

# Aula 1 - O Que é Física de Partículas?

## 1 Introdução

A Física de Partículas é a área de estudo da física que tem como objetivo a descrição dos constituintes fundamentais da matéria e de como estes interagem entre si. Ela busca responder perguntas como: (i) De que são feitos os átomos? (ii) O que há dentro dos prótons e nêutrons? (iii) O que são partículas fundamentais?, entre outras.

Apesar de conceitos referentes à composição da matéria existirem desde a Grécia Antiga, com pensadores como Demócrito e Leucipo, a Física de Partículas se estabeleceu como disciplina científica no final do século XIX e início do século XX, com a descoberta do elétron e o desenvolvimento da teoria atômica.

Mas afinal, do que a matéria é realmente composta? É correto dizer que, em nível subatômico, a matéria é formada por pequenos aglomerados de "coisas", que estão muito distantes uns dos outros. Além disso, existem diferentes tipos de aglomerados (elétrons, prótons, nêutrons, neutrinos etc.), que se multiplicam como cópias "infinitamente" no espaço para constituir tudo o que nos forma.

Caso essa aparente infinidade de partículas te deixe receoso em estudar esses conceitos, imaginando que um sistema com tantas partículas seja muito complexo, não se preocupe, pois temos uma vantagem importante: essas cópias são verdadeiras **cópias**, indistinguíveis entre si. Se você conhece um elétron, conhece todos os outros e, com isso, a física de um se aplica a todos.

Portanto, inicialmente, vamos amadurecer as ideias sobre elementaridade falando um pouco sobre as escalas de distância e, introduzir conceitos relacionados aos diferentes tipos de partículas elementares, abordando a estrutura da matéria e sua principal composição.

## 2 Escalas de distância

A física descreve a realidade em diferentes escalas de comprimento, e diferentes teorias são necessárias para cada regime. Na seção anterior discutimos os principais constituintes da matéria, fazendo essa descrição por uma visão mais macroscópica, indo para o microscópico. Porém, deixamos em aberto em que escala de distância esses conceitos estão ocorrendo, apenas mencionamos *macro* e *micro*. Dito isso, nessa seção vamos fazer tal abordagem, demonstrando as escalas absurdas que temos entre o mundo macroscópico e microscópico.

- $\sim 10^0$  a  $10^5$  metros:
  - Escala macroscópica cotidiana (humanos, carros, prédios, montanhas, cidades)
  - Física aplicável:
    - \* Mecânica Clássica (Newtoniana)
    - \* Termodinâmica
    - \* Eletromagnetismo clássico
  - Limitações: Não considera efeitos relativísticos ou quânticos
- $\sim 10^{-3}$  a  $10^0$  metros:

- Escala mesoscópica (grãos de areia, cabelos, insetos, dispositivos eletrônicos)
- Física aplicável:
  - \* Mecânica clássica ainda válida
  - \* Mecânica estatística se torna relevante
  - \* Fenômenos de transição entre regimes clássico/quântico (nanotecnologia)
- $\sim 10^{-9}$  a  $10^{-7}$ :
  - Escala atômica e molecular (moléculas de água,  $\sim 0,3$  nm, átomos,  $\sim 0,1$  nm, etc)
  - Física aplicável:
    - \* Mecânica quântica necessária
    - \* Modelo atômico de Schrödinger
    - \* Química quântica
- $\sim 10^{-15}$  a  $10^{-10}$  metros:
  - Escala nuclear (núcleos atômicos,  $\sim 1$  fm, raio do próton/nêutron)
  - Física aplicável:
    - \* Mecânica quântica relativística
    - \* Física nuclear
    - \* Força forte e fraca entram em cena
    - \* Eletrodinâmica quântica (QED)
- $\sim 10^{-18}$  a  $10^{-15}$  metros:
  - Escala das partículas elementares (quarks, léptons e bósons)
  - Física aplicável:
    - \* Teoria Quântica de Campos
    - \* Modelo Padrão como um todo
    - \* Física de altas energias e Colisores (LHC)

Uma visão geral pode ser vista da Tabela 1.

Distância (m)	Estrutura	Teoria Dominante
$10^5$ – $10^0$	Macroscópica (corpos, engenharia)	Mecânica clássica
$10^0$ – $10^{-3}$	Mesoscópica, biologia, dispositivos	Termodinâmica, Mecânica clássica
$10^{-7}$ – $10^{-9}$	Moléculas, átomos	Mecânica Quântica
$10^{-15}$ – $10^{-10}$	Núcleos, prótons, nêutrons	Física Nuclear
$10^{-18}$ – $10^{-15}$	Quarks, léptons, bósons	Teoria Quântica de Campos
$\sim 10^{-35}$	Regime extremo (teórico)	Teorias de Gravitação Quântica

Tabela 1: Escalas de distância e as teorias físicas correspondentes

### 3 O Papel da Física Moderna no Estudo da Estrutura da Matéria

Até o momento, conhecemos os principais constituintes da matéria e as partículas que intermedeiam as interações. Além disso, discutimos as principais escalas de distância nas quais essas partículas podem compor um sistema físico. Esta seção será dedicada a mostrar como esses conceitos moldam a física de partículas como a conhecemos hoje, descrevendo as principais teorias que governam as interações fundamentais.

Até o século XIX, acreditava-se que os átomos eram indivisíveis, e a física era bem descrita pelas leis de Newton (mecânica), Maxwell (eletromagnetismo) e Clausius/Boltzmann (termodinâmica estatística). No entanto, uma série de experimentos no final do século XIX e início do século XX revelou limitações profundas nessa visão clássica da natureza.

A resposta a essas limitações levou ao nascimento da física moderna, que se apoia em duas grandes teorias:

- Relatividade (Einstein, 1905 e 1915);
- Mecânica quântica (Planck, Schrödinger, Heisenberg, entre outros).

Essas teorias permitiram um avanço significativo na compreensão da estrutura da matéria em escalas microscópicas e energias elevadas, inaugurando uma nova era na física. A partir disso, tornou-se possível descrever fenômenos como a estabilidade dos átomos, o comportamento de partículas subatômicas e a dinâmica das interações fundamentais.

Dito isso, faremos a seguir uma abordagem histórica dos principais tópicos referentes à estrutura da matéria, enfatizando, por meio do contexto histórico, a visão predominante do que se entendia por átomo.

#### 3.1 O Atomismo na Filosofia Grega

Pode-se dizer que a Grécia Antiga é o berço de onde surgiram os primeiros ideais de grande parte do desenvolvimento científico e tecnológico, seja na arquitetura, matemática, filosofia ou até mesmo na física. Devido, em grande parte, a Tales de Mileto e sua escola, grandes pensadores dedicaram seu tempo ao desenvolvimento do conhecimento acerca do comportamento da natureza, em especial da elementaridade que compõe as coisas ao nosso redor. Leucipo e, posteriormente, seu discípulo Demócrito propuseram a ideia de um bloco fundamental a partir do qual toda a matéria poderia ser construída. A ideia de que toda a matéria é composta por unidades indivisíveis surgiu então, por volta do século V a.C., com estes dois filósofos. Essa concepção ficou conhecida como *atomismo*.

Esta peça elementar se chamaria átomo, o qual, juntamente com o vazio, poderia se rearranjar de formas múltiplas para dar origem às inúmeras formas que se conheciam. Este conjunto de duas ferramentas era o casamento perfeito e candidato primordial para a explicação da constituição inicial da matéria observável. Os átomos, imutáveis e indivisíveis por não conterem um vazio interior, se movem e interagem entre si sobre um palco: o vazio, o nada; de forma que suas infinitas particularidades, formas e versões poderiam atuar em prol da distinção entre estes entes, particularmente, estranhos.

*“Tudo o que existe é o resultado de átomos e do vazio.”*  
Demócrito

Em outras palavras, segundo essa doutrina, o universo seria formado por duas entidades fundamentais:

- Átomos: partículas indivisíveis, eternas, homogêneas e imutáveis;
- Vazio: espaço no qual os átomos se movem livremente.

Os átomos, segundo Demócrito, diferiam entre si apenas em forma, tamanho e posição. Combinando-se de diferentes maneiras, eles dariam origem a todas as coisas observáveis. O movimento dos átomos seria eterno e natural, não exigindo causas externas, o que tornava essa visão profundamente materialista.

Essa proposta foi notavelmente avançada para sua época, pois dispensava explicações sobrenaturais para os fenômenos naturais e buscava compreender o mundo com base em princípios racionais e mecânicos. No entanto, o atomismo era uma teoria essencialmente filosófica e especulativa, sem base experimental.

Durante séculos, essa visão foi marginalizada por correntes filosóficas como o aristotelismo, que defendiam a divisibilidade contínua da matéria. Somente no século XIX, com o desenvolvimento da química moderna, o conceito de átomo voltou a ganhar força, agora com suporte empírico.

O modelo de Demócrito não é um modelo físico no sentido moderno, mas uma ideia fundacional que antecipa a noção de quantização da matéria, central para a física contemporânea.

## 3.2 O Modelo de Dalton

Antes do surgimento das ideias revolucionárias da relatividade e da mecânica quântica, o entendimento predominante sobre a constituição da matéria era baseado em concepções clássicas. A principal delas propunha que toda substância seria composta por pequenas esferas indivisíveis, os átomos. Essa formulação foi sistematizada por John Dalton, em 1808, marcando o início da teoria atômica moderna. Em seu modelo, Dalton propôs que:

- Toda matéria é formada por átomos indivisíveis e indestrutíveis;
- Os átomos de um mesmo elemento químico são idênticos em massa e propriedades;
- Compostos são formados por combinações fixas de diferentes tipos de átomos.

Ou seja, mais de 2000 anos depois das concepções gregas, John Dalton (1803), meteorólogo, estudando as particularidades dos gases que compunham a atmosfera, propôs que estes eram compostos de, como ele chamava, *partículas últimas da matéria*, que interagiam entre si através de uma força repulsiva, descrita pela mecânica newtoniana, cuja intensidade diminuía com a distância relativa entre elas. Mesmo sem explicar o cerne da questão sobre os átomos, ele defendia sua existência e apresentava suas características com bastante êxito, principalmente sobre o peso dos componentes químicos, utilizando o formalismo da gravitação universal. Baseado nessas ideias, podemos caracterizar o modelo atômico de Dalton como sendo uma esfera maciça, indivisível e indestrutível.

Apesar de útil para explicar leis da química, como a conservação da massa e as proporções constantes, o modelo de Dalton era puramente teórico e carecia de comprovação experimental direta.

### 3.3 O Modelo de Thomson

Entre a metade e o fim do século XIX, muitos cientistas dedicavam seus esforços ao estudo do comportamento dos raios de descargas elétricas em gases enclausurados por tubos. Estes experimentos de raios catódicos, cuja natureza ainda era incerta, foram fundamentais para a descrição da composição dos gases, isto é, eram o caminho direto para a classificação das propriedades das partículas últimas da matéria.

A partir de diversos experimentos, em 1897, Thomson pôde concluir que estas estranhas descargas eram compostas por partículas eletricamente carregadas. A experimentação crucial que levou à aferição dessa afirmação foi o comportamento desses feixes quando expostos a duas placas eletricamente carregadas (com cargas opostas). Estes, por sua vez, curvavam a trajetória dessas partículas e, além disso, se dirigiam diretamente à placa cuja carga era positiva, levando à primeira detecção do elétron, o qual havia sido proposto teoricamente anos antes.

Ademais, Thomson, medindo a carga e a massa desses elétrons, percebeu, ainda, que esses valores eram os mesmos independentemente dos gases, materiais ou formas diferentes de experimentação, levando-o à conclusão de que estes estavam presentes em toda a matéria.

Com tudo isso, ficou claro que o átomo não era indivisível, contrariando Dalton.

Thomson propôs então um novo modelo atômico, conhecido como o modelo do “pudim de passas”, no qual o átomo seria uma esfera de carga positiva com elétrons negativamente carregados incrustados em seu interior, como passas em um bolo.

- Esse modelo era coerente com os dados experimentais da época;
- No entanto, apresentava problemas, especialmente ao explicar o espalhamento de partículas alfa ao interagirem com a matéria.

### 3.4 O Experimento de Rutherford

A validação e reformulação da estrutura atômica ganhou novo impulso com o experimento conduzido por Ernest Rutherford e seus colaboradores, Hans Geiger e Ernest Marsden, em 1909.

No experimento, um feixe de partículas alfa (núcleos de hélio) era disparado contra uma fina lâmina de ouro. De acordo com o modelo de Thomson, esperava-se que as partículas sofressem apenas pequenos desvios. No entanto, os resultados foram surpreendentes:

- A grande maioria das partículas atravessava a lâmina sem qualquer desvio;
- Uma pequena fração sofria desvios angulares significativos;
- Algumas poucas partículas eram refletidas quase diretamente de volta.

Essas observações levaram Rutherford a propor, em 1911, um novo modelo atômico com as seguintes características:

- A carga positiva e quase toda a massa do átomo estão concentradas em uma região central muito pequena: o núcleo;
- Os elétrons orbitam ao redor desse núcleo, como planetas ao redor do Sol;

- O átomo é majoritariamente vazio, o que explica o livre trânsito da maioria das partículas alfa.

Esse modelo, embora mais realista, também apresentava dificuldades dentro da física clássica: segundo as equações do eletromagnetismo, um elétron em órbita acelerada deveria emitir radiação continuamente, perdendo energia e colapsando rapidamente no núcleo. Isso indicava que o modelo de Rutherford, embora inovador, carecia de um novo arcabouço teórico, um desafio que seria enfrentado com o surgimento da mecânica quântica.

### 3.5 O Modelo de Bohr

Após as grandes contribuições de Max Planck com suas pesquisas e descobertas sobre a radiação de corpo negro, o físico Niels Bohr, aluno de Rutherford, tentou unir o modelo atômico desenvolvido por seu mentor com os resultados obtidos a partir das observações de Planck. Na tentativa de solucionar os problemas existentes, ele percebeu que basear-se nos desenvolvimentos da física clássica da época era o principal motivo de não conseguir obter explicações satisfatórias; isso o levava a crer que era necessária uma nova física.

Sendo assim, sua contribuição foi adicionar os ingredientes dessa teoria quântica da física ao modelo planetário do átomo. O modelo de Bohr, então, era constituído de:

- Núcleos positivos pesados circundados por elétrons;
- Os elétrons desempenham órbitas circulares fixas;
- As órbitas possíveis são espaçadas; não existe uma sequência contínua de órbitas;
- Para cada órbita está associado um valor de energia para o elétron;
- Os elétrons podem saltar de órbita: para cima, absorvendo radiação; e para baixo, emitindo radiação;
- Estas transições só podem ser feitas se, e somente se, a energia recebida ou doada for idêntica à diferença de energia entre as órbitas às quais estão sujeitas à transição.

Posteriormente, inicia-se a era da detecção de mais partículas.

### 3.6 O Próton e o Nêutron

Novamente, Rutherford, com seu experimento de partículas alfa, se fez fundamental em 1919. Mas, dessa vez, a incidência dessas partículas radioativas foi sobre um alvo que continha átomos de nitrogênio, em vez de uma folha de ouro. Seus resultados foram diferentes do esperado na época, mas similares aos estudos que envolviam átomos de hidrogênio. Logo, percebeu que seu alvo estava emitindo núcleos desse átomo, mesmo sem que houvesse nenhum material contendo hidrogênio presente.

Isso, posteriormente, o levou a crer que era possível remover partículas dos núcleos dos elementos, propondo então a existência de uma partícula muito pesada e positiva, denominada próton. Além disso, ele propôs que poderia existir outro constituinte do núcleo, possuindo carga neutra e massa similar à do próton.

Baseando-se nisso, em uma busca incessante através de diversos experimentos, James Chadwick, em 1932, conseguiu detectar essa partícula, nomeando-a como nêutron. Esta era entendida inicialmente como sendo um acoplamento entre o elétron e o próton, explicando assim sua carga neutra. Entretanto, essa ligação não poderia ser concebida como devida à força eletromagnética, por causa de inconsistências relacionadas à física clássica conhecida até então. Essa interação deveria ter um caráter diferente e ser mais intensa que a força elétrica, sendo assim nomeada, pela primeira vez na história, como força forte.

### 3.7 Mais partículas

Com o passar do tempo e o aumento da tecnologia relacionada aos experimentos realizados, bem como à criação, ampliação e aprimoramento dos aceleradores de partículas, foi possível detectar uma gama enorme de partículas novas à época. Sendo assim, fazendo uma breve revisão histórica, podemos elencar as seguintes descobertas principais:

- O fóton, a partícula da luz, em 1923;
- O múon, um “primo” do elétron que possui características similares a este, em 1963;
- Um neutrino, de massa bem pequena e carga neutra, em 1956;
- Um segundo neutrino, um pouco diferente do anterior, em 1962;
- Os quarks: \*strange\* em 1964, \*up\* e \*down\* em 1968, e \*charm\* em 1974.

Estes últimos merecem um comentário especial, pois havia um desenvolvimento teórico do físico Gell-Mann que classificava, caracterizava e catalogava essas partículas a partir de simetrias, utilizando ideias oriundas da teoria de grupos. Essas relações permitiam classificá-las em grupos e descrever como se comportavam perante determinado tipo de interação.

Partindo disso, foi proposto que os prótons e nêutrons não eram fundamentais, mas sim compostos de três quarks cada um.

Mais além, as descobertas não pararam, sendo catalogadas ainda:

- O tau, mais um primo do elétron, detectado sendo mais pesado que o múon, em 1975;
- O quark \*bottom\*, em 1977;
- Os bósons W e Z, em 1983;
- O quark \*top\*, o sexto e último, descoberto em 1995;
- Um terceiro neutrino, em 2000;
- O bóson de Higgs, anteriormente proposto, finalmente detectado no LHC em 2012;

Essas descobertas finalizam um ciclo de identificação do que classificamos como partículas elementares.

Para falar mais sobre elas, é necessário fazer uma breve discussão, como se segue.

## 4 A estrutura da matéria

Quando falamos de matéria, estamos nos referindo a todos os componentes que formam o universo. Neste contexto, nosso escopo abrange elementos que vão desde o mundo macroscópico até as partículas fundamentais da natureza. Essa **hierarquia de constituintes** revela uma nova realidade física, com leis próprias, que dependem da escala de tamanho estudada.

- **Matéria macroscópica:** É o nível com o qual interagimos no nosso dia a dia, como objetos, substâncias, corpos. Essa matéria é composta inteiramente por moléculas e átomos. Seu estudo abrange diversas áreas da física, como a mecânica clássica, química, termodinâmica, cosmologia e relatividade geral.
- **Moléculas e átomos:** Moléculas são arranjos estáveis de dois ou mais átomos ligados por interações eletromagnéticas. Os átomos, por sua vez, são constituídos por elétrons (com carga negativa), que orbitam o núcleo, e pelo núcleo atômico, composto por prótons e nêutrons.
- **Núcleo atômico:** O núcleo é formado por prótons (carga +1) e nêutrons (carga 0), chamados em conjunto de *núcleons*. Esses núcleons estão ligados pela **força forte**, uma das quatro interações fundamentais, que estudaremos mais adiante.
- **Prótons e nêutrons  $\rightarrow$  partículas compostas:** Até a década de 1960, acreditava-se que prótons e nêutrons eram partículas fundamentais. Descobriu-se, no entanto, que são compostos por partículas menores chamadas **quarks**. O próton é formado por dois quarks *up* e um quark *down* (uud), enquanto o nêutron possui um quark *up* e dois *down* (udd). A interação entre os quarks é mediada pela **força forte**.
- **Partículas fundamentais:** São as menores entidades conhecidas da matéria, sem estrutura interna observável. Estão organizadas no que chamamos de **Modelo Padrão (MP)** (ver Fig. (1)), que descreve as principais partículas da natureza. No MP temos
  - Férmions (matéria):
    - \* Quarks: up, down, charm, strange, top, bottom
    - \* Léptons: elétron, múon, tau e seus respectivos neutrinos
  - Bósons (interações):
    - \* Fóton ( $\gamma$ ): Força eletromagnética
    - \* Glúon ( $g$ ): Força forte
    - \*  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ : Força fraca
    - \* Gráviton? (não confirmado): Força gravitacional
    - \* Bóson de Higgs ( $H^0$ ): Dá massa às partículas

Todos os blocos da matéria e das interações (exceto a gravidade) estão contidos nesse modelo. No início da seção falamos que matéria se refere a todos os componentes do universo. Contudo, no fim deste tópico citamos dois tipos de partículas, as de matéria e as de interações. Essa questão será abordada com mais detalhes no futuro, porém saiba que para férmions interagirem e consequentemente formarem átomos e sistemas complexos, partículas de interação, ou bósons, precisam ser trocados. Logo, sem bósons não há interação e consequentemente não há átomos formados



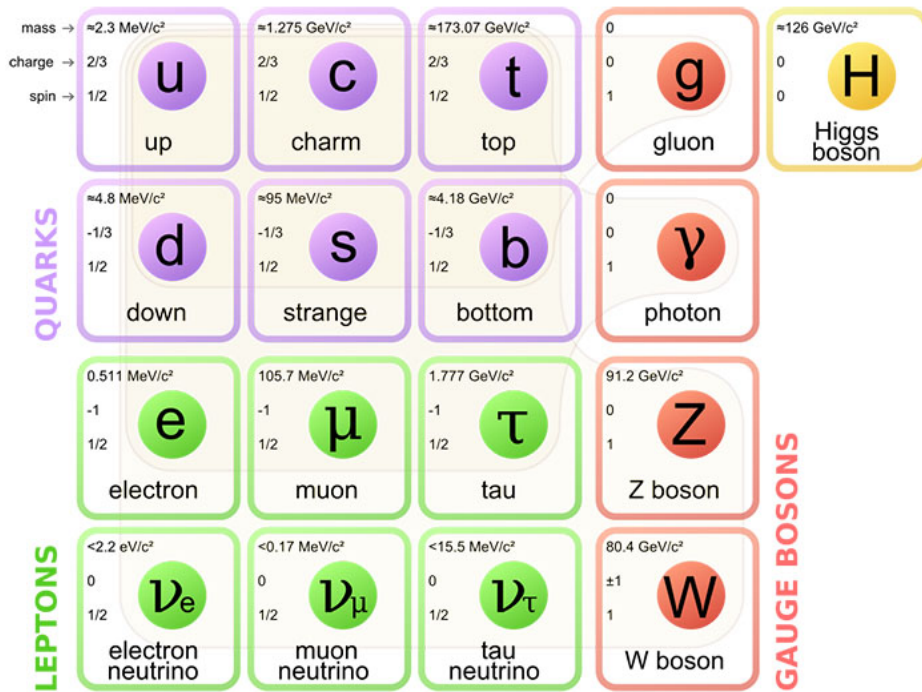


Figura 1: O Modelo Padrão é a teoria mais bem aceita em física de partículas. O mesmo descreve todas as partículas fundamentais da natureza

## 4.1 E a Gravidade?

Assim como as três forças fundamentais (eletromagnética, que liga as partículas de cargas opostas e repele as partículas de cargas semelhantes; a força fraca, relacionada com o que pode ou não acontecer em uma certa reação radioativa, bem como os produtos que podem surgir desta; e a força forte, que liga os quarks e mantém o núcleo atômico coeso) possuem bósons de força relacionados, é esperado que a gravidade também o tenha. Entretanto, é um processo extremamente complexo sua medição, visto que essa é a interação mais fraca das quatro.

Além disso, a maior dificuldade da integração dessa nova partícula ao Modelo Padrão é o fato de que a Relatividade Geral, proposta por Albert Einstein, que melhor descreve a força gravitacional, é incompatível com a mecânica quântica. Em outras palavras, isso quer dizer que, ao tentar resolver as equações em uma teoria unificada que contenha essas duas teorias em seu escopo, deparamo-nos com inconsistências e problemas de formulação. O que serve como um guia utópico, que forneça a descrição do gráviton através de uma teoria mais fundamental que o Modelo Padrão, é o fato de que se espera que a gravidade quântica tenha regido o início do Universo. Ou seja, medir o gráviton é a chave mestra para validar uma teoria completa sobre o Modelo Padrão com a gravidade.

Além dessa dificuldade principal, o Modelo Padrão, como uma teoria incompleta, dentre as principais explicações das quais carece, apresenta as seguintes limitações:

1. Não leva em conta efeitos térmicos;
2. Não explica a energia e matéria escuras;
3. Não explica a hierarquia das famílias.

A primeira observação, acerca da temperatura, está diretamente ligada à concepção da Natureza. Isto é, tudo o que existe ao redor possui uma temperatura não nula, principalmente se

tratando de questões como o início do Universo, onde as temperaturas e densidades eram muito elevadas. Dessa forma, uma extensão direta à teoria do Modelo Padrão é a inserção da dependência térmica em sua formulação.

Quanto ao segundo item, é sabido que a energia e matéria escuras são ingredientes fundamentais ao se estudar a gravidade e o comportamento do Cosmos. Não se tem um consenso, ou explicação, sobre qual partícula fundamental estaria relacionada, ou comporia, a matéria escura. Tampouco há a formulação de algum mecanismo que descreva o que é e de onde vem a energia escura, que é imprescindível para a explicação da expansão do Universo.

Por fim, a última dificuldade elencada se refere às famílias constituintes do Modelo Padrão, presentes na Figura 1. Essas famílias aparecem sempre em três: seja para os quarks, com *up* e *down* pertencendo à primeira família; *charm* e *strange* à segunda; e *top* e *bottom* pertencendo à terceira; seja para o elétron e seu neutrino e seus respectivos primos. A dificuldade refere-se, na verdade, à limitação dos cientistas em entender por que esses conjuntos de partículas estão agrupados em não 2, ou não 4, mas sim em 3 grupos, mesmo que não haja nenhuma impossibilidade física de que esse número fosse diferente.

Além disso, há outras explicações nas quais o Modelo Padrão deixa a desejar, mas, ainda assim, é a teoria mais completa sobre as partículas que se conhece.

Para resolver esses problemas, existem formulações de teorias mais fundamentais, como por exemplo o Modelo Padrão Supersimétrico Mínimo, que traz um novo ingrediente ao Modelo Padrão usual: a supersimetria. Esta dobra o número de partículas constituintes, trazendo soluções para aquele setor escuro mencionado anteriormente, ou até mesmo para algumas dificuldades envolvendo o gráviton. Porém, não há nenhuma evidência, ainda, de que tais partículas adicionais existam.

Uma outra abordagem são as teorias das Cordas e da Gravidade Quântica em Loop que, embora também não forneçam nenhuma evidência experimental, resolvem o problema do gráviton, introduzindo a Relatividade Geral e o Modelo Padrão tradicional como um produto natural da física de partículas elementares mais fundamental.

Uma das maiores dificuldades da teoria das cordas, que unifica as quatro forças, é o fato de que ela propõe a existência de dimensões superiores além das três espaciais e da temporal. Tipicamente, essa abordagem considera 10 ou 11 dimensões do espaço-tempo, que surgem para solucionar as dificuldades abordadas.

Além disso, existem algumas versões diferentes da teoria de cordas e também das supercordas, que são uma junção desta com o mecanismo da supersimetria, aumentando a quantidade de partículas existentes. Existe, então, uma “teoria de tudo” que, ainda mais fundamental que a teoria das cordas, unifica essas versões e traz a origem do Universo como um fato direto. Esta é a chamada teoria M.

Após este resumo geral sobre os ganhos, perdas e peculiaridades do Modelo Padrão da Física de Partículas, é preciso focar em detalhes cada característica descrita até o momento para entender em sua totalidade toda esta formulação. Para esse fim, tome nota das seguintes considerações.

## 4.2 Considerações finais

Ao contrário de um objeto macroscópico, que possui uma posição bem definida no espaço, na escala quântica as partículas elementares não possuem uma posição bem definida. Na verdade, elas estão distribuídas ao longo do espaço, com diferentes probabilidades de serem medidas. Essa descrição de partículas como sendo comprimento de ondas é chamada de Mecânica Quântica (MQ). Contudo, apesar de sua ótima descrição com respeito ao mundo quântico, a MQ não consegue explicar sistemas na qual o número de partículas varia ao longo do tempo. Algo estranho pois experimentos

mostravam o surgimento e desaparecimento de diversas partículas. Um desses exemplos é a absorção de um fóton por um átomo, deixando este excitado. Outro problema fundamental da MQ é sua consideração de que cada partícula é única por si só, não contendo outra análoga no universo. Contudo, em experimentos de espalhamentos, diferentes elétrons apresentam os mesmos comportamentos e propriedades. Em outras palavras, um elétron de um lugar totalmente improvável, digamos da Galáxia de andrômeda, é exatamente igual ao elétron em uma maçã em carga e massa. Mas como isso é possível? Para resolver esse problema, um novo formalismo matemático foi desenvolvido, chamado Teoria Quântica de Campos (TQC), na qual mescla a física da MQ, junto dos conceitos fundamentais da Relatividade Geral.