

Aula 5

10 Limitações do Modelo Padrão

Como mencionado anteriormente, o Modelo Padrão apresenta algumas limitações que se tornaram cada vez mais evidentes ao longo do desenvolvimento da física moderna. Tais dificuldades surgem porque certos fenômenos observados na natureza não podem ser descritos de forma completa pelo formalismo da teoria quântica de campos ou, pelo menos, ainda não sabemos como incorporá-los de maneira fundamental. Além disso, existem comportamentos de partículas e interações que não foram previstos pelo Modelo Padrão e que, até hoje, não possuem explicação satisfatória dentro dele.

Nesse contexto, destacam-se questões como a física dos neutrinos, a matéria escura e a energia escura. O estudo dos neutrinos, por exemplo, revelou que essas partículas possuem massa, algo não previsto originalmente pelo Modelo Padrão. Já a matéria escura e a energia escura representam componentes fundamentais do universo que afetam sua dinâmica e evolução, mas que ainda não foram detectados diretamente em experimentos de laboratório, permanecendo acessíveis apenas por meio de efeitos gravitacionais e cosmológicos.

Dito isso, esta seção tem como objetivo discutir essas questões em maior detalhe, compreendendo de que forma tais incongruências entre teoria e experimento surgem, e por que elas apontam para a necessidade de uma física além do Modelo Padrão.

10.1 Os Neutrinos

Dos objetos que mais chamam a atenção e que traz algumas complicações de formulação teórica se destacam os neutrinos. Estas são partículas neutras, de massa muito pequena, com pouquíssima interação com a matéria, e são geradas exclusivamente em decaimentos radioativos. Para esses objetos muito interessantes vamos dedicar um estudo profundo.

Vamos retornar ao cardápio do Modelo Padrão dado pela Figura 24. Note que, para cada

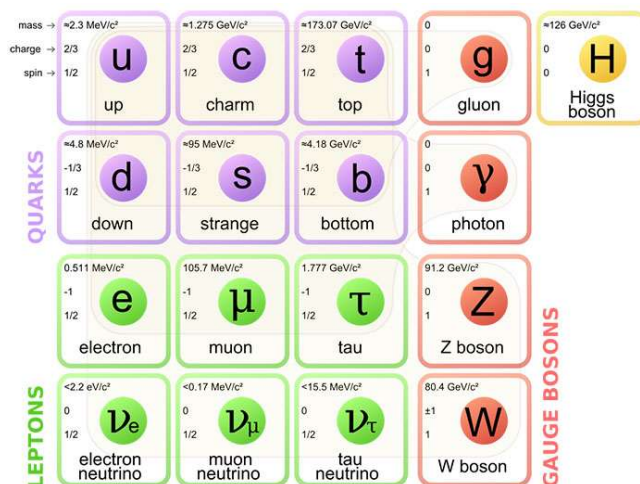


Figura 24: O cardápio de partículas do Modelo Padrão.

lépton existe um neutrino associado com propriedades diferentes: para o elétron temos o neutrino do elétron ν_e , assim como, para o múon e o tau, existem os neutrinos *muônico* ν_μ e *tauônico* ν_τ .

Historicamente, em cálculos relacionados ao Modelo Padrão, era esperado que essas partículas não tivessem massa. Experimentalmente, também não havia uma exigência formal para a existência de uma massa significativa para o neutrino. Esse paradigma se manteve até que experimentos envolvendo a detecção de neutrinos solares foram realizados.

Em suma, o Sol, por realizar uma quantidade muito grande de reações nucleares, gera uma produção intensa de neutrinos através de processos como o decaimento β mostrado anteriormente. Havia diversos cálculos que previam a quantidade de partículas que deveriam ser detectadas nesses experimentos, mas os resultados mostravam sempre apenas um terço do previsto. Esse problema foi resolvido quando os cientistas perceberam que existia um processo denominado **oscilação de sabores**, no qual, espontaneamente, os neutrinos do elétron que saíam do Sol se “transformavam” em neutrinos do múon e do tau, de modo que, ao chegar no detector, havia aproximadamente um terço de cada tipo, totalizando a quantidade de partículas esperadas.

Para que a teoria do Modelo Padrão levasse esse fato em conta, seria necessário que o neutrino tivesse massa, e que essa massa se manifestasse de uma forma especial. Essas partículas deveriam se propagar em um estado de superposição entre os três sabores diferentes (ν_e, ν_μ, ν_τ). Essa combinação de tipos distintos de partículas ocorre de maneira análoga ao experimento da dupla fenda, ou tripla fenda, para melhor comparação, mencionado anteriormente, no qual uma partícula quântica, descrita por uma função de onda, passa simultaneamente por dois ou três orifícios, exceto quando há uma medição que determina o caminho específico.

Em outras palavras, em um estado de superposição dos tipos de neutrinos descrito por uma função de onda quântica, existe uma probabilidade igual de medir qualquer um dos sabores. Assim, um experimento de detecção registraria, em média, um terço de cada tipo. Esse fato só pode ser explicado se os neutrinos possuírem massa. No entanto, os cálculos de oscilação, quando comparados com os experimentos, não fornecem a massa individual de cada neutrino, apenas a diferença de massa entre dois ou três deles que oscilam entre si.

As observações iniciais desse déficit de neutrinos do elétron foram feitas por:

- **Experimento Homestake**, conduzido pelo astrofísico Ray Davis, que detectou um déficit claro entre as décadas de 1960 e 1980 usando cloro-argônio.
- **Experimentos GALLEX/GNO e SAGE**, que observaram o mesmo fenômeno utilizando gálio.
- **Experimentos Kamiokande e Super-Kamiokande**, que confirmaram o problema utilizando detectores à base de água e verificaram que os neutrinos de fato vinham do Sol.

Esses experimentos, entretanto, não detectaram nem serviram como base direta para a proposta da oscilação de sabores. A principal razão era que os equipamentos e detectores não eram sensíveis ou projetados para medir outros tipos de neutrinos além do eletrônico.

O experimento principal que confirmou a existência da transição entre os tipos de neutrinos foi realizado no **SNO (Sudbury Neutrino Observatory)**, no Canadá, um centro de pesquisas dedicado à medição dos neutrinos provenientes do Sol. Nesse observatório, havia dois tipos de experimentos: um para medir exclusivamente neutrinos do elétron ν_e e outro para medir todos os sabores, através de processos de espalhamento. O SNO mostrou que o total de neutrinos detectados, somando-se todos os tipos, era compatível com a quantidade prevista teoricamente. Para isso, a quantidade de ν_e era, de fato, reduzida. Em outras palavras, não havia déficit, mas sim uma mudança de tipo. Esses experimentos confirmaram a oscilação de neutrinos e explicaram o que ocorria após as partículas deixarem o Sol.

Apesar de não conhecermos ainda o valor exato da massa de cada neutrino individualmente, vários experimentos importantes mediram com precisão a diferença de massa entre eles e a taxa de mistura entre os sabores distintos. Por exemplo, o Super-Kamiokande obtém informações sobre a transição entre neutrinos do múon e do tau observando raios cósmicos que interagem com a atmosfera, verificando também que essa mudança depende da direção de chegada dos raios à Terra e da distância percorrida. Outros experimentos recentes mediram diretamente essas transições e diferenças de massa a partir de neutrinos gerados em aceleradores e reatores nucleares.

O fato de os neutrinos possuírem massa indica que precisamos de uma física além do Modelo Padrão, já que essa teoria, em sua formulação original, não contempla essa característica. Essa nova física pode estar diretamente ligada à assimetria matéria-antimatéria descrita anteriormente. Além disso, uma teoria estendida pode ser fundamental para compreender a evolução cosmológica e responder questões cruciais sobre o início do universo.

Além desse problema dos neutrinos, há também a não inclusão da força gravitacional no escopo do Modelo Padrão. Esse assunto, embora mencionado algumas vezes anteriormente, será tratado agora de uma forma sistemática.

10.2 Gravidade

De fato, o gráviton, que até então é uma partícula hipotética sem massa e de spin 2, nunca foi observado, o que o torna parte de uma construção puramente teórica. Isso nos permite afirmar que **a gravidade não pertence ao Modelo Padrão**.

A interação gravitacional é descrita com êxito pela teoria da Relatividade Geral, formulada por Einstein, que trata a gravidade como uma consequência puramente geométrica do espaço-tempo no qual a matéria está imersa. Essa interação pode ser descrita por uma quantidade chamada tensor métrico $g_{\mu\nu}$, que é solução das equações de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \kappa T_{\mu\nu}. \quad (41)$$

Embora representada por uma única expressão, essa fórmula recebe o nome de equações porque contém, na verdade, um conjunto de 16 relações a serem resolvidas. Isso ocorre porque cada um dos índices gregos μ e ν pode assumir quatro valores: um representando o tempo e três representando as direções espaciais (largura, altura e comprimento). Assim, temos $4 \times 4 = 16$ componentes possíveis para esse campo. As demais grandezas na equação (41) são: $R_{\mu\nu}$ e R , o tensor e o escalar de Riemann, respectivamente; κ , uma constante de acoplamento; e $T_{\mu\nu}$, o tensor energia-momento.

As quantidades $R_{\mu\nu}$ e R descrevem a geometria do espaço-tempo, isto é, como ele se curva e com qual intensidade. O termo $T_{\mu\nu}$, por sua vez, descreve a distribuição de matéria e energia, indicando como as massas estão espalhadas, quais são seus valores de energia e momento. Em outras palavras, as equações de Einstein afirmam que, ao colocar um corpo no espaço, ele deforma a região ao redor, gerando um campo gravitacional característico. Por outro lado, essas mesmas equações também descrevem como um corpo se move quando inserido em uma configuração específica de espaço-tempo, isto é, diante de uma curvatura já existente.

Assim como o Modelo Padrão, a Relatividade Geral também é uma teoria de campos. Contudo, o campo $g_{\mu\nu}$ é clássico e não quântico. Mesmo assim, essa teoria descreve com sucesso inúmeros sistemas gravitacionais: movimentos planetários, galáxias, buracos negros e até a evolução do universo como um todo. As limitações dessa formulação aparecem quando analisamos sistemas de escala muito pequena, sobretudo no regime das partículas elementares, exatamente onde o Modelo Padrão atua. Quando tentamos introduzir formalismos quânticos na Relatividade Geral, como se

faz com as outras forças fundamentais, surgem dificuldades matemáticas sérias, como resultados infinitos e interpretações sem sentido físico, sem qualquer análogo experimental.

O principal motivo para buscar uma formulação que unifique as quatro forças fundamentais vem de uma análise histórica da ciência. Assim como as forças elétrica e magnética foram unificadas por Maxwell no século XIX como diferentes aspectos de uma mesma interação, e como o Modelo Padrão unificou a força fraca e a eletromagnética em uma única interação eletrofraca, existe um desejo, por razões de simetria e elegância teórica, de alcançar uma formulação única e fundamental.

Em outras palavras, espera-se que exista uma única interação primordial, de modo que todas as quatro forças conhecidas sejam manifestações diferentes de um mesmo princípio mais profundo. A essa busca damos o nome de **Grande Unificação** ou, para alguns, a chamada **Teoria de Tudo**.

Mas, antes disso, uma explicação bastante plausível, com forte viés experimental, é que as teorias unificadas só puderam ser compreendidas à medida que o avanço tecnológico permitiu experimentos mais precisos. Por exemplo, a interação eletrofraca só foi confirmada após a evolução dos aceleradores de partículas, indicando que, conforme atingimos energias mais altas, nossas conjecturas sobre unificações tornam-se mais confiáveis. Esse ponto fica mais claro quando analisamos as teorias que buscam unificar as interações eletrofraca e forte, as quais indicam que tal unificação ocorreria em energias da ordem de 10^{12} TeV. No entanto, note que as energias mais altas alcançadas no LHC estão em torno de apenas 14 TeV.

Isso sugere que, indo além e considerando a chamada Teoria de Tudo, as energias necessárias seriam da ordem de 10^{16} TeV (a chamada **energia de Planck**), correspondente à escala energética do início do Universo. As principais candidatas para essa superunificação são a **Teoria das Cordas** e a **Gravidade Quântica em Loop**, que discutiremos mais adiante. Na primeira abordagem, as partículas fundamentais do Modelo Padrão deixam de ser tratadas como pontos sem estrutura interna e passam a ser descritas como pequenas cordas vibrantes, incorporando naturalmente a gravidade quântica e prevendo a existência do gráviton. A segunda abordagem, baseada em loops, quantiza o próprio espaço-tempo diretamente, em vez de recorrer a novas partículas fundamentais. Apesar de inovadoras e elegantes, ambas ainda carecem de evidências experimentais diretas e conclusivas.

Embora não possamos alcançar energias tão extremas para detectar diretamente o gráviton ou comprovar a unificação de todas as forças, há formas indiretas de buscar sinais dessas teorias fundamentais em escalas de energia mais acessíveis. Tais teorias preveem, por exemplo, **quebras sutis de simetria** ou **partículas exóticas não fundamentais**, que poderiam ser detectadas em experimentos atuais ou futuros. Além disso, ao explorar energias mais intensas, poderiam surgir reações que o Modelo Padrão não prevê, fornecendo pistas de uma física mais profunda. Outros experimentos relevantes incluem observatórios preparados para medir **ondas gravitacionais**, **radiação cósmica de fundo** e outras características cosmológicas, capazes de revelar informações sobre o universo primordial, quando a física possivelmente era unificada.

Até hoje, não existe nenhuma evidência experimental direta dessa unificação. No entanto, tais características representam horizontes e alvos centrais para o desenvolvimento da física teórica contemporânea. Além disso, o Modelo Padrão ainda enfrenta outros desafios, como a existência da matéria escura e da energia escura, tópicos que serão abordados nas próximas seções.

10.3 Matéria escura

No contexto da cosmologia, a matéria escura é um dos temas mais antigos e controversos da física moderna. Trata-se de uma forma de matéria que não interage de maneira direta com a matéria ordinária, ou matéria bariônica, exceto por meio da interação gravitacional. Por essa razão, ela não

pode ser detectada em experimentos de laboratório convencionais, sendo sua existência inferida apenas por efeitos gravitacionais em escalas astrofísicas e cosmológicas.

A história da matéria escura remonta o século XX, com Jacobus Kapteyn (1922) e Jan Oort (1932), onde ao analisarem sistemas estelares ao longo do plano da Via Láctea, concluíram que havia mais massa do que aquela observada diretamente em estrelas e nuvens de gás. Foi Oort quem utilizou pela primeira vez a expressão *dark matter*, marcando a origem do termo.

Contudo, o estudo mais decisivo sobre a concepção de matéria escura foi realizado por Fritz Zwicky, na década de 1930. Ao investigar o aglomerado de galáxias de Coma, Zwicky utilizou a relação entre energia cinética e energia potencial do sistema, concluindo que as galáxias se moviam rápido demais para que apenas a massa visível fosse capaz de mantê-las gravitacionalmente ligadas. A partir disso, propôs a existência de uma grande quantidade de matéria invisível.

Um dos indícios mais fortes e diretos da matéria escura surgiu entre as décadas de 1960 e 1970, a partir dos estudos de Kent Ford e Vera Rubin sobre a rotação de galáxias espirais. A expectativa era que a velocidade orbital das estrelas diminuísse com a distância ao centro galáctico, de forma análoga ao que ocorre no Sistema Solar. No entanto, as observações mostraram que a velocidade se mantinha aproximadamente constante, como se houvesse uma grande quantidade de massa invisível, distribuída em forma de um halo que envolvia as galáxias. Uma representação esquemática dessa interpretação pode ser vista na Fig. (25). O gráfico ilustra o estudo de Vera Rubin. Nesta representação, conforme nos afastamos do centro da galáxia, o resultado esperado era que a velocidade orbital das estrelas diminuísse com a distância, de forma análoga ao que ocorre no Sistema Solar. No entanto, os dados experimentais mostraram que a velocidade se mantém aproximadamente constante, evidenciando a presença de uma quantidade significativa de matéria invisível — a matéria escura — responsável por evitar a queda da velocidade com o aumento da distância.

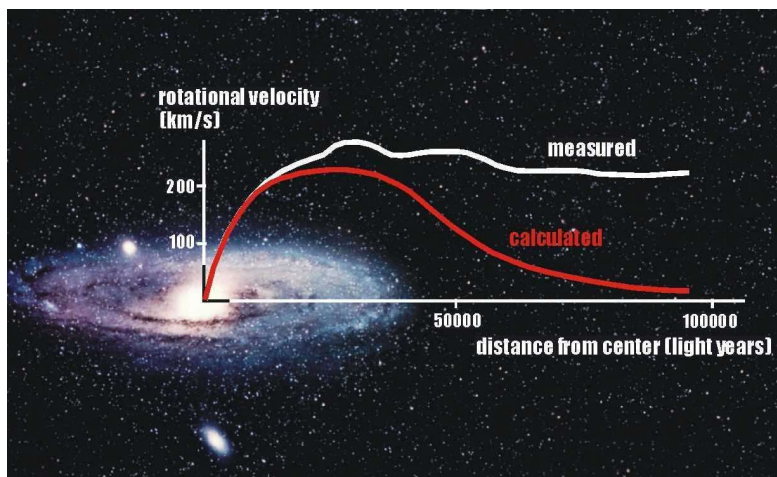


Figura 25: Representação visual do que era esperado e o que foi medido no experimento da velocidade angular ao longo da galáxia

Atualmente, estima-se que a matéria escura corresponda a cerca de 27% do conteúdo energético total do universo, desempenhando um papel fundamental na formação de estruturas cósmicas e na evolução do cosmos. No modelo cosmológico mais aceito atualmente, o Λ CDM, que descreve com alta precisão a origem e evolução das estruturas no universo, a matéria escura é considerada uma componente “fria”, isto é, não relativística. Alguns estudos sugerem que as partículas de matéria escura poderiam ter massas da ordem de 0,02% da massa do elétron. No entanto, sua verdadeira

natureza ainda é desconhecida, razão pela qual muitas vezes é chamada de “matéria perdida do universo”.

Apesar disso, a matéria escura permanece como um dos tópicos mais debatidos na física contemporânea, já que ainda não existe uma descrição que concilie, de forma definitiva, os resultados teóricos e experimentais. No âmbito da teoria quântica de campos, diversas propostas têm sido formuladas para explicar a natureza dessa componente. Como a matéria escura não faz parte do Modelo Padrão, diferentes partículas hipotéticas surgem como candidatas, entre elas: as WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*), previstas em modelos de supersimetria; os áxions, associados a extensões da cromodinâmica quântica (QCD); e os neutrinos estéreis, que interagem de forma extremamente fraca com as partículas do Modelo Padrão.

Esses candidatos, e suas implicações teóricas e experimentais, serão discutidos em maior detalhe em seções posteriores do curso.

10.4 Energia escura

De forma análoga à matéria escura, a energia escura é uma forma misteriosa de energia que estaria distribuída por todo o universo e diretamente associada à sua expansão acelerada. Apesar da semelhança nos nomes, energia escura e matéria escura não estão relacionadas entre si, cada uma estando vinculada a fenômenos distintos. No caso da energia escura, ela atua como uma pressão negativa, responsável por expandir toda a estrutura do universo.

É comum imaginar que essa expansão esteja diretamente ligada apenas ao afastamento dos astros. Embora essa interpretação não seja totalmente incorreta, o conceito é mais profundo: não são apenas as distâncias entre os astros que estão aumentando, mas sim o próprio tecido do espaço-tempo que se expande. Como consequência, os objetos celestes também se afastam uns dos outros devido à expansão do próprio espaço. Uma representação visual desse processo pode ser vista na Fig. (26).

A expansão do universo foi descoberta no final da década de 1920 por Edwin Hubble (1889–1953), a partir da análise do desvio para o vermelho (redshift) de galáxias distantes. Esse resultado marcou o início da cosmologia observacional moderna e levou à definição da constante de Hubble, relacionada à taxa de expansão do universo. Estimativas atuais, baseadas em observações do satélite *Planck*, indicam que o universo possui aproximadamente 13,8 bilhões de anos.

A Teoria do Big Bang ganhou força a partir dos trabalhos de George Gamow e colaboradores, em 1948, que propuseram a nucleossíntese primordial como origem dos elementos leves, como hidrogênio e hélio. Uma evidência decisiva surgiu em 1965, com a detecção da radiação cósmica de fundo em micro-ondas por Arno Penzias e Robert Wilson, confirmando previsões teóricas sobre as condições iniciais do universo.

Em 1998, observações de supernovas do tipo Ia revelaram que a expansão do universo não está desacelerando, como se supunha, mas sim acelerando. Esse resultado surpreendente levou à introdução do conceito de *energia escura*, um componente ainda desconhecido que hoje se estima corresponder a cerca de 70% da densidade de energia do cosmos, contra 25% de matéria escura e apenas 5% de matéria bariônica. Esse achado foi confirmado por duas colaborações independentes, lideradas por Saul Perlmutter e Adam Riess, que receberam o Prêmio Nobel de Física em 2011.

A energia escura pode ser interpretada, no modelo mais simples, como uma constante cosmológica introduzida por Einstein em 1917, mas ainda não se sabe se ela é realmente uma constante fundamental ou se se trata de um campo dinâmico que varia no espaço-tempo. Para investigar sua natureza, grandes colaborações internacionais, como o *Dark Energy Survey* (DES), buscam medir com precisão a expansão cósmica, utilizando observações de galáxias e supernovas como “velas

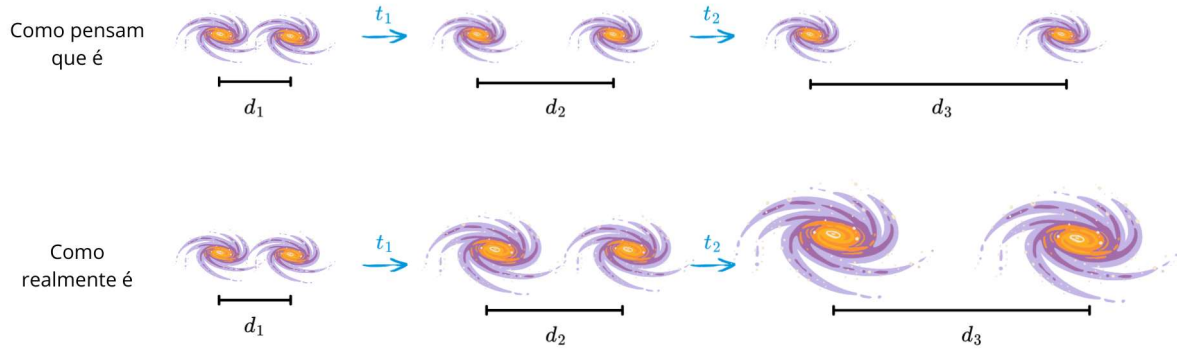


Figura 26: Representação visual da expansão cósmica, contrastando o que se imaginava inicialmente com os resultados experimentais.

padrão”.

O chamado setor escuro do universo, composto por matéria escura e energia escura, continua sendo um dos maiores enigmas da física contemporânea. Enquanto a matéria escura poderia ser explicada pela existência de novas partículas além do Modelo Padrão, a energia escura desafia até mesmo a Relatividade Geral, podendo indicar a necessidade de teorias gravitacionais alternativas, como a Dinâmica Newtoniana Modificada (MOND).

Assim, tanto a matéria escura quanto a energia escura mostram que nossa compreensão atual do universo ainda é incompleta e sugerem que novos paradigmas físicos poderão ser necessários no futuro.

A discussão sobre a matéria e a energia escura revela limitações fundamentais do Modelo Padrão da física de partículas. Embora essa teoria descreva com grande precisão as interações fundamentais conhecidas, ela não contempla a maior parte do conteúdo do universo: cerca de 95%, distribuídos entre matéria escura ($\sim 25\%$) e energia escura ($\sim 70\%$). A ausência de candidatos naturais para esses componentes no Modelo Padrão indica que sua estrutura, por mais bem-sucedida que seja, é incompleta.

Diversas propostas buscam superar essas limitações. No contexto da energia escura, além da interpretação como constante cosmológica, investigam-se cenários envolvendo campos escalares dinâmicos, como o *quintessence*, ou ainda modificações da Relatividade Geral em escalas cosmológicas.

Essas questões apontam para a necessidade de uma nova física além do Modelo Padrão, seja pela introdução de novas partículas, novos campos ou pela revisão da própria teoria gravitacional. Assim, a busca por compreender o setor escuro do universo não é apenas um desafio experimental e observacional, mas também uma oportunidade única de avançar na formulação de teorias mais fundamentais que unifiquem a física de partículas, a cosmologia e a gravitação.