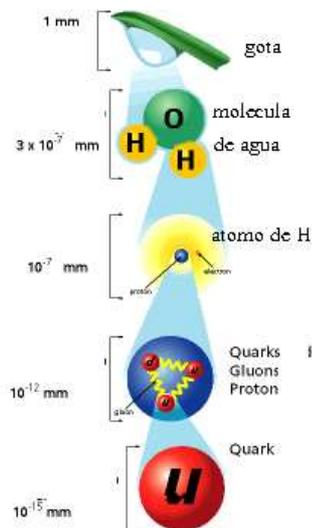


# Partículas Elementares

Oscar J. P. Éboli  
Instituto de Física – USP

## 1 Introdução

Há milhares de anos a humanidade pergunta-se quais são os blocos fundamentais que compõem toda a matéria e eventualmente o universo. A resposta a esta questão variou muito ao longo dos tempos, conforme a capacidade de observação e a tecnologia de cada época. Por exemplo, no final do século XIX acreditava-se que os elementos básicos da natureza fossem os átomos, os quais eram bem classificados usando-se a tabela periódica de Mendeleev. Todavia, no início do século XX ficou claro que os átomos são formados por um núcleo e elétrons. A Física de Partículas tem como seu objetivo o estudo dos



constituintes fundamentais da matéria, suas propriedades e suas interações, sendo que a Física de Partículas moderna é o mais ambicioso e organizado esforço humano para compreender a matéria no seu nível mais básico. Para tanto utilizamos grandes aceleradores de partículas os quais são os maiores microscópios já construídos, chegando a explorar distâncias da ordem de  $10^{-18}$  m, ou seja,  $10^{-8}$  do tamanho do átomo!

A Física de Partículas apresentou grandes avanços tanto teóricos bem como experimentais nos últimos trinta e cinco anos, sendo fácil antever novas e profundas descobertas para a próxima década. Durante a existência do IFUSP ocorreram, entre muitas, a descoberta experimental dos quarks em espalhamento inelástico profundo, a observação de correntes neutras, a descoberta de várias partículas tidas hoje em dia como fundamentais, tais como o lépton tau e seu respectivo neutrino, os quarks charme, bottom e top, e também dos bósons responsáveis pela força fraca  $W^\pm$  e  $Z$ ; para maiores informações veja a contribuição de A. Santoro. Os avanços na parte teórica também foram significativos: estabeleceu-se que teorias de “gauge”

com quebra espontânea de simetria são logicamente consistente, bem como aprofundou-se muito o entendimento deste tipo de modelos. Atualmente estas teorias constituem a base do modelo padrão das partículas elementares, o qual explica extraordinariamente bem os dados experimentais disponíveis.

É muito interessante notar que o constante avanço observado nas últimas décadas apresentou fases muito distintas entre si. Inicialmente foram feitas muitas descobertas experimentais inesperadas, tais como as do tau, charme, bottom, etc as quais levaram a uma completa reformulação dos conceitos teóricos e auxiliaram a moldar o modelo padrão. Uma vez delineado o modelo padrão este foi testado meticulosamente verificando-se que este descreve com precisão os mais diversos experimentos, os quais serviram também para descartar vários modelos alternativos. Todavia, não devemos esquecer que mesmo na fase de medidas de precisão várias descobertas foram feitas, tais como as do quark top e do neutrino do tau, porém estas haviam sido antecipadas pelo modelo padrão. Estas duas fases distintas de descobertas e de medidas de precisão são complementares já que não é possível fazer avanços sem novas descobertas ou sem compreender integralmente os todos detalhes ou sem comprovar-se as previsões dos modelos usados para descrever a natureza.

Os sucessos do modelo padrão são impressionantes. Por exemplo, o modelo padrão explica as propriedades do bóson de “gauge” fraco  $Z$  com precisão da ordem de 0,1%. Mais ainda, o modelo padrão descreve adequadamente o momento magnético anômalo do elétron o qual é medido com nada menos de 13 dígitos significativos! Atualmente, o sucesso do modelo é tão grande que torna descobertas sensacionais tais como a do quark top um fato corriqueiro e esperado!

A Física de Partículas encontra-se atualmente numa fase de transição entre descobertas e medidas precisas. Nos últimos anos foram colhidos os frutos do esforço hercúleo de décadas feito para desvendar experimentalmente as propriedades dos neutrinos. Este aporte de novos dados desencadeou uma grande atividade teórica para sua compreensão, o que certamente está nos levando a um melhor entendimento do nosso universo. Mais ainda, a descoberta em astro-física da existência de energia escura também nos leva a reanalisar nossos paradigmas para que possamos explicar estas observações.

## 2 O que sabemos

Atualmente, consideramos que as partículas fundamentais são os seis quarks (up, down, estranho, charme, bottom e top), os três léptons carregados (elétron, múon e tau) e os três neutrinos associados aos léptons; vide quadro ao lado. Forças em Física de Partículas são associadas à troca de partículas da mesma forma que uma pessoa ganha/perde momento quando pega/arremessa uma bola. Por isto, além destas partículas, a lista das constituintes básicos da matéria inclui as partículas que carregam as forças eletromagnética, fraca e forte, a saber,

Diagrama das três gerações da matéria, organizado em uma grade 3x3. A primeira coluna contém os quarks up ( $u$ ), down ( $d$ ) e os neutrinos  $\nu_e$  e  $e$ . A segunda coluna contém os quarks charmoso ( $c$ ) e estranho ( $s$ ), e os neutrinos  $\nu_\mu$  e  $\mu$ . A terceira coluna contém os quarks top ( $t$ ) e bottom ( $b$ ), e os neutrinos  $\nu_\tau$  e  $\tau$ . O rótulo 'Quarks' está na vertical à esquerda da primeira e segunda linhas. O rótulo 'Léptons' está na vertical à esquerda da terceira e quarta linhas. Abaixo da grade, há três colunas de barras verticais rotuladas 'I', 'II' e 'III', correspondendo às três gerações.

Quarks	$u$ up	$c$ charmoso	$t$ top
	$d$ down	$s$ estranho	$b$ bottom
Léptons	$\nu_e$ neutrino $e^-$	$\nu_\mu$ neutrino $\mu^-$	$\nu_\tau$ neutrino $\tau^-$
	$e$ elétron	$\mu$ múon	$\tau$ tau

As Três Gerações da Matéria

o fóton, os bósons  $W^\pm$  e  $Z$  e o glúon  $g$ , respectivamente. Todos os quarks e léptons podem interagir através da força fraca, ao passo que somente os quarks sentem a força forte e as partículas carregadas a força eletromagnética. Presentemente, foram exploradas distâncias tão pequenas quanto  $10^{-18}$  m, um milésimo do tamanho de um próton, sendo que todas estas partículas não apresentaram possuir estrutura, *i.e.* serem compostas.

A matéria que encontramos no nosso dia a dia é constituída por elétrons e quarks up ( $u$ ) e down ( $d$ ). Estados ligados de três quarks formam o próton ( $uud$ ) e o nêutron ( $udd$ ), os quais por sua vez combinam-se para constituir o núcleo atômico. Os quarks, que formam os prótons e nêutrons, são ligados pela força forte através da troca de glúons. Por outro lado, a força entre um elétron e o núcleo atômico é devida à troca de fótons. Numa primeira aproximação, os átomos são compostos de quarks e elétrons, porém numa descrição mais precisa devemos também incluir os fótons e glúons responsáveis pelas forças necessárias para manter o sistema unido. Apesar dos neutrinos sofrerem ação apenas da força fraca e não formarem estados ligados, eles são muito importantes para os processos de geração de energia que ocorrem em estrelas tais como o Sol. Portanto, devemos acrescentar o neutrino do elétron à lista das partículas relevantes para a matéria que observarmos a nossa volta.

Em Física de Partículas, dizemos que os quarks up e down, o elétron e seu respectivo neutrino formam a primeira família. Após várias décadas de experimentos ficou estabelecido que existem duas réplicas da primeira família diferindo apenas no fato de seus membros serem mais pesados que

os correspondentes da primeira família; vide quadro da página anterior. Até hoje não existe uma explicação do porquê da existência de cópias da primeira família, sendo esta uma das questões em aberto da Física de Partículas.

O múon e o tau são partículas possuem as mesmas propriedades dos elétrons, diferindo destes apenas por serem mais pesados; a massa do múon (tau) é aproximadamente 200 (1800) vezes a massa do elétron. Analogamente, os pares de quarks charme e estranho bem como bottom e top são cópias mais pesadas dos quarks up e down da primeira família. É interessante notar que o quark top é uma partícula elementar cuja massa é da ordem da massa de um átomo de ouro! Apesar disto ele é fundamental e suas propriedades iguais às dos quarks up e charme. Quanto aos neutrinos, estes são partículas fantásticas. Por não terem carga elétrica a sua interação com a matéria é muito fraca, tanto que os neutrinos provenientes do Sol têm um livre caminho médio de um ano luz em um meio material como a Terra! Por isto, os experimentos de neutrinos são muito difíceis e só agora estamos começando a ter uma clara visão de suas propriedades, tais como suas pequeníssimas massas.

Teoricamente várias propriedades das partículas elementares são bem sintetizadas pelo modelo padrão. Em primeiro lugar, este é uma teoria relativística, como devem ser todas as teorias de partículas, para que possa explicar a produção e a destruição de partículas utilizando a equivalência entre massa e energia. Além disso, o modelo padrão é uma teoria de “gauge” a qual nada mais é do que uma “generalização” do eletromagnetismo para as interações fracas e fortes. Por exemplo, sabemos que a Mecânica Quântica é invariante por uma redefinição de fase global, *i.e.* em todos os pontos do espaço, de todas as partículas já que os observáveis estão relacionados ao módulo quadrado do estado. Se requerermos que a Física não mude quando fazemos transformações de fase locais, *i.e.* dependentes do ponto do espaço, vemos que isso só ocorre se tivermos um campo eletromagnético pois podemos absorver vários termos extras, que potencialmente destruiriam a simetria, na redefinição do campo eletromagnético através de uma transformação de gauge deste. Teorias de “gauge” são construídas impondo-se que modelo seja invariante por transformações de simetria locais, o que somente é possível com a inclusão de novas forças análogas à eletromagnética, servindo como guia para a descrição de forças.

Uma das grandes virtudes do modelo padrão é a unificação das forças, a exemplo do que foi feito por Maxwell no eletromagnetismo, o qual mostrou que a força elétrica e a magnética são indissociáveis. O modelo padrão unifica

a força fraca e a eletromagnética uma única estrutura. Mais ainda, ele emprega o mesmo formalismo, teorias de “gauge”, para descrever a força forte, alimentando a esperança de que um dia descrevamos todas as forças de maneira unificada.

Um elemento importante no modelo padrão é o de quebra de simetria, ou seja, as equações que descrevem a teoria podem ser invariantes por uma dada transformação enquanto que a solução de mínima energia não o é. Apesar de estranho, este fenômeno ocorre em Física Clássica! Por exemplo, consideremos uma vareta flexível cilíndrica colocada na posição vertical. Este sistema claramente exibe uma simetria de rotação ao redor da direção vertical. Quando uma força vertical age no extremo da vareta, esta inicialmente apenas se comprime continuando a exibir esta simetria. Todavia, quando a força é maior que um valor crítico, a barra fica curvada aparentemente quebrando a simetria de rotação em torno do eixo vertical! A quebra de simetria é apenas aparente pois existem várias configurações possíveis com a mesma energia as quais podem ser obtidas rodando a configuração inicial, ou seja, os estados do sistema não exibem a simetria explicitamente.

Mas por que devemos introduzir quebra de simetria no modelo padrão? Por uma razão muito simples: o modelo padrão não estaria de acordo com os dados experimentais pois todas as partículas teriam massa nula! Sabemos experimentalmente que os bósons de “gauge” eletrofracos  $Z_0$  e  $W^\pm$  possuem uma grande massa; a massa dos  $W^\pm$  ( $Z_0$ ) é da ordem da massa de um átomo de bromo (zircônio). Por outro lado em uma teoria de “gauge” sem quebra de simetria todas as forças tem um alcance infinito como a interação eletromagnética, o que implica que as partículas portadoras dessas forças tem massa nula, o que podemos ver utilizando as relações de incerteza da Mecânica Quântica. Mais ainda, o mecanismo de quebra de simetria é essencial para a existência dos núcleos e átomos, e conseqüentemente a nossa existência, já que sem ele a massa dos quarks up e down seriam iguais e com isso o próton seria mais pesado que nêutron pelo fato de ter uma carga elétrica não nula. Com isso o próton seria instável, decaindo em nêutrons através das interações fracas; um desastre! Por estes e outros motivos, o modelo padrão contém um mecanismo de quebra de simetria, o qual é uma estrutura adicional àquela determinada pela invariância de “gauge”.

Quase todos os elementos do modelo padrão já foram testados experimentalmente. Verificou-se que o acoplamento entre os léptons e quarks com os partículas responsáveis pelas forças estão em acordo com experimento com precisão de 0,1%. Mais ainda, apesar do modelo padrão não fixar o número

de famílias, a sua coerência matemática requer que elas “tenham o mesmo conteúdo da primeira”. Por isto o quark top era uma previsão do modelo padrão a partir do momento em que conhecíamos o quark bottom e o lépton tau, a qual foi verificada. Presentemente não existe nenhum resultado experimental que contrarie as previsões do modelo padrão. Todavia, isto não garante que este seja a verdade final já que o mecanismo de quebra de simetria ainda não foi testado, entre outras razões teóricas.

### 3 O futuro próximo: a nova revolução

O setor de quebra de simetria do modelo padrão ainda é a parte menos explorada do modelo padrão, todavia isto mudará radicalmente nos próximos anos! O modelo padrão prevê a existência de uma nova partícula, o bóson de Higgs, a qual é um resquício do mecanismo de quebra de simetria e a qual também dá origem a uma nova força, além das forças eletrofraca e forte. Até hoje, as buscas pelo bóson de Higgs levaram apenas a um limite inferior na sua massa; de aproximadamente  $114 \text{ GeV}/c^2$ . A consistência matemática (unitariedade) do modelo padrão requer que exista uma partícula associada ao mecanismo de quebra de simetria com uma massa menor que  $700 \text{ GeV}/c^2$ . Aqui a nova máquina que entrará em operação em 2007, o Large Hadron Collider (LHC) do CERN, terá um papel relevante pois devido a sua grande energia no centro de massa ( $14 \text{ TeV}$ ) será possível a descoberta de bósons de Higgs com massas até o limite associado à consistência do modelo padrão.

A descoberta ou não de um bóson de Higgs no LHC é apenas a ponta do *iceberg* de descobertas que estão por vir. No contexto do modelo padrão, todos os aspectos relacionados à massa estão ligados ao seu setor de quebra de simetria. Por exemplo, as massas dos quarks e léptons, a mistura observada entre as famílias e a origem da violação de CP (conjugação de carga e paridade) estão associadas ao setor de Higgs. Nos últimos anos vimos avanços fantásticos na Física de neutrinos bem como novas medidas e descobertas na mistura de quarks e violação de CP, os quais ainda podem ser representados pelo setor de Higgs do modelo padrão. Todavia, o LHC no mínimo fará avançar os nossos conhecimentos sobre a violação de CP, podendo levar a reformulações e extensões do modelo padrão. Mais ainda, vários experimentos de neutrinos fornecerão dados durante a próxima década, os quais podem requerer que o modelo padrão seja revisto.

Motivadas por fraquezas teóricas e estéticas do modelo padrão, tais como

o grande número de parâmetros livres (19), a saber massas, cargas, etc, várias extensões do modelo padrão foram propostas. Dentre estas, as mais em moda são supersimetria, dimensões extras e setores de quebra de simetria fortemente interagentes. Em muitos destes modelos, existem argumentos que indicam a existência de novas partículas para energias da ordem de um TeV as quais podem ser observadas no LHC. Por exemplo, um dos possíveis sinais sobre a existência de dimensões espaciais extras é a produção de mini buracos negros no LHC os quais decairiam rapidamente devido a radiação de Hawking, levando a eventos espetaculares.

Não podemos deixar de mencionar neste ponto os grandes avanços feitos e por vir em astro-física. Hoje sabemos que a maior parte da energia do universo está na forma de energia escura, da qual não sabemos a origem. Mais ainda, as observações astro-físicas também requerem a existência de matéria neutra e fracamente interagente para explicar as curvas de rotação em galáxias; o problema da matéria escura. Certamente, estas observações fornecem mais informações à Física de Partículas, pois a explicação destas questões requer a extensão do modelo padrão. Quem sabe venhamos a poder estudar estas questões também no LHC, caso a escala de energia associada a elas também seja da ordem de TeVs.

Até o momento a força mais importante no universo ainda não foi mencionada, a gravidade. Isto é devido ao fato dela ser muito fraca em comparação com as outras e de seus efeitos serem observáveis apenas quando estudamos grandes distâncias com respeito às escalas microscópicas. Todavia, é viável que esta força fique comparável às outras na escala de energias de TeV caso existam novas dimensões espaciais, e com isso o LHC poderá estudar todas as forças da natureza, da gravitacional àquela associada à quebra de simetria eletrofraca! Mesmo no cenário mais pessimista, *i.e.* no caso do modelo padrão descrever corretamente a quebra de simetria eletrofraca, teremos muitas novas descobertas no LHC pois no mínimo começaremos a entender o porquê a matéria que nos cerca existe! Mais ainda, este é só o início de uma grande viagem pois várias questões continuarão sem resposta, tais como a grande disparidade entre as massas das partículas; a massa dos neutrinos é um fator  $10^{-13}$  menor que a do quark top!