

Introdução à Física de Partículas.

Jussara M. de Miranda
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

RESUMO

Nosso objetivo neste curso: apresentar a física de partículas elementares de forma introdutória. Delinearemos as principais idéias contidas no chamado Modelo Padrão da Física de Partículas, estrutura teórica que descreve todo nosso conhecimento sobre a matéria a partir de seus constituintes fundamentais e da forma como interagem. Abordamos, ainda que brevemente, as principais técnicas experimentais utilizadas atualmente. Começamos pelas bases históricas da elaboração do *MP* e concluimos com uma análise das suas limitações.

1 Introdução

Dada a imensa beleza, variedade e complexidade presentes na natureza que nos cerca, seria pouco provável imaginarmos que sua descrição completa necessitasse de apenas seis blocos fundamentais: elétron; fóton, quarks u e d ; glúons e o Higgs. E que

somando-se outros onze objetos fundamentais seja possível dar conta de todos os mais exóticos fenômenos estudados pela física de partículas . O sonho especulativo dos Gregos em 400 a.C. é hoje realidade comprovada numa das teorias mais completas e bem sucedidas jamais formuladas, o Modelo Padrão da física de partículas (*MP*). Toda a matéria que se tem conhecimento é constituída a partir de de 3 famílias de quarks e léptons que interagem entre si pela troca de bósons de calibre, mediadores das interações forte, fraca e eletromagnética ¹. Além destes o *MP* prevê que todos os elementos fundamentais adquirem massa ao interagirem de forma especial com um campo escalar, associado ao bóson de Higgs, que permeia todo o espaço.

A era moderna da física de partículas tem início na década de 60 quando M.Gell-Mann e independentemente G.Zweig propõem o Modelo a Quarks de tal forma de organizar as dezenas de hádrons ² conhecidos à época. Seriam todos que fossem constituídos de 3 blocos fundamentais, os quarks *u*, *d* e *s*. A princípio tratava-se de entidades puramente matemáticas mas logo passam a entes reais devido à irrefutáveis evidências experimentais. Na década de 70 o *MP* é formulado matematicamente e nas décadas seguintes estabelecido experimentalmente. Uma história riquíssima em exemplos de sucesso de suas previsões poderia ser contada. Com bases experimentais muito solidamente fundadas, o único elemento do *MP* que carece de confirmação experimental direta é o bóson de Higgs. Apesar da falta de sua confirmação direta, existem cerca de 20 quantidades medidas com alta precisão cujas estimativas teóricas dependem exclusivamente do valor da massa do Higgs. Este fato é interpretado por muitos como evidência indireta, porém contundente, da existência do Higgs.

Apesar da beleza, solidez e simplicidade do *MP*, uma série de perguntas seguem sem resposta. O sonho da modernidade de uma teoria ainda mais simples e bela, que unifique todas as interações da natureza e que, necessariamente, recupere o *MP* no limite adequado de energia, ainda está longe de se tornar realidade. O que sugere um longo futuro de muito trabalho à frente.

Esta série de aulas começa com uma breve introdução histórica do período, desde o início do século XX, que antecede e possibilita a formulação do *MP*. Segue com a sua apresentação propriamente dita, de forma tão detalhada quanto o “espaço-tempo” permita. Abordamos então, resumidamente, as principais técnicas experimentais utilizadas na física de altas energias e finalizamos por enumerar os motivos que

¹A força gravitacional não é contemplada pelo *MP*.

²Hádrons são partículas observáveis, não fundamentais, compostas de quarks. O próton e o neutron são os hádrons presentes na matéria ordinária.

levam uma grande parte da comunidade a acreditar que a atual concepção deva fazer parte de uma descrição ainda mais geral da natureza.

2 Antecedentes históricos

Deixamos para a próxima sessão idéias contidas na teoria da relatividade e na mecânica quântica, ambas desenvolvidas na primeira metade do século XX. Elas, no contexto de teoria de campos, formam a base teórica do *MP*. O que se segue aqui não pretende fazer jus a todo o esforço embutido na sua construção. Seleccionamos apenas uma pequena parte dos eventos ocorridos desde o final do século XIX até meados da década de 60, quando surge a idéia dos constituintes mais básicos da matéria. Julgamos, com isso, transmitir um pouco da forma pela qual as idéias foram evoluindo até culminarem no que hoje acredita-se ser a descrição da estrutura da matéria.

No final do século XIX já encontrava-se bastante solidificada a idéia de que a matéria seria constituída de átomos que podiam ser agrupados segundo suas propriedades químicas, o que deu origem à tabela periódica proposta por Mendeleev em 1870. A esta altura, no entanto, nada se conhecia sobre a estrutura atômica e, portanto, sobre causa das propriedades dos elementos químicos. A formulação completa do modelo atômico, que vem a explicar as propriedades presentes na tabela de Mendeleev, só chega sessenta anos mais tarde com a descoberta do neutron. O primeiro passo rumo ao mundo das partículas elementares vem com a descoberta do elétron em 1897 por J.J Thomson, que mede sua razão carga/massa, e se completa quando Millikan, em 1909, mede a carga elétrica $e = 1.6 \times 10^{-19} C$, estimando $m_e = 9.11 \times 10^{-28} g$. Os resultados de Millikan podem ser comparados às medidas atuais: $e = 1.60217733(49) \times 10^{-19} C$ e $9.10938188(72)10^{-28} g$! A comprovação da existência do núcleo atômico se deve a Rutherford observando o comportamento de um feixe de partículas α após incidirem numa folha de ouro. A idéia pioneira de Rutherford é ainda hoje empregada na física experimental de altas energias, como veremos mais adiante.

Por volta de 1932 há um momento de quietude na física de partículas : o modelo atômico estabelecido através da mecânica quântica; os constituintes conhecidos e^- , p , n e γ e a noção da força nuclear de curto alcance, mais intensa que a interação eletromagnética que, agindo indistintamente entre prótons e neutrons, possibilita a coesão do núcleo atômico. Apenas umas poucas pontas soltas perturbam a aparente tranquilidade: 1) não se compreende o decaimento β , que produz partículas β num espectro de energia contínuo aparentemente sem conservar a energia, em contraposição

ao decaimento α , que produz um espectro discreto bem compreendido e no qual o balanço energético é sempre observado³. 2) em 1928 Dirac propõe a extensão relativística da equação de Schrödinger e encontra duas soluções, uma adequada à descrição do elétron e outra com energia negativa que originará o conceito de anti-matéria. 3) qual seria a origem da força nuclear?

As teorias propostas que explicam estes problemas exigem novas partículas que são posteriormente encontradas. Já em 1932 Carl Anderson, estudando raios cósmicos, observa a primeira anti-partícula, o pósitron, e^+ , parceiro do elétron com mesma massa e carga elétrica oposta. A solução do enigma do decaimento β requer uma nova forma de interação, a força fraca, sugerida por Fermi em 1934, além uma nova partícula para dar conta do balanço energético, o neutrino, ν , idealizado por Pauli em 1931. O neutrino, sendo neutro e com massa nula ou muito pequena, só experimenta a interação fraca, o que dificultou enormemente sua observação direta. Esta só acontece em 1956 por Cowan e Reines. Em 1935 Yukawa publica sua teoria sobre a força nuclear. Inspirado na força eletromagnética de alcance infinito mediada por fótons desprovidos de massa, Yukawa postula que o curto alcance da força nuclear estaria relacionado a mediadores massivos. Dado o alcance de $\sim 10^{-15}$ m, conclui que a força forte tenha um mediador com massa intermediária à do próton e do elétron, da ordem de ~ 100 MeV, daí denominá-lo méson. A partícula de Yukawa, o méson π , teve sua identificação em raios cósmicos retardada por cerca de 10 anos devido à confusão causada pela presença do múon (semelhante ao elétron mas com massa de 106 MeV e que não interage fortemente, o que lhe garante um tempo de vida de $\sim 10^{-6}$ s). O méson π de massa $m_\pi = 140$ MeV é identificado finalmente em 1947 e no ano seguinte observado em acelerador. Desta observação participa físico brasileiro Cesar Lattes então na Universidade da Califórnia.

Por um breve período em 1947 uma nova aparente paz na física de partículas com o π de Yukawa, o e^+ de Dirac e o ν de Pauli. Perturbando a paz apenas o μ . Logo uma profusão de partículas estranhas e ressonâncias⁴, K^\pm , K^0 , Λ , η , Σ etc. são descobertas nos detectores de raios cósmico e nos aceleradores.

O caminho até a compreensão da estrutura da matéria passa por uma etapa clas-

³No decaimento nuclear por emissão de partículas β (eletron!) o elemento aumenta o número atômico de uma unidade, por ex: ${}_1H^3 \rightarrow {}_2He^3 + e^-$. No decaimento α ocorre a emissão de uma partícula α (núcleo de He com carga $+2e$), por ex. ${}_{92}U^{238} \rightarrow {}_{90}Th^{234} + {}_2He^4$ (nomenclatura: $N^\circ_{atomico}ELEMENTO^{N^\circ_{demassa}}$)

⁴Ressonâncias são partículas que decaem por interação forte, o que lhes garante tempo de vida da ordem de $\sim 10^{-23}$ s.

Tabela 1: As três interações conservam energia, momento linear e angular e carga elétrica

grandeza	Forte	Eletromagnética	Fraca
n° bariônico, B	✓	✓	✓
n° leptônico $_e$, L_e	✓	✓	✓
n° leptônico $_\mu$, L_μ	✓	✓	✓
Estranheza, S	✓	✓	×
Isospin, I	✓	×	×
Componente I_3	✓	✓	×
Paridade, P	✓	✓	×
Conjucação de carga, C	✓	✓	×
Reverão temporal, T (ou CP)	✓	✓	\sim ✓
CPT	✓	✓	✓

sificatória que tem por objetivo ordenar as informações. As partículas podem ser classificadas segundo o spin (bósons, spin inteiro, ou férmions, spin semi-inteiro) ou por sofrerem ou não a ação da força forte. Designa-se por hádrons as partículas sujeitas à força forte. Mésons são hádrons de spin inteiro $\pi, K, \eta\dots$ e bárions os de spin semi-inteiro, $p, n, \Lambda, \Sigma, \Omega\dots$. Os férmions que não experimentam a força forte são coletivamente ditos léptons, $e, \mu, \nu\dots$ e há ainda a categoria na qual se inclui o γ que são bósons não sujeitos à força forte. Cria-se uma série de números quânticos e regras de seleção como forma de explicar as reações presentes ou não na natureza. Introduce-se o número quântico bariônico, B , que garante a estabilidade do próton. Um exemplo interessante é número quântico estranheza, S , associada a uma classe de partículas com comportamento “estranho” por decaírem em $\sim 10^{-8}s$ e por aparecerem sempre aos pares em interações $p\pi$ ou pp . Sucede que são criadas por interações fortes que conservam S e decaem por interações fracas, que não conservam S . A percepção de que as massas do p e n são semelhantes e que a interação forte os trata indistintamente apesar das cargas elétricas diferentes leva à interpretação de serem dois estados, ou dubletos, de um mesmo objeto, o nucleon. Introduce-se o isospin (forte), I e sua terceira componente atribuindo ao nucleon $I = 1/2$ sendo $I_3 = +1/2$ e $-1/2$ para p e n respectivamente. Analogamente ao trio de píons atribui-se $I = 1$ e $I_3 = +1, 0, -1$ para π^+, π^0 e π^- respectivamente. A tabela 1 lista as leis de conservação das interações.

Várias tentativas no sentido de organizar o caos hadrônico são propostas no início dos anos 60, algumas das quais tentam identificar alguns hádrons como fundamentais, constituintes dos demais. Em 1961 Gell-Man e Ne’eman independentemente,

usando a noção matemática de grupos, organizam os hádrons em famílias ou múltiplos. Tal como fez Medeleev com a tabela periódica. A classificação ficou conhecida como “*The eightfold way*” que agrega num mesmo múltiplo hádrons de mesmo spin, paridade e número bariônico, e que são posteriormente distribuídos em pontos de uma rede num plano $I_3 \times S$. O procedimento fica claro na figura 1. O Ω_- que aparece num dos vértices do decupeto dos bárions só será observado em 1964 dando maior notoriedade ao esquema.

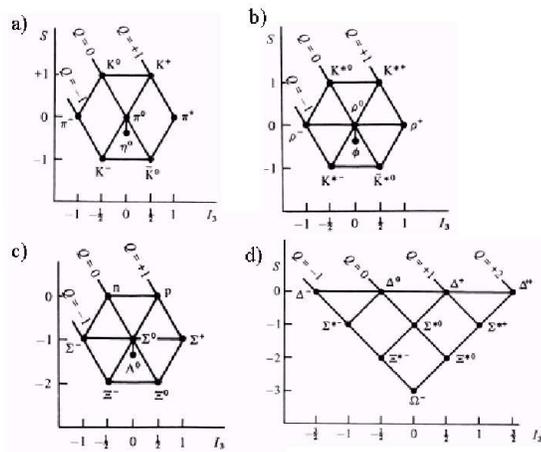


Figura 1: Hádrons arrumados segundo o “*eightfold way*”. a) mésons - spin 0; b) méson - spin 1; c) bárions - spin 1/2; d) bárions - spin 3/2

O *eightfold way* abre caminho para que pouco mais tarde mais tarde, em 1964 Gell-Man e independentemente Zweig proponham a idéia de quarks como entidades fundamentais constituintes dos hádrons. Todos os hádrons conhecidos à época são constituídos de 3 quarks e anti-quarks: u, d e s ou $up, down$ e $strange$. Os quarks são objetos de carga fracionária (d e s $-1/3$ e u $+2/3$) e número bariônico $1/3$. Os bárions têm a forma qqq e os mésons $q\bar{q}$.

Nesta primeira seção nosso objetivo era passar um pouco a noção de como o *MP* foi concebido e paramos à primeira menção de quarks. Poderíamos seguir o caminho histórico descrevendo a confirmação experimental da existência de quarks com uma técnica experimental análoga à usada por Rutherford na descoberta do núcleo atômico; a previsão teórica e posterior descoberta de mais quarks; com a distinção dos neutrinos do e , μ e τ etc. No entanto optamos por mudar de sistemática. Nas seções que seguem, apresentamos de forma mais direta o *MP* na sua totalidade, acreditando desta forma enfatizar sua simplicidade e generalidade.

3 Antecedentes teóricos

A formulação teórica do *MP* tem como antecedentes a teoria da relatividade especial e a mecânica quântica, ambas surgidas na primeira metade do século XX com o propósito de explicar o comportamento da luz e da matéria. A primeira faz-se necessária a todos fenômenos envolvendo velocidades da ordem da velocidade de propagação da luz no vácuo, enquanto a segunda aplica-se sempre que as dimensões em questão sejam microscópicas. Cumprindo ambas as condições o *MP* é uma teoria quântica relativística.

Teoria da Relatividade e as Transformações de Lorentz. Resultados experimentais do final do século XIX atestam que a velocidade de propagação da luz é constante. Em 1905 Einstein propõe a teoria da relatividade especial baseada em dois postulados: 1) As leis da física são equivalentes em quaisquer referenciais inerciais (i.e. que se movem relativamente com velocidade constante), 2) A velocidade de propagação da luz no vácuo é a mesma, $c = 299792458m/s$, em qualquer referencial inercial. Como consequência, as equações que transformam as coordenadas de um referencial a outro deixam de ser as transformações de Galileu passando às transformações de Lorentz, que atrelam as coordenadas espaciais à temporal de tal forma a garantir a constância de c . No caso simples de dois sistemas de referência em movimento relativo ao longo do eixo z e com eixos x e y paralelos as transformações de Lorentz têm a seguinte forma:

$$\begin{aligned} x' &= x, & x &= x' \\ y' &= y, & y &= y' \\ z' &= \gamma(z - vt), & z &= \gamma(z' + vt') \\ t' &= \gamma(t - vz/c^2), & t &= \gamma(t' + vz'/c^2) \end{aligned} \quad (1)$$

Nas equações acima $\gamma = \gamma(v) = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ é o chamado fator de Lorentz. No limite $v \rightarrow 0$ a transformação de Lorentz reduz-se à de Galileu.

Às quatro coordenadas (ct, \vec{x}) nos referimos como quadri-vetor espaço-tempo. Por conveniência, na física de partículas adota-se usualmente o sistema de unidades naturais onde $c = 1$. Toda quantidade que se transforma segundo a equação 1 é dito um quadri-vetor. Outros exemplos de quadri-vetores: momento-energia $p^\mu = (E, \vec{p})$, potencial elétrico $A^\mu = (\phi, \vec{A})$, corrente elétrica $j^\mu = (\rho, \vec{j})$, derivada $\partial_\mu = (\partial/\partial t, \vec{\nabla})$. O “produto escalar” de dois quadri-vetores, definido como $a_\mu b^\mu = a^0 b^0 - \vec{a} \cdot \vec{b}$ ⁵, é um invariante posto que tem o mesmo valor em qualquer sistema de referência. Um invariante de especial interesse na física de partículas é $p^2 = p_\mu \cdot p^\mu = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$, ou massa invariante.

Mecânica Quântica: É construída no primeiro quarto do século passado com a contribuição de diversos personagens e passo a passo com a física experimental. Tem como marco inicial a proposta de Max Planck para explicar como a luz é emitida/absorvida pela matéria. Se a emissão de radiação por um corpo aquecido fosse contínua até energias indefinidamente pequenas para qualquer comprimento de onda, chegar-se-ia à contradição de ver a energia total emitida infinita. Para evitar tal conclusão Planck introduz o conceito de energia mínima emitida/absorvida possível, ou quantum. Para dada frequência ν a energia emitida não é inferior a $E = h\nu$, onde $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J.s é a constante de Planck. No limite $h \rightarrow 0$ recupera-se a física clássica. No sistema de unidades naturais toma-se $h = 1$.

O desenvolvimento da mecânica quântica segue com Einstein propondo a natureza corpuscular da luz (fóton) para explicar o efeito foto-elétrico. As partículas são entidades duais, ora comportando-se como onda, caracterizada pelo comprimento de onda λ , ora como partícula, de momento p . Em 1924 de Broglie associa os dois conceitos através da equação $\nu = h/p$. O reconhecimento deste caráter dual das partículas é conhecido como primeira quantização.

A natureza quântica do átomo proposta por Bohr define níveis de energia eletrônicos quantizados, acomoda o modelo atômico “planetário” e explica as linhas espectrais

⁵O sinal negativo é convencional; $a_\mu = g_{\mu\nu} a^\mu$; $g_{\mu\nu} = g^{\mu\nu} =$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

observadas experimentalmente. A primeira prescrição dinâmica da mecânica quântica, não relativística, é dada pela equação de Schrödinger, que determina o comportamento de uma partícula sujeita a um potencial e descrita por sua função de onda, $\psi(\vec{x}, t)$. O determinismo clássico é substituído e o que a mecânica quântica fornece são distribuições de probabilidade proporcionais a $|\psi^* \psi|$. A indeterminação quântica é descrita matematicamente pelo princípio de incerteza de Heisenberg, que relaciona a possibilidade de determinação simultânea da posição, Δx e do momento Δp : $\Delta x \Delta p \geq h/2\pi$. Dito de outra forma, quanto melhor se conhece a posição mais indeterminado torna-se o momento. De forma equivalente, associa energia e tempo, $\Delta E \Delta t \geq h/2\pi$. Mas o modelo atômico não estaria fechado, explicando as propriedades da tabela periódica, sem a introdução do conceito de momento angular intrínseco, ou spin, e do princípio de exclusão de Pauli: dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado quântico. Isto equivale a dizer que a função de onda de um conjunto de férmions (partículas de spin semi-inteiro) é antissimétrica pela troca de partículas, i.e. $\psi(1, 2) = -\psi(2, 1)$. Bósons (partículas de spin inteiro) não obedecem ao princípio de exclusão, podendo ocupar o mesmo estado quântico e um conjunto de bósons é descrito por funções de onda simétricas.

Dirac propõe a equação relativística para o elétron livre, incorporando naturalmente o spin, imposto de forma ad hoc na formulação não relativística. E, como fruto realmente espetacular, interpreta a solução da equação cuja energia é negativa introduzindo o conceito de anti-partícula. O objeto análogo à função de onda na equação de Schrödinger aqui é o spinor de Dirac, ψ , que tem quatro graus de liberdade associados à partícula /anti-partícula e aos estados de spin $\pm 1/2$.

Teoria quântica de campos (TQC): É a forma mais sofisticada da mecânica quântica. Na TQC, todas as entidades são representadas por campos, sendo as partículas fundamentais manifestações dos campos. O fóton é manifestação do campo eletromagnético A^μ . A função de onda de um elétron específico é a excitação do campo eletrônico em determinada frequência. Dito de outra forma, o campo “contém” todas as possíveis manifestações na forma de uma soma de Fourier de todas as possíveis funções de onda com coeficientes proporcionais a suas probabilidades de criação/destruição. Este é o conceito fundamental da chamada segunda quantização.

Na TQC todas as formas de interação resultam da troca de partículas. O princípio da incerteza permite que uma partícula com energia ΔE seja criada, contanto que viva apenas o tempo Δt dado por $\Delta E \Delta t \sim h/2\pi$. Partículas criadas desta forma são ditas

virtuais pelo fato da sua existência violar a conservação da energia ⁶. A interação entre duas partículas se concretiza quando a partícula virtual emitida por uma é absorvida por outra, processo no qual a conservação do momento e da energia são observados. A natureza do mediador caracteriza a interação cuja intensidade é dada pela constante de acoplamento ou probabilidade de emissão/absorção do mediador e proporcional à carga. Por exemplo a interação eletromagnética, ilustrada na figura 2a tem como mediador o fóton que tem massa zero, garantindo o longo alcance da interação.

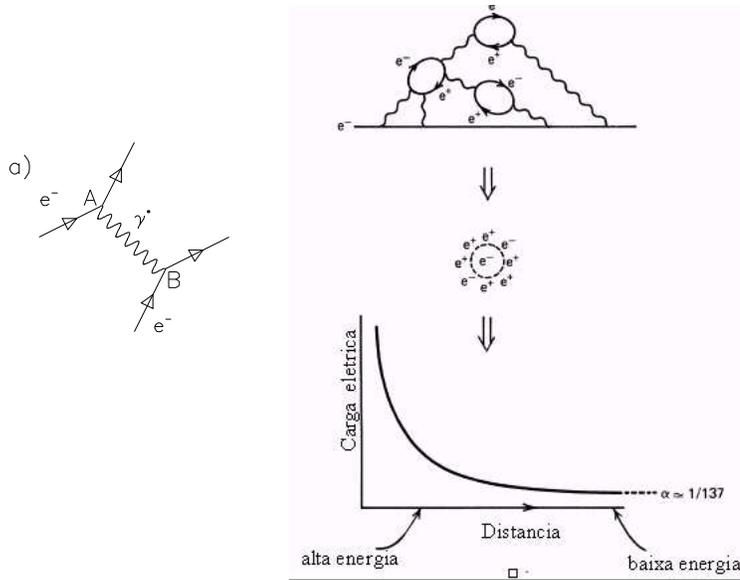


Figura 2: a) Em A o elétron emite o fóton virtual e recua conservando o momento em B o fóton é absorvido por outro elétron. b) Modelo para o elétron, cercado de pares e⁺e⁻ permitidos pelo princípio da incerteza. A nuvem de pares se arranja de forma a camuflar o efeito da carga do elétron original. Uma carga que penetre a nuvem vai sentir uma carga efetiva aumentada. c) o comportamento da constante de acoplamento traduz esse efeito

⁶Suponha que um elétron em repouso emita um fóton de momento k e recue $-k$ conservando o momento: $e^-(E_0, \vec{0}) \rightarrow e^-(E_k, -\vec{k}) + \gamma(k, \vec{k})$. $E_0 = m$; $E_k = (k^2 + m^2)^{1/2}$ e portanto $\Delta E = E_k + k - E_0$.

O conhecimento da Lagrangiana ⁷ de um sistema, clássico ou quântico, juntamente com o princípio variacional de Hamilton, permite encontrar suas equações de movimento, ou seja, determinar sua evolução. No caso, a TQC lida com densidades Lagrangianas dos campos e suas interações, e o princípio variacional descreve a propagação dos campos em termos das probabilidades de criação e destruição de seus quanta. O cálculo de processos físicos requer a solução das equações, só possível, nos melhores casos, através de cálculos perturbativos.

Sucedem que na maioria dos casos a Lagrangiana do sistema é desconhecida, sendo a observação das simetrias ⁸ o único recurso acessível. A importância das implicações dinâmicas das simetrias contínuas fica clara com o teorema de Noether: *simetria contínua* \longleftrightarrow *quantidade conservada*. A toda simetria contínua do sistema corresponde uma lei de conservação. Através do teorema de Noether, a conservação da energia está relacionada à translação temporal, a conservação de momento à translação espacial, a conservação do momento angular à simetria por rotação, etc.

A operação de simetria mais importante para a física de partículas é a invariância do sistema por uma transformação de calibre: $\psi \rightarrow \psi' = e^{i\theta} \psi$, que deixa intocadas densidades de probabilidades proporcionais a $\psi^* \psi$. Está associada à conservação da carga, ou seja, à interação. A construção da eletrodinâmica quântica (QED) segundo uma teoria de calibre, mostra o caminho para a construção das demais interações.

Pode-se construir a Lagrangiana da QED tendo como inspiração a descrição da eletrodinâmica clássica para uma partícula movendo-se em presença de campos eletromagnéticos. A Lagrangiana total consta dos termos associados aos campos livres $\mathcal{L}_0(\psi)$ do elétron e $\mathcal{L}_0(A^\mu)$ para o quadri-vetor do campo eletromagnético associado ao fóton de spin 1 mais o termo de interação $\mathcal{L}_{int}(\psi, A)$.

De forma alternativa, a Lagrangiana da QED pode ser obtida impondo-se a invariância de calibre local $\psi \rightarrow \psi' = e^{i\theta(\vec{x})} \psi$ à Lagrangiana de Dirac para o elétron livre. Acontece que $\mathcal{L}_0(\psi)$ é linear na derivada do campo e quando atua em ψ' modifica a forma funcional de \mathcal{L} . A exigência da invariância requer a adição de um termo à Lagrangiana original que vem a ser idêntico a $\mathcal{L}_{int}(\psi, A)$ da QED. Ou seja, a

⁷A Lagrangiana de um sistema é dada pela diferença entre sua energia cinética e potencial.

⁸Simetria é operação ou transformação que deixa o sistema invariante. O conjunto das operações de simetria de um sistema forma um *grupo*, entidade matemática de grande utilidade para a física de partículas elementares

imposição da invariância de calibre local exige naturalmente a presença de um campo vetorial de massa nula acoplado ao campo do elétron, interpretado como campo do fóton responsável pela interação. Esta concepção de que a imposição de uma simetria de calibre acarreta o campo responsável pela interação e a conservação da carga vai ser a base para a descrição de todos os tipos de interação no contexto do *MP* e é conhecido como princípio de calibre.

4 O Modelo Padrão

A figura 3 mostra de forma esquemática todos os elementos do Modelo Padrão com as partículas fundamentais e a forma como interagem. Existem duas categorias de partículas elementares: os férmions, que formam a matéria (quarks e léptons), e os bósons mediadores das interações. Os quarks e léptons vêm arrumados em três famílias ou gerações que se assemelham em tudo, com exceção da massa. Os quarks u e d e os léptons e e ν_e que formam a primeira e mais leve das três famílias constituem toda matéria ordinária encontrada na natureza. Os demais podem ser produzidos mas acabam decaindo (se transformando) em partículas mais leves. Os léptons não experimentam a interação forte, os neutrinos portanto só sentem a interação fraca. A interação forte é responsável por manter agregados os quarks em hádrons que aparecem na natureza como bárions na forma qqq de spin semi-inteiro, ou mésons na forma $q\bar{q}$ de spin inteiro. A força nuclear, que mantém o núcleo atômico coeso é de natureza forte, da mesma forma que a força de Van der Waals de natureza eletromagnética mantém ligadas as moléculas. O *MP* descreve 3 das 4 interações observadas na natureza: forte, fraca e eletromagnética. As interações se dão por intermédio da troca dos bósons de calibre. O fóton, bóson responsável pela interação eletromagnética é neutro e sem massa, o que garante o longo alcance característico. Os W^\pm e Z^0 que representam a força da fraça são massivos, daí o curto alcance da interação. Finalmente, os glúons (são 8 em número) mediadores da interação forte que são coloridos ou “carregados”. Como veremos mais adiante, a *COR* está para a força forte assim como a carga elétrica para a interação eletromagnética. Desta forma, os glúons são portadores da interação forte entre os quarks mas também interagem entre si, propriedade que será responsável por manter os quarks sempre ligados na forma de hádrons.

Além da interação eletromagnética discutida anteriormente outros dois tipos de interação são contempladas no *MP* :

Interação Fraca: Proposta originalmente por Fermi a fim de explicar o decaimento β , se distingue das forças forte e eletromagnética em muitos aspectos. Não existem estados ligados pela força fraca, mas é ela a única responsável pelo decaimento (troca de sabor) de quarks e léptons. Tem curto alcance, estando associada a mediadores massivos, neutro (Z_0) ou carregados ($\pm W$). A figura 4 ilustra alguns processos envolvendo interações fracas. No setor leptônico, a força fraca não mistura famílias, o que é traduzido pela conservação dos números leptônicos. Já no setor de quarks, embora com pequena probabilidade, é possível decaimentos com trocas de famílias, ou seja, um quark s pode decair num quark u emitindo um W^- , por exemplo. A probabilidade de transição do processo ilustrado na figura 4b é cerca de 20 vez superior ao da figura 4c. Para acomodar esta característica presente na natureza e dar o mesmo tratamento para os setores de quarks e léptons, redefine-se os dubletos de quarks sujeitos à interação fraca introduzindo a matriz de mistura (matriz de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa):

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (2)$$

A interação fraca não conserva paridade ($P\vec{x} = -\vec{x}$) o que significa que a física muda por uma operação de espelho. Num dos episódios mais surpreendentes da história da física de partículas, esta hipótese foi proposta em 1956 pelos jovens físicos Lee e Yang e sob o ceticismo de Pauli: “*I don't believe that the Lord is a weak left-handed...*”. No ano seguinte Wu et al. confirmam experimentalmente mais esta característica singular da interação fraca. Como consequência da não conservação da paridade, só existem neutrinos com helicidade -1 e anti-neutrinos +1.⁹

Em 1967/68 Glashow, Weinberg e Salam escrevem a teoria de calibre unificada para as interações fraca e eletromagnética, seguindo os passos da QED discutidos anteriormente. Introduzem o isospin fraco I^W e a hipercarga Y , cargas conservadas responsáveis pela interação fraca. Impondo a invariância de calibre geram mediadores neutro e carregados, até aqui sem massa. Num mecanismo conveniente de quebra de

⁹Helicidade é a polarização para partículas sem massa, em cujo caso o spin é paralelo (H=+1) ou antiparalelo (H=-1) ao momento.

simetria, o mecanismo de Higgs, consegue-se fazer com que os bósons responsáveis pela interação fraca adquiram massa, ao preço de exigir um campo escalar extra, o campo de Higgs. Neste processo, através do setor neutro, acoplam as interações fraca e eletromagnética. A teoria eletro-fraca foi desenvolvida originalmente para o setor leptônico (apenas duas famílias eram conhecidas). A mediação por corrente neutra desconhecida na época, foi prevista pela teoria e observada através da reação $\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p + \pi^- + \pi^+ + \pi^0$, em 1973. Finalmente a teoria determina a massa dos W^\pm e Z_0 , cujos valores estavam além da energia disponível nos aceleradores da época, sendo observados diretamente apenas em 1983.

Em 1970 Glashow, Iliopoulos e Miani propõem a existência de um quarto quark, c que explicaria, através de uma interferência destrutiva entre dois processos, a supressão observada no decaimento $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Um tal quark completaria a segunda família de quarks possibilitando a extensão da teoria eletro-fraca para o setor. Em 1974 o primeiro hadron charmoso é observado por dois grupos liderados por S. Ting em Brookhaven e B. Richter no SLAC, sendo denominado J/ψ , um méson de conteúdo ($c\bar{c}$) com massa de 3.1 GeV.

Na TQC as operações de conjugação de carga, C , paridade, P , e reversão temporal, T , são ligados pelo teorema CPT . Partindo-se de premissas muito gerais e plausíveis acredita-se que todas as interações sejam invariantes pela operação conjunta CPT (tomadas em qualquer ordem). Como consequência deste teorema, partículas e anti-partículas têm a mesma massa e tempo de vida. Apesar da interação fraca violar maximamente a operação isolada da paridade, acreditava-se que a operação conjunta CP fosse respeitada. Para confirmar a hipótese J.Cronin, L.Fitch e colaboradores em 1964 elaboram um experimento para medir o (não) decaimento $K_L \rightarrow 2\pi$ que viola CP . Observam que embora com pequena probabilidade o decaimento é possível. Acomodar este fato no modelo padrão exige a terceira família de quarks. Em 1977 L. Lederman e colaboradores observam o primeiro méson da terceira família, o Υ ($b\bar{b}$) na massa de 9.46 GeV.

Interação Forte: Conforme já mencionamos, os quarks foram originalmente introduzidos como entidades matemáticas a fim de organizar o caos dos hádrons observados. A assimilação dos mesmos enquanto constituintes fundamentais esbarrava em pelo menos duas dificuldades: o fato de não existirem senão confinados em hádrons e de terem carga elétrica fracionária. Uma experiência muito semelhante à que levou Rutherford a demonstrar a existência do núcleo atômico, levou também à conclusão

da estrutura interna do próton, ver figura 5.

Se os quarks são férmions reais constituintes dos hádrons, dois problemas carecem de solução: 1) como explicar o bárion Δ^{++} , spin 3/2, $(u \uparrow, u \uparrow, u \uparrow)$ que viola o princípio de exclusão de Pauli; 2) o que impede estados ligados diferentes de $(q\bar{q})$ ou (qqq) ? Por que não (q) , $(\bar{q}\bar{q})$ ou $(qqqq)$? Ambos problemas são solucionados com a introdução de um novo número quântico, COR , com 3 graus de liberdade (usualmente R , B e G , referentes a *red*, *blue* e *green*) e a imposição de que estados de partícula observáveis sejam singletos de COR , ou neutros.

Com base nestes elementos foi construída a teoria quântica de calibre para as interações fortes, a cromodinâmica quântica, ou QCD. A COR é a carga conservada, o glúon o mediador de massa nula. Os glúons são bicolores e existem em 8 tipos distintos. Sendo bicolores e portanto “carregados”, os glúons, diferentemente do eletromagnetismo (o fóton é eletricamente neutro), podem interagir entre si. Justamente esta característica é responsável pelo confinamento dos quarks. O comportamento da “constante” de acoplamento forte é inverso ao da eletromagnética (figura 2), aqui ela cresce com a separação e diminui com a proximidade. Ou seja os quarks são confinados mas assintoticamente livres. À medida que se tenta afastar um par de quarks confinados num méson, por exemplo, o campo de COR aumenta de intensidade, tal como um elástico, até que se “rompa” materializando outro par de quarks, agora confinados a dois mésons. Observa-se portanto a criação de jatos de hádrons. Eventos com 3 jatos de hádrons produzidos em aceleradores e^+e^- são característicos do processo $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$, esperado pela QCD e observado experimentalmente em 1979.

A única forma de estudar a estrutura interna dos hádrons é através de experimentos de espalhamento profundamente inelástico. Pode-se variar a energia do processo e a composição do feixe e do alvo. A informação é parametrizada na forma de funções de estrutura medidas experimentalmente e que dependem da energia trocada e do ângulo de espalhamento. Desta forma foi possível determinar experimentalmente que os quarks são férmions de spin 1/2, que têm carga fracionária e que são responsáveis apenas por 50% do momento do hádron. O próton é, portanto, um objeto composto por 3 quarks (uud) de valência cercados por uma nuvem de glúons e outros quarks (do *mar*) permitidos pelo princípio da incerteza. Uma sonda de prova pode portanto interagir microscopicamente com qualquer integrante do hádron com probabilidade que varia com a energia da mesma.

A QCD é uma teoria elegante e amplamente comprovada experimentalmente. No entanto o comportamento da constante de acoplamento forte limita sua aplicabili-

dade pela impossibilidade de se efetuarem cálculos perturbativos para muitos processos de baixas energias. Do ponto de vista prático, a maior parte da física de hádrons acaba utilizando-se de modelos fenomenológicos ou mesmo carecendo de explicação teórica convincente.

5 Técnicas Experimentais

A física experimental de partículas sofreu uma mudança estrutural na década de 50 quando passou de observações de raios cósmicos a experimentos realizados nos primeiros aceleradores de partículas. A mudança significou o controle das condições experimentais e portanto a liberdade ao projetar o experimento. Desde então, até os dias de hoje, nada mudou com relação ao princípio fundamental da investigação: observar os produtos da colisão entre partículas e daí inferir as propriedades fundamentais da estrutura da matéria.

A história da física de partículas demonstra que ela sempre esteve na fronteira do desenvolvimento tecnológico. Os aceleradores e detetores, descritos brevemente abaixo, são máquinas complexas que impulsionam as fronteiras da engenharia, informática e física dos materiais.

Os primeiros experimentos capazes de medidas precisas em observações diretas eram baseados em técnicas fotográficas, que dependiam do olhar teinado de microscopistas que analisavam individualmente cada chapa fotográfica. Fruto desta técnica e da análise de 80 mil fotografias é a descoberta do Ω^- mencionado anteriormente.

O aumento da energia das interações na busca de processos cada vez mais raros, impôs uma alteração tecnológica condizente. A seguir descrevemos sucintamente os princípios e as principais etapas de detecção na física de partículas. Ou seja, determinar, para cada colisão, o tipo, trajetória e momento das partículas produzidas. Discutimos, também, como ser capaz de selecionar eficientemente as reações de interesse, eliminando o chamado “*background*”, seja ele oriundo de processos físicos ou mesmo de combinações espúrias aleatórias normalmente dominante em várias ordens de magnitude. E, finalmente, conhecer com precisão a eficiência de cada instrumento utilizado de forma a ser capaz de traduzir as quantidades observadas em quantidades físicas fundamentais, que independam dos detetores utilizados.

Só um pequeno número de partículas aproximadamente estáveis deixa rastro nos detetores. O livre caminho médio percorrido depende da velocidade, normalmente relativística ($v \sim c$) e do tempo de vida no referencial do laboratório: $\tau_{LAB} = \tau E/m$ (o tempo de vida não é invariante, depende do referencial, τ é tempo de vida medido

no referencial de repouso da partícula). Nas energias típicas, $\pi^\pm, K^\pm, \mu, e, p, \gamma, K_L^0$ podem ser considerados estáveis atravessando quase todo o espectrômetro. As demais são identificadas através de seus produtos de decaimento, que, combinados, reproduzem a massa invariante de quem os deu origem. Os π^0 decaem imediatamente em um par de fótons; K_S^0 decaem no detector sendo normalmente indetectados por seu decaimento em dois píons carregados. Partículas contendo quarks pesados se desintegram brevemente após serem produzidas, mas vivem tempo suficiente para que detectores espaciais de grande precisão sejam capazes de discriminar o ponto de produção (vértice primário) de ponto de decaimento (vértice secundário).

Aceleração: Partículas eletricamente carregadas são aceleradas quando sujeitas à ação de campos elétricos. Sob potenciais eletrostáticos de alta voltagem atingem-se energias máximas da ordem de 20 MeV. Cavidades de rádio-frequência permitem a aceleração em processos sucessivos ajustando o tamanho dos eletrodos à frequência de correntes alternadas. Em geral acelera-se e^+, e^-, p e \bar{p} por serem estáveis. Outros tipos de feixe são obtidos através de interações secundárias. Os aceleradores podem ser lineares ou circulares. Nos circulares, utilizam-se campos magnéticos bipolares e quadripolares a fim de direcionar e focalizar o feixe, enquanto seções retas de cavidades de rádio-frequência impõem a aceleração a cada passagem. Neste processo repetitivo são atingidas energias mais altas que em aceleradores lineares onde a aceleração se dá num único estágio. É possível ainda, numa mesma cavidade acelerar partícula e anti-partícula em direções opostas. A colisão pode ser feixe contra feixe ou feixe contra um alvo fixo. No primeiro caso, as dificuldades técnicas são maiores devido à baixa seção de choque e sendo necessário um grande controle das condições do feixe. Entretanto, atingem-se energias muito elevadas.¹⁰ A grande desvantagem dos aceleradores circulares está na perda de energia por emissão de radiação síncrotron. Trata-se de um fator limitante nos aceleradores circulares para elétrons cuja perda é 10^{13} mais significativa do que para prótons nas mesmas condições. Finalmente, vale apontar que na maioria das vezes a física de interesse determina o equipamento utilizado. Em colisores de elétrons, por exemplo, a energia envolvida na interação

¹⁰A energia disponível para a produção de partículas, ou energia do centro de massa (CM) é $\sim E_{\text{fixo}}^{1/2}$ no caso de alvo fixo e $\sim 2E_{\text{feixe}}$ no caso de colisores. No primeiro, o CM está em movimento e parte da energia é “gasta” na manutenção deste movimento, enquanto no segundo caso o CM encontra-se em repouso e toda a energia está disponível para a produção de novas partículas.

fundamental é bem conhecida, sendo estes especialmente úteis para medidas de precisão. Por outro lado, o espectro de interações possíveis em colisores de hádrons é muito amplo, estando geralmente associados à novas descobertas.

Interação da partícula com a matéria: A detecção de partículas passa pela sua interação com o meio detetor, em processos que envolvem transferência de energia. Podemos citar os processos mais relevantes na construção de detetores: 1) *interações nucleares* - de curto alcance, afetam indistintamente hádrons neutros ou carregados, podendo ser elásticas ou inelásticas e são a base dos calorímetros hadrônicos (detetores que medem a energia através do processo de absorção); 2) *ionização* - ou excitação dos constituintes atômicos do meio detetor, é a base da maioria dos instrumentos para a observação de partículas carregadas. A maior parte da energia transferida é gasta na criação de íons; 3) *radiação ou bremsstrahlung* - energia transferida por elétrons causando a emissão de fótons através da reação $e^- + (Z, A) \rightarrow e^- + \gamma + (Z, A)$. Para elétrons de altas energias as perdas por radiação dominam as da ionização. É a base da composição de feixes de fótons; 4) *radiação Čerenkov* - luz coerente emitida quando uma partícula atravessa um meio dielétrico com velocidade superior à da luz no meio; 5) *espalhamento múltiplo* - todas as partículas carregadas têm suas trajetórias distorcidas pelo espalhamento coulombiano provocado pelos potenciais atômicos dos meios detetores.

Um espectrômetro completo envolve uma série de detetores. Como os processos de detecção envolvem transferência de energia, a observação passiva, que não perturba o sistema, é impossível. A arte na construção de detetores está em equilibrar os efeitos listados acima, maximizando a eficiência e minimizando a perturbação do sistema, de forma a garantir a viabilidade de todo o conjunto do espectrômetro.

Determinação de posição: as trajetórias das partículas carregadas são determinadas pelos rastros deixados em séries de câmaras de fios ou detetores de estado sólido. As câmaras de fios são detetores de grande escala onde fios de alta tensão são alinhados e montados em cavidades preenchidas com gás. Ao atravessar o meio, as partículas carregadas produzem íons que são coletados através do fio mais próximo à sua passagem. Desta forma, a coordenada espacial transversal ao alinhamento do fio fica determinada. A identificação de um ponto espacial de uma trajetória precisa pelo menos de mais uma (e frequentemente duas) câmaras com fios alinhados em outra direção. As trajetórias completas são determinadas por programas que combinam a série de sinais

registrados num conjunto de detetores. Os detetores de estado sólido seguem o mesmo princípio, mudando apenas o meio ativo e a resolução possível. Estes detetores de alta resolução têm tamanho reduzido e encontram-se dispostos normalmente próximos ao ponto de interação, onde a ocupação é grande. São freqüentemente chamados de detetores de vértice por discriminarem o ponto de produção do ponto de decaimento de hádrons pesados (contendo quarks c ou b)

Determinação de momento: A combinação de detetores de trajetória e magnetos defletores permite a medida dos momenta para partículas carregadas, sujeitas ao campo magnético.

Identificação e medida de energia: Uma série de interações características dos diversos tipos de partículas são usadas na sua identificação. Quando uma partícula carregada atravessa um meio dielétrico com velocidade superior à da luz no meio, dada por c/n (n é o índice de refração do meio), as moléculas do meio são excitadas e emitem luz coerente numa direção relativa ao movimento da partícula que depende da sua velocidade. É o chamado efeito Čerenkov. A combinação de detetores Čerenkov e o conhecimento do momento fornece informação da massa e conseqüentemente a identificação da partícula. A energia gasta a formação de íons na passagem de partículas carregadas pelo meio atômico é também função do momento e pode ser utilizada na identificação.

Sendo estabelecidas a identidade e o momento, o conhecimento da energia é redundante ou complementar. A absorção, e portanto destruição através da transferência total da energia é a base dos calorímetros, que têm por função primária a medida da energia, embora sejam também usados para a identificação. Os calorímetros podem ser eletromagnéticos, que absorvem elétrons ou fótons fazendo-os radiar ou converter em pares e^+e^- respectivamente, ou hadrônicos, que absorvem hádrons neutros ou carregados por interação inelástica forte com núcleo atômico. Os calorímetros absorvem quase todo tipo de partícula, sendo exceção os neutrinos e os múons. Sinal dos neutrinos, só através da energia faltante no balanço da energia total do evento. Os múons deixam seu traço ionizando o meio de detetores situados depois dos calorímetros.

Simulação: Costuma-se dizer que a simulação do experimento é quase tão importante quanto o próprio. A simulação é feita por programas de Monte Carlo basea-

dos em números aleatórios, nos quais inclui-se todos os fenômenos físicos conhecidos. A simulação tem papel fundamental na construção e elaboração dos detectores, na interpretação dos dados e comparação com modelos teóricos, para se conhecer a resposta do detector ou sua eficiência e finalmente, como ferramenta de análise no processo de escolha de critérios de seleção que discriminem o sinal de interesse e do *background*.

Reconstrução e análise de dados: Os dados, tal como vêm dos detectores, na forma de canais sensibilizados, quantidade de luz coletada em foto multiplicadoras, etc. são submetidos a programas de reconstrução que traduzem estas informações em quantidades físicas medidas com seus erros, ou seja, posição dos vértices, trajetórias, probabilidade de identidade, energia etc. Na maioria dos experimentos, tanto os dados oriundos dos detectores, quanto os criados em programas de simulação, passam pelo mesmo processo de reconstrução. A análise dos dados e a busca da física de interesse é a etapa final baseada em estratégias que vão depender de cada caso.

6 Finalmente

Os dois aspectos finais que gostaria de abordar são justamente as glórias e as faltas do *MP*. O *MP* é provavelmente a teoria mais completamente testada de que se tem notícia sem que tenham sido encontrados indícios de que não esteja correta, muito ao contrário. A observação direta do bóson de Higgs é a única peça faltante do *MP*. Contudo, existem questões importantes que não podem ser respondidas no contexto do *MP* e que justificam a descrença da maioria da comunidade de que este seja a resposta final em todas as escalas de energia. Justificando, portanto, a constante busca de efeitos não explicados pelo *MP* na esperança de que indiquem o caminho de uma nova física.

Recentemente o CERN completou 50 anos tendo estado a frente de grandes descobertas e do estabelecimento do *MP*. Os programas do *Large Electron-Positron* LEP-I (1989-1995) e LEP-II (1996-2002) operando respectivamente nas energias do Z_0 (~ 90 GeV) e pares de W (chegando a 209 GeV) foram especialmente elaborados para fornecer medidas de precisão e testar o *MP* à exaustão. Com a medida de precisão da largura do Z_0 através dos seus decaimentos hadrônicos, estabeleceu o número de famílias de quarks e léptons, todos já observados experimentalmente. Ainda na primeira fase do programa, o ajuste conjunto de uma série de parâmetros medidos dependentes da massa do quark *top* permitiu a previsão de $m_t = 177 \pm 11 \pm 19$ GeV em

1994. A observação direta do *top* é triunfo do programa do Tevatron no Fermilab em 1995, $m_t = 178 \pm 8 \pm 10$ GeV e $m_t = 199 \pm 20 \pm 22$ anunciados respectivamente pelos experimentos CDF e Dzero. Analogamente, o ajuste conjunto de cerca de duas dezenas de parâmetros sugere para o bóson de Higgs a massa $m_H = 91_{-37}^{+58}$ GeV. Os limites experimentais estabelecidos para a massa são: $114 \text{ GeV} < m_H < 202 \text{ GeV}$ [95%CL].

A evolução das constantes de acoplamento associadas aos três tipos de interação considerados no *MP* sugere que se encontrem em algum ponto a $\sim 10^{16}$ GeV na escala de energia. Este comportamento e a precedência da unificação das interações eletromagnéticas e eletro-fracas, alimenta a esperança de muitos de ver uma teoria que "grande" unifique todas as interações. Além desta forte inspiração, podemos listar uma série de mistérios que gostaríamos de ver solucionados:

- Qual a razão de haver apenas 3 famílias de férmions fundamentais?

O *MP* é incapaz de prever a massa das partículas. Há cerca de 20 parâmetros no *MP* que precisam ser obtidos experimentalmente, sem qualquer justificativa para os valores que têm.

- Qual a origem do mecanismo de Higgs? E o próprio bóson de Higgs, que interage de forma tão singular com os demais integrantes, existe de fato?

- Como incorporar a gravitação?

- Se nos primórdios do universo, havia iguais quantidades matéria e anti-matéria, como chegamos à situação atual de um universo dominado por matéria? No centro desta questão está a violação de *CP*. Qual sua origem? A possibilidade contemplada no *MP* seria suficiente para explicar o que se observa?

- Divergências matemáticas causadas pela massa do bóson de Higgs não podem ser acomodadas pelo *MP*.

- Efeitos gravitacionais indicam que a maior parte da matéria do universo é fria e invisível: *Matéria Escura*. Qual sua origem?

- Cerca de 70% da energia do universo, *energia escura*, é atribuída à densidade de energia do vácuo e necessária para explicar a aceleração do universo observada experimentalmente. Não há explicação no *MP*.

Há diversos cenários propostos para tentar explicar as questões acima. Nenhum resolve todas, e, mais importante, nenhum tem condição de “recuperar” o *MP* na escala de energia que sabemos ser válido. Provavelmente o cenário mais popular e antigo é o *Modelo Supersimétrico Mínimo* que resolve uma série de questões. No entanto necessita de um grande número de partículas: basicamente para todos os elementos do *MP* existiria um parceiro supersimétrico que, apesar da buscas constantes, jamais foram observados.

7 Referências

Eis alguns textos para uma leitura adicional. Um texto com uma apresentação mais qualitativa das idéias básicas é *The Ideas of Particle Physics* - J. E. Dodd, Cambridge University Press.

Para os que se interessam pela história: *The Particle Explosion* - F. Close, M. Marten e C. Sutton, Oxford University Press. e *The Particle Hunters* - Yuval Ne'eman e Yoram Kirsh, Cambridge University Press.

Textos mais técnicos: *Introduction of High Energy Physics* - D. Perkins, Addison Wesley; *Modern Elementary Particle Physics* - G. Kane, Addison Wesley.

Para os interessados em detectores: *Introduction to Experimental High Energy Physics* - R. Fernow, Cambridge University Press.

Outra fonte de consulta são os *sites* dos CERN e Fermilab, www.cern.ch e www.fnal.gov.

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

Leptons		Quarks	
Flavor	Mass GeV/c ²	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	<1x10 ⁻⁸	u up	2/3
e electron	0.000511	d down	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	c charm	2/3
μ muon	0.106	s strange	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	t top	2/3
τ tau	1.7771	b bottom	-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 $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

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 $E = mc^2$, where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

BOSONS

Unified Electroweak		Strong (color)	
Name	Mass GeV/c ²	Name	Mass GeV/c ²
γ photon	0	g gluon	0
W^\pm	80.4		
Z^0	91.187		

Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." The color charges are red, green, and blue, the color 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, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons
 Residual forces (the gluon force) are confined in other special particles called hadrons. The gluon force results in 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 that join the original quarks. The result is that quarks and gluons do not exist in nature: mesons and baryons only.

Residual Strong Interaction
 The strong force of color-charged 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.

force carriers

spin = 0, 1, 2, ...

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property	Interaction		Weak (Electroweak)		Electromagnetic		Strong	
	Acts on:	Mass - Energy	Quarks, Leptons	Electric Charge	Color Charge	Residual	Residual	
Particles experiencing:	All	Graviton (not yet observed)	W^\pm, Z^0	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons	Hadrons	
Particles mediating:				γ	Gluons	Mesons	Mesons	
Strength relative to electromagnetism for two u quarks at:	10^{-41}	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks	Not applicable to quarks	
for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-36}	10^{-4}	1	60	Not applicable to hadrons	20	

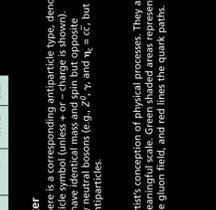
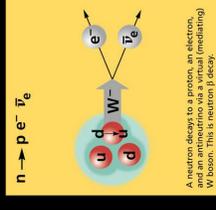
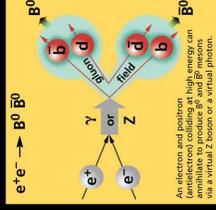
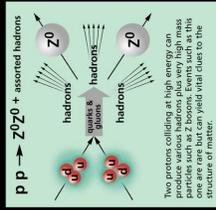
Baryons qqg and Antibaryons qqq

Baryons				Antibaryons				
Symbol	Name	Quark content	Mass GeV/c ²	Spin	Symbol	Name	Mass GeV/c ²	
P	proton	uud	0.938	1/2	\bar{P}	anti-proton	0.938	1/2
n	neutron	udd	0.940	1/2	\bar{n}	anti-neutron	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	1.116	1/2	$\bar{\Lambda}$	anti-lambda	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	1.672	3/2	$\bar{\Omega}^+$	anti-omega	1.672	3/2

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted with a bar over the symbol. Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0, γ , and $\eta_c = C\bar{C}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

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.



Mesons qq
 Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^\pm	pion	$u\bar{d}$ or $d\bar{u}$	± 1	0.140	0
K^\pm	kaon	$s\bar{u}$ or $u\bar{s}$	± 1	0.494	0
ρ^\pm	rho	$u\bar{d}$ or $d\bar{u}$	± 1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$ or $b\bar{d}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$C\bar{C}$	0	2.580	0

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
 American Physical Society
 Stanford Linear Accelerator Center
BURLE INDUSTRIES, INC.
 Contemporary Physics Education Project, CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and scientists. We are proud to be affiliated with the American Physical Society, the American Nuclear Society, and the American Association of Physics Teachers. We offer a variety of materials, hands-on classroom activities, and workshops, see: <http://CPEPweb.org>

Figura 3: Esquema do Modelo padrão. Disponível no site do Particle Data Group (<http://pdg.lbl.gov/>) que reúne muita informação relativa à física de partículas.

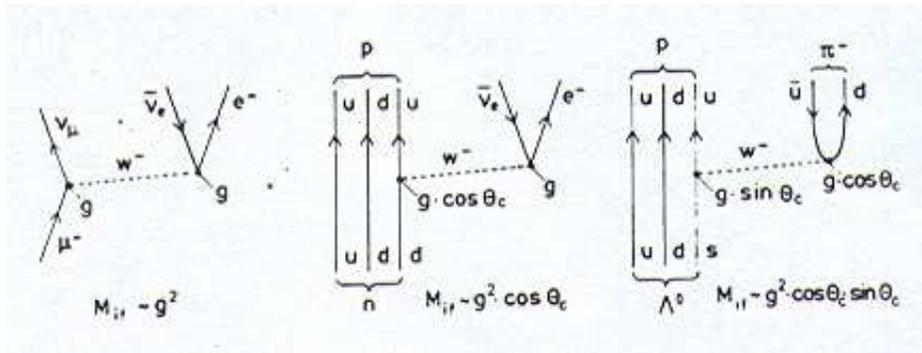


Figura 4: Processos envolvendo decaimentos por interação fraca por corrente carregada. $\cos \theta_c = V_{ud} \sim 0.98$; $\sin \theta_c = V_{us} \sim 0.22$

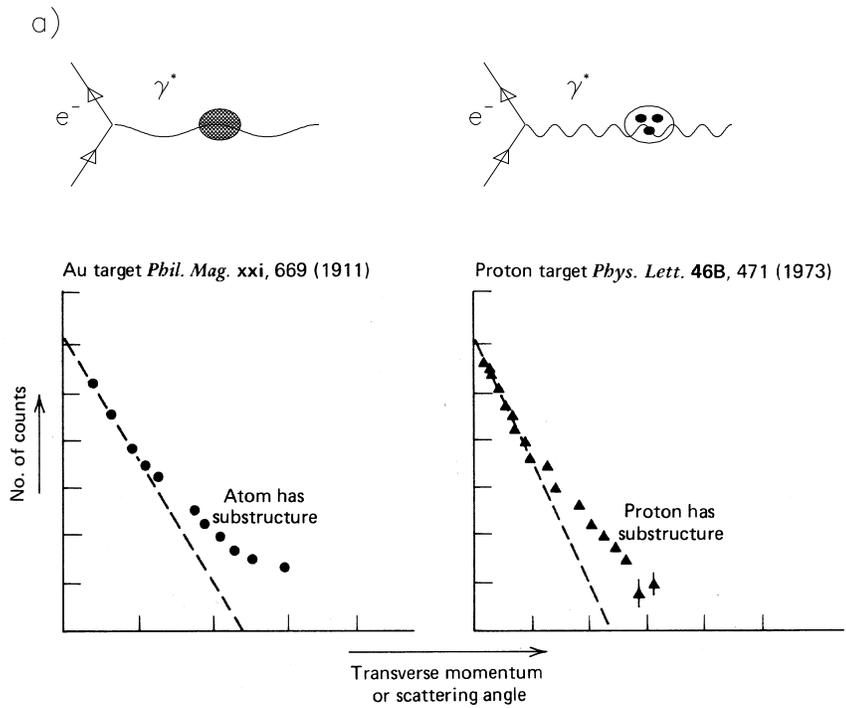


Figura 5: a) Espalhamento $e^- p \rightarrow e^- p$. Quanto maior a energia da interação, menor o comprimento de onda da sonda (no caso o fóton) e portanto poder de resolução. Na parte inferior da figura o resultado de Rutherford ao determinar a existência do núcleo atômico e ao lado o resultado do espalhamento profundamente inelástico e a estrutura interna de prótons. As linhas tracejadas representam a previsão de distribuição uniforme da carga.