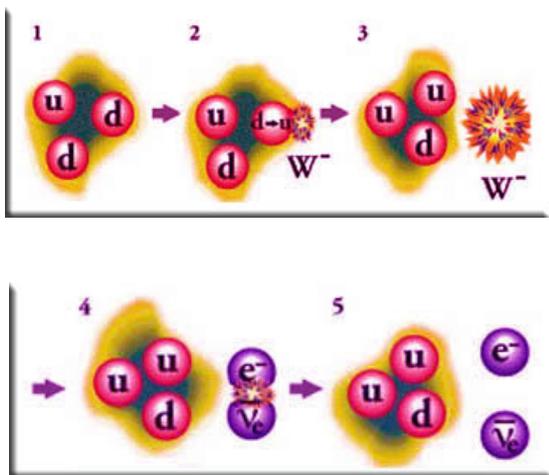


Figura 9: Exemplo da interação fraca: um nêutron decai em um próton, com o bóson W^- levando a carga negativa, que decai em elétron e antineutrino do elétron.

D. As Antipartículas

A cada tipo de partícula há associada uma antipartícula, com mesma massa e carga oposta (com exceção dos bósons de gauge, que não tem massa, como o fóton). Mesmo partículas eletricamente neutras, como o nêutron não são idênticas às suas antipartículas. As leis

da natureza são simétricas entre partículas e antipartículas até os experimentos de violação CP, que diz que a simetria na reversão do tempo é violada na natureza. Essa pequena assimetria envolve a bariogênese, processo pelo qual o universo é quase inteiro de matéria, com quase nenhuma antimatéria livre.

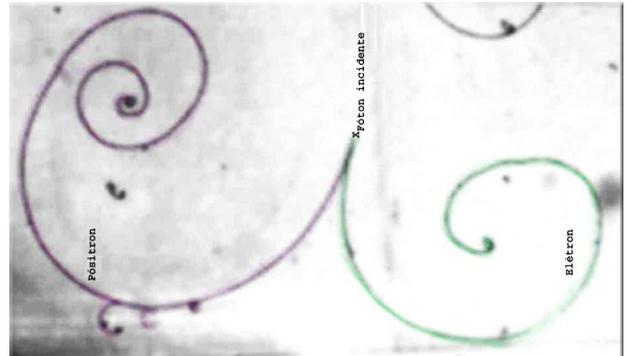


Figura 10: Criação de uma Partícula (elétron) e uma Antipartícula (pósitron) por um fóton [9].

Pares de partículas - antipartículas podem se aniquilar se estão em estados quânticos apropriados. Eles podem também ser produzidos em vários processos, que são usados, hoje em dia, no aceleradores de partículas para criar novas partículas e testar teorias. Além disso, processos de alta energia na natureza podem criar antipartículas, como em raios cósmicos e em certas reações nucleares.

A previsão teórica de antipartículas foi dada em 1927, pelas soluções estados quânticos de energias negativas da equação de Dirac. A partir da equação da energia relativística (3 e 4), ele notou que poderia não descartar as soluções negativas e, então, propôs que havia um mar de elétrons de energia negativa preenchendo o universo, ocupando todos os estados de baixa energia. Assim, devido ao princípio de exclusão de Pauli, nenhum outro elétron poderia cair (preenchendo) nesses estados. Eventualmente, uma dessas partículas de energia negativa pularia fora do mar de Dirac e se tornaria uma partícula de energia positiva, deixando um buraco no mar, que agiria exatamente como um elétron de carga oposta. Na época ele interpretou o processo erroneamente como um próton. Um ano depois, Dirac modificou sua teoria postulando o pósitron.

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4 \quad (3)$$

$$E = \pm\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \quad (4)$$

E. Mésons e o Méson- π (1934-1947)

O Méson- π (ou Píon) é o nome coletivo de três partículas descobertas pelo físico brasileiro César Lattes

em 1947: π^+ , π^0 e π^- . Em 1935 foi previsto a existência de mésons que carregariam as partículas da força nuclear forte e Yukawa previu a existência de uma partícula com massa de 100 MeV. Em 1936, foi descoberto o múon, de massa 106 MeV, mas ele não participava das interações fortes (era um lépton, não um méson). Em 1947, finalmente, foi encontrado os mésons previstos por Yukawa, com a ilustre colaboração brasileira de César Lattes.

Hoje sabe-se que os píons são os mésons mais leves, com spin nulo (bósons) e compostos de quarks da primeira geração (um quark up e um antiquark down compõe o π^+ , um quark down e um antiquark up compõe o π^- , e o π^0 é composto pela combinação de um quark up com um anti-up ou um quark down com um anti-down), de acordo com a figura 11. Sua importância se deu por serem um ingrediente fundamental para a explicação da interação nuclear forte (em baixas energias) já que mediam essa interação. Em altas energias, esse papel, na verdade, é dos glúons.

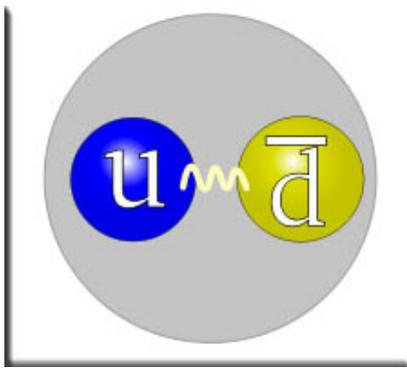


Figura 11: Representação do π^+ em um quark up e um antiquark down [7].

Os π^+ e π^- têm a massa de $\frac{MeV}{c^2}$ e um tempo de vida de $2,6 \cdot 10^{-8}$ segundos. Eles decaem devido ao processo fraco em um múon e um neutrino de múon (equações 5 e 6).

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (5)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (6)$$

Há uma pequena chance (menos de 1 por cento) de decaírem em um elétron e no neutrino do elétron (equação 7).

$$\pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e, \quad \pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e \quad (7)$$

Uma forma de representar esse comportamento é através dos diagramas de Feynman (descritos mais adiante), como se pode observar na figura 12.

O π^0 tem uma massa um pouco menor, de $135 \frac{MeV}{c^2}$ e um tempo de vida também menor: $8,4 \cdot 10^{-17}$ segundos.

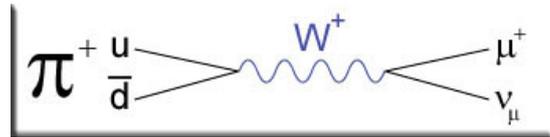


Figura 12: Diagrama de Feynman para o decaimento dos píons carregados [7].

Ele decaee devido a força eletromagnética em dois fótons (equação 8).

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad (8)$$

Com uma pequeníssima chance (menos de 1 por cento), ele também pode decair também e um par elétron-pósitron (equação 9).

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + e^+ + e^- \quad (9)$$

F. Neutrinos (1930-1962)

No final da década de 20 do século passado, a análise da energia cinética dos elétrons, emitidos em certos decaimentos radioativos, mostrava que parecia faltar energia: os elétrons, quando acelerado, ao invés de terem uma energia exata, de 0,8 MeV, possuíam uma energia variável menor que esse valor (figura 13).

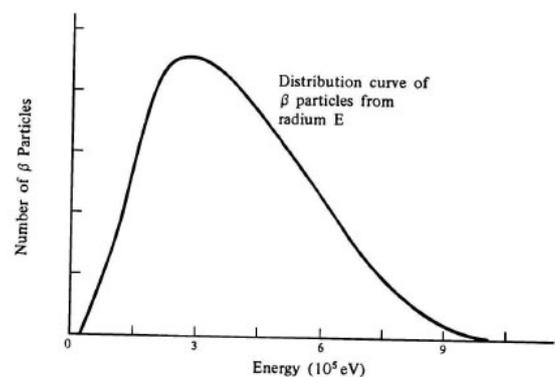


Figura 13: Um espectro de decaimento β . A energia do elétron emitido pode variar entre 0 e um valor máximo que neste caso é cerca de 1.05 MeV. Obtido de uma dos artigos clássicos, C.D. Ellis e W. A. Wooster, Proc. R. Soc. (London) A117, 109 (1927) [18]

A predição teórica de uma nova partícula muito pequena que acompanhava o elétron em sua aceleração se deu por Wolfgang Pauli, em 1931, que observou que era a explicação mais plausível para a energia se conservar (sua

famosa carta está na figura 14) . A comprovação experimental se deu somente em 1956, sendo que o primeiro detector de neutrinos consistia de uma cuba com 400.000 litros de tetracloroetileno.

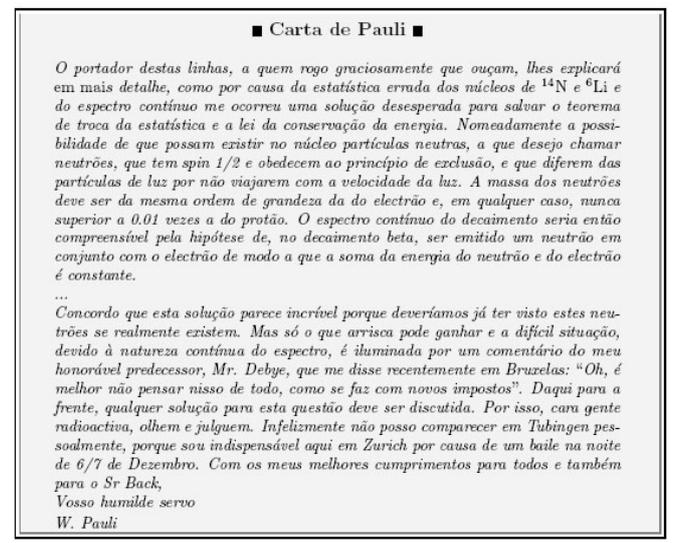


Figura 14: Carta de Pauli sugerindo a existência do neutrino [18].

O neutrino é uma partícula leptônica de difícil detecção. Sua massa é muito pequena (no início, pensava-se que podia ser nula) e sua carga elétrica pode ser considerada nula. Por ser um férmion, o spin do neutrino é $\frac{1}{2}$. É formado em diversos processos de desintegração beta, e na desintegração dos mésons K. No interior do sol, por exemplo, o hidrogênio é convertido em hélio e os fótons provindos do astro são acompanhados por neutrinos. Estima-se que na Terra o fluxo de neutrinos seja de cerca de 40 mil milhões por segundo e cm^2 .

Assim, os neutrinos sofrem apenas interações fracas e gravitacionais. Experimentos executados em laboratórios de partículas indicam que se transformam de um tipo em outro durante seu deslocamento. A isto se chama oscilações de neutrinos, mas estas oscilações não eram previstas no Modelo Padrão. Essa foi a primeira evidência de um fenômeno não descrito pela teoria, e, por isso, Koshiba e Davis ganharam um Prêmio Nobel em 2003.

Por fim, os três tipos de neutrinos previstos no Modelo Padrão são:

- **Neutrino do elétron** \longrightarrow Neutrino eletrônico é associado ao elétron, de número eletrônico +1.
- **Neutrino do múon** \longrightarrow Neutrino muônico associado ao múon-menos, e de número muônico +1.
- **Neutrino do tau** \longrightarrow Neutrino tauônico, associado ao tau, e de número tauônico +1.

G. Bósons de Higgs

Bóson de Higgs é uma partícula elementar escalar maciça hipotética predita para validar o Modelo Padrão. É a única partícula do modelo que ainda não foi observada e representa a chave para explicar a origem da massa das outras partículas elementares. Espera-se que o LHC (Grande Colisor de Hádrons), previsto para funcionamento no início de 2008, no CERN, confirme ou negue a existência do bóson de Higgs.

O mecanismo de Higgs ou mecanismo de Anderson-Higgs, originalmente proposto pelo físico britânico Peter Higgs baseado na sugestão de Philip Anderson, é o mecanismo que dá massa a todas partículas elementares em Física de partículas. Ele cria o bóson W diferente do fóton, por exemplo. Essa partícula é, de fato, o quantum de um dos componentes de um campo de Higgs. No espaço vazio, o campo de Higgs adquire um valor diferente de zero, que permeia a cada lugar no universo todo o tempo. Este *valor da expectativa do vácuo* (VEV) do campo de Higgs é constante e igual a 246 GeV. A existência deste VEV diferente de zero tem o papel fundamental de dar a massa a cada partícula elementar, incluindo o próprio bóson de Higgs. A aquisição de um VEV diferente de zero quebra espontaneamente a simetria de calibre da força eletrofraca é o mecanismo de Higgs. Este é o único mecanismo conhecido capaz de dar a massa aos bóson de calibre que é também compatível com teorias do calibre.

Na figura 15, observa-se a densidade de energia dos campos de Higgs. O plano onde está o "sombreiro" é o campo de Higgs, e a parte mais baixa das "abas", o círculo de vácuo. Basicamente, imaginando-se uma bola percorrendo o potencial, o movimento desta bola ao rolar a superfície é semelhante à evolução dos campos de Higgs: é necessária energia para levantar a bola e essa energia (gravitacional) aumenta com a altura, ou seja, a energia gravitacional da bola é proporcional à densidade de energia do campo de Higgs. O valor da densidade de energia é grande se ambos os campos forem zero, mas a densidade de energia desaparece quando os campos de Higgs correspondem a qualquer ponto do "círculo de vácuo". Se os campos de Higgs desaparecem, a bola imaginária ficará no centro do chapéu e a energia será muito alta. Um ponto aleatório do círculo de vácuo é determinado por processos aleatórios na história inicial do universo, quebrando de maneira espontânea a simetria da teoria básica. As outras partículas da teoria interagem com os campos de Higgs de modo que são afetadas pela escolha aleatória dos valores desses campos. Como partículas diferentes interagem com campos de Higgs diferentes, surgem distinções entre partículas que seriam de outra forma indistinguíveis. Finalmente, a massa das partículas são determinadas pelas suas interações com os campos de Higgs.

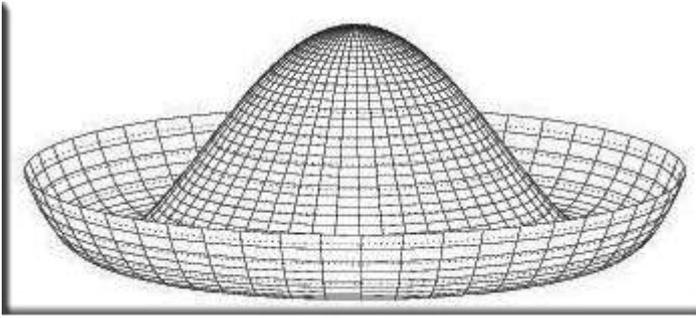


Figura 15: O potencial do campo de Higgs é chamado de 'El Sombrero' ou 'chapéu mexicano'. O formato do Potencial explica porque outras partículas no Modelo Padrão são Massivas [3] [15].

H. Resultados Bem-Sucedidos do Modelo Padrão

* Predição da existência dos bósons W e Z, dos glúons, do quark top e do quark charm.

* O grande colisor de Elétron-Pósitron no CERN observou, durante dois anos, 20 milhões de bósons Z, que decaíam da forma prevista no Modelo Padrão.

* Predição do ângulo de mistura eletrofraca: esse ângulo deve ter o mesmo valor em todos os processos eletrofracos. Isso foi observado, com precisão de 1 por cento.

II. DIAGRAMAS DE FEYNMAN

A VERDADE RARA VEZ É PURA E JAMAIS É SIMPLES.

OSCAR WILDE, "A IMPORTÂNCIA DE SE CHAMAR ERNESTO, ATO I"

O diagrama de feyman é uma ferramenta inventada por Richard Feynman para calcular espalhamentos e reações na teoria quântica de campos. Partículas são representadas por linhas, que podem ser desenhadas de várias maneiras, dependendo do tipo da partícula (em geral, férmions são representados por linhas retas e bósons por linhas curvas). Um ponto onde as linhas se conectam é chamado de vértice de interação, esse ponto tem o valor da constante de acoplamento em questão (os α da tabela II). As linhas são de três tipos: internas (que conectam dois vértices), entrando (que vêm do passado, representam o momento inicial) e saindo (vão para o futuro, momento final). A parte inferior do diagrama representa o passado e a parte superior, o futuro. Exemplos pode ser visualizados nas figuras 17, 16 e 18.

III. LEIS DE CONSERVAÇÃO

NESSE MUNDO, NADA É PARA SER TEMIDO, SOMENTE COMPREENDIDO.

MADAME CURIE, 1867-1934

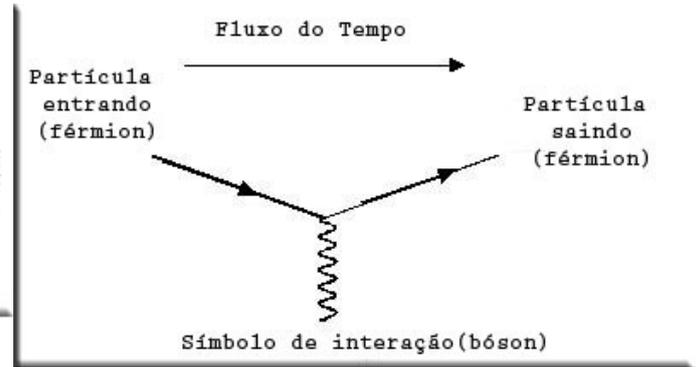


Figura 16: Neste diagrama de Feynman, uma partícula interage com um fóton (o tempo decorre da esquerda para a direita).

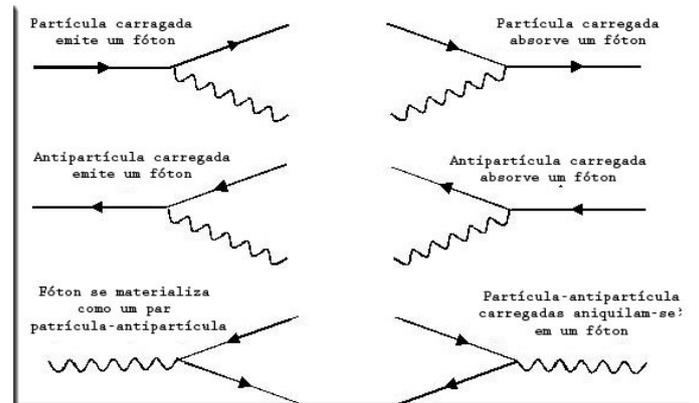


Figura 17: As seis interações de partículas com fótons, sendo que cada uma representa um processo diferente, e os processos reais são combinação desses processos simples.

Qualquer lei de conservação é uma identidade matemática para alguma simetria em um sistema físico (conforme o Teorema de Noether, a seguir). Uma propriedade conservada em um sistema físico pode ser conservada localmente ou globalmente. Exemplos de leis de conservação que não podem ser violadas:

- Energia,
- Momento Linear,
- Momento Angular,
- Carga elétrica,
- Carga de cor,
- Probabilidade,
- Número eletrônico, muônico e tauônico.

Há também leis de conservação aproximadas, que são verdade em condições particulares, como baixas velocidades, pequenas escalas de tempo ou certas interações:

- Massa (baixas velocidades),

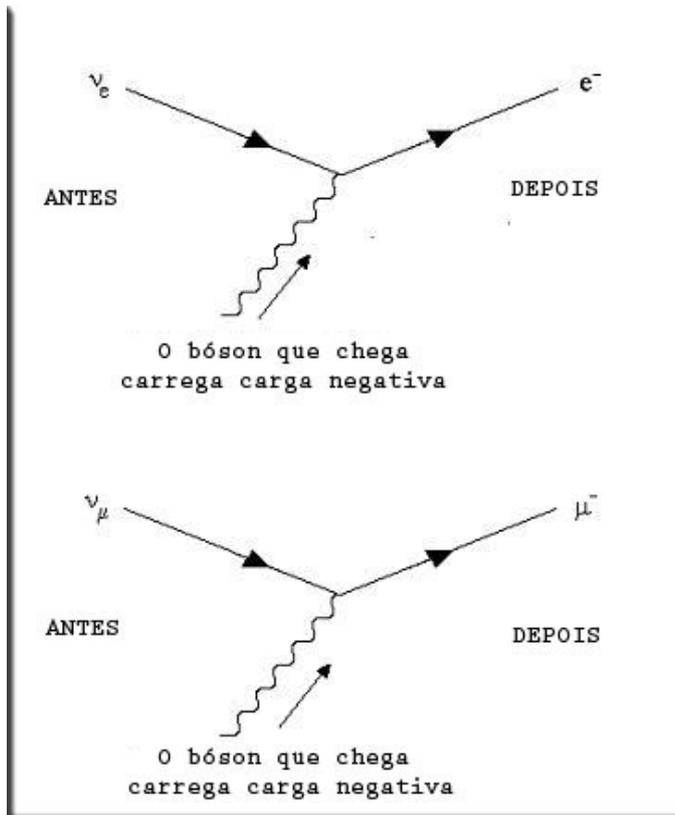


Figura 18: Neutrinos de elétron e do múon interagindo com fótons e resultando em elétrons e múons, respectivamente.

- Número Bariônico,
- Número leptônico,
- Sabor (violado pela interação fraca),
- Paridade,
- Simetria CP.

O Teorema de Noether expressa a equivalência entre duas propriedades diferentes das leis físicas, emparelhando dois conceitos básicos: a invariância (simetria) da forma que uma lei Física toma em relação a qualquer transformação generalizada que preserve o sistema de coordenadas (espacial e temporal), e sendo o outro a lei de conservação de uma quantidade Física. De um modo geral, as simetrias associadas às leis de conservação podem ser vistas na tabela III.

| Simetria | Lei de conservação |
|--------------------------|--------------------|
| Translação no Tempo | energia |
| Translação no Espaço | momento |
| Rotação | momento angular |
| Transformação de Calibre | carga |

Tabela III: Algumas simetrias associadas com suas leis de conservação.

O conjunto de operações de simetria em qualquer sistema deve respeitar as seguintes propriedades:

1. Fechamento: o conjunto deve ser fechado em si (para qualquer operação algébrica)
2. Identidade: há um elemento no conjunto que quando multiplicado por qualquer outro elemento resulta nesse elemento.
3. Inversidade: para cada elemento do conjunto, há um outro elemento inverso, cuja soma de ambos resulta na identidade.
4. Associatividade: as operações no conjunto de simetria são associativas.

IV. O LHC



SE SOUBÉSSEMOS O QUÊ ESTAMOS FAZENDO, NÃO SE CHAMARIA DE PESQUISA.

ALBERT EINSTEIN, 1879-1955

O Large Hadron Collider (LHC), um anel de colisão de 27 Km de circunferência, construída no CERN, colidirá feixes de prótons a 14 TeV, tem sido esperado ansiosamente pelos físicos pois seu funcionamento (previsto para o início de 2008) poderá detectar ou não partículas como o bóson de Higgs, e, conseqüentemente, comprovar (ou não) a eficácia de previsões do Modelo Padrão. Também se procurará a existência da super simetria.

Nos colisores, as partículas são aceleradas dentro de um campo eletromagnético até atingirem altos níveis energéticos, e depois são colididas com outras partículas de matéria. Quando os feixes de partículas viajam dentro do anel de colisão, elas são aceleradas pelos campos elétricos, sendo assim, os campos elétricos são proporcionais à energia das partículas: quanto maior o campo elétrico maior será a energia da partícula. Essas partículas absorvem parte da energia da onda de rádio a medida que circulam nas cavidades de colisão. Para que os feixes de partículas passem pelas câmeras a vácuo varias vezes, elas precisam ser circulares. Para assim obter uma enorme quantidade de energia, é preciso bombardear dois feixes de partículas de dentro do outro, pois as partículas aniquilam umas as outras, liberando uma energia tão alta que pode ser convertida em partículas pesadas.

Figura 19: Vista aérea do LHC, no Cern [8].



V. PROBLEMAS EM ABERTO E QUESTÕES REMANESCENTES

- Como incluir a gravidade no Modelo Padrão? Abandonar o Modelo ou adaptá-lo?
- O Modelo Padrão descreve 3 gerações de partículas, sendo que o mundo cotidiano é explicado pela primeira geração. Por que não há mais gerações?
- As interações dos campos de Higgs (bóson de Higgs) fazem com que as partículas tenham massa. O Modelo Padrão ainda não consegue explicar as formas particulares das interações do bóson de Higgs. Mais desenvolvimentos em cima do Modelo explicarão essas interações?
- Como explicar as massas de elétrons, neutrinos, quarks e léptons pelo Modelo Padrão?
- Como explicar a expansão acelerada do Universo causada pela *energia escura* pelo Modelo Padrão?
- Como explicar a Inflação (logo após o Big Bang) pelos mesmos campos do Modelo Padrão?
- Já que o Universo começou com o Big Bang, como explicar que ele deveria ter evoluído de forma a conter a mesma quantidade de matéria e antimatéria?
- Um quarto do Universo é matéria escura, que não pode ser formada por partículas do Modelo Padrão. Alguma adaptação ao Modelo poderá explicar a matéria escura?

-
- [1] Página disponível em <http://particleadventure.org>, último acesso em 12/08/2007.
- [2] Página disponível em <http://teachers.web.cern.ch>, último acesso em 12/08/2007.
- [3] Página disponível em http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/hands-on-cern/pictures/sm_higgs2.gif, último acesso em 12/08/2007.
- [4] Página disponível em <http://www2.slac.stanford.edu/vvc/theory>, último acesso em 12/08/2007.
- [5] Página disponível em <http://pdg.lbl.gov>, último acesso em 12/08/2007.
- [6] Página disponível em <http://www.fsc.ufsc.br/~canzian/particulas/texto1.html>, último acesso em 12/08/2007.
- [7] Página disponível em <http://www.wikipedia.com>, último acesso em 12/08/2007.
- [8] Página disponível em <http://faculty.fullerton.edu/cmconnell/304/LHC.htm>, último acesso em 12/08/2007.
- [9] Página disponível em <http://www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/intrcosm/Glossario/Antipart.html>, último acesso em 12/08/2007.
- [10] Página disponível em <http://nuclear.ucdavis.edu/~calderon/Research/physicsResearch.html>, último acesso em 12/08/2007.
- [11] Página disponível em <http://www.answers.com/topic/standard-model?cat=technology>, último acesso em 12/08/2007.
- [12] Página disponível em http://www.lip.pt/~outreach/posters/posters_eng.html, último acesso em 12/08/2007.
- [13] Página disponível em <http://www.lapp.in2p3.fr/neutrinos/ankes.html>, último acesso em 12/08/2007.
- [14] "D.Griffths", *Introduction to Elementary Particles*.
- [15] "A. Guth", *O Universo Inflacionário*.
- [16] "Horvath et al", *Cosmologia Física*.
- [17] M. Gell-Mann, Phys. Lett. **8**, 214 (1964).
- [18] Didier Verkindt, History of the Neutrinos <http://www.lappin2p3.fr/neutrinos/aneut.html>, último acesso em 20/08/2007

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

| Leptons spin = 1/2 | | | Quarks spin = 1/2 | | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| Flavor | Mass GeV/c ² | Electric charge | Flavor | Approx. Mass GeV/c ² | Electric charge |
| ν_e electron neutrino | <1x10 ⁻⁸ | 0 | u up | 0.003 | 2/3 |
| e electron | 0.000511 | -1 | d down | 0.006 | -1/3 |
| ν_μ muon neutrino | <0.0002 | 0 | c charm | 1.3 | 2/3 |
| μ muon | 0.106 | -1 | s strange | 0.1 | -1/3 |
| ν_τ tau neutrino | <0.02 | 0 | t top | 175 | 2/3 |
| τ tau | 1.7771 | -1 | b bottom | 4.3 | -1/3 |

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$), where 1 GeV = 10^9 eV = 1.60×10^{-10} joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c² = 1.67×10^{-27} kg.

BOSONS

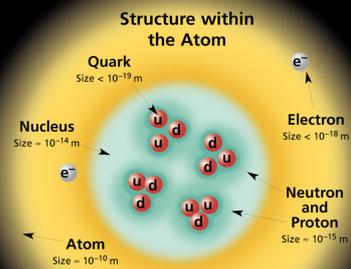
force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

| Unified Electroweak spin = 1 | | | Strong (color) spin = 1 | | |
|------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| Name | Mass GeV/c ² | Electric charge | Name | Mass GeV/c ² | Electric charge |
| γ photon | 0 | 0 | g gluon | 0 | 0 |
| W ⁻ | 80.4 | -1 | | | |
| W ⁺ | 80.4 | +1 | | | |
| Z ⁰ | 91.187 | 0 | | | |

Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: mesons qq and baryons qqq.

Residual Strong Interaction
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

| Property | Interaction | Gravitational | Weak (Electroweak) | Electromagnetic | Strong | |
|--|-------------------------|-----------------------------|--|----------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | | Mass - Energy | Flavor | Electric Charge | Fundamental Color Charge | Residual Strong Interaction |
| Acts on: | | All | Quarks, Leptons | Electrically charged | Quarks, Gluons | Hadrons |
| Particles experiencing: | | All | Quarks, Leptons | Electrically charged | Quarks, Gluons | Hadrons |
| Particles mediating: | | Graviton (not yet observed) | W ⁺ W ⁻ Z ⁰ | γ | Gluons | Mesons |
| Strength relative to electromag for two u quarks at: | | 10 ⁻⁴¹ | 0.8 | 1 | 25 | Not applicable to quarks |
| | 10 ⁻¹⁸ m | 10 ⁻⁴¹ | 10 ⁻⁴ | 1 | 60 | Not applicable to hadrons |
| | 3 × 10 ⁻¹⁷ m | 10 ⁻³⁶ | 10 ⁻⁷ | 1 | 20 | |

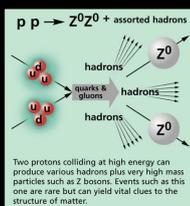
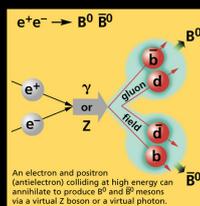
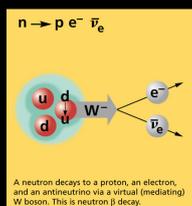
| Mesons qq̄ | | | | | |
|--|--------|---------------|-----------------|-------------------------|------|
| Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons. | | | | | |
| Symbol | Name | Quark content | Electric charge | Mass GeV/c ² | Spin |
| π^+ | pion | u \bar{d} | +1 | 0.140 | 0 |
| K^- | kaon | s \bar{u} | -1 | 0.494 | 0 |
| ρ^+ | rho | u \bar{d} | +1 | 0.770 | 1 |
| B^0 | B-zero | d \bar{b} | 0 | 5.279 | 0 |
| η_c | eta-c | c \bar{c} | 0 | 2.980 | 0 |

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z⁰, γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not K⁰ = d \bar{s}) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

- U.S. Department of Energy
- U.S. National Science Foundation
- Lawrence Berkeley National Laboratory
- Stanford Linear Accelerator Center
- American Physical Society, Division of Particles and Fields
- BURLE** INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project, CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

Figura 20: Grande Resumo do Modelo Padrão: Férmiões, Bósons e propriedades de Interação.