

O QUE É MATÉRIA E DE QUE ELA É FEITA?

1

Sérgio Ricardo Muniz

- 1.1** Introdução
- 1.2** Do micro ao macromundo
- 1.3** Matéria e suas modalidades
 - 1.3.1** Massa e matéria
 - 1.3.2** Matéria comum
 - 1.3.2.1** Antimatéria
 - 1.3.2.2** Partículas elementares
 - 1.3.2.3** O modelo padrão
 - 1.3.2.4** Bariogênese e nucleossíntese primordial
 - 1.3.3** Matéria e energia escuras
 - 1.3.3.1** Matéria escura
 - 1.3.3.2** Energia escura
 - 1.3.3.3** Modelos alternativos
 - 1.3.4** Perspectivas futuras

O material desta disciplina foi produzido pelo Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada (CEPA) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) para o projeto Licenciatura em Ciências (USP/Univesp).

Créditos

Coordenação de Produção: Beatriz Borges Casaro.

Revisão de Texto: Marcia Azevedo Coelho, Marina Keiko Tokumaru e Paulo Barroso.

Design Instrucional: Fernanda Diniz Junqueira Franco, Gezilda Balbino Pereira, Juliana Moraes Marques Giordano, Michelle Carvalho e Vani Kenski.

Projeto Gráfico e Diagramação: Daniella de Romero Pecora, Leandro de Oliveira, Priscila Pesce Lopes de Oliveira e Rafael de Queiroz Oliveira.

Ilustração: Alexandre Rocha, Aline Antunes, Benson Chin, Camila Torrano, Celso Roberto Lourenço, João Costa, Lidia Yoshino, Mauricio Rheinlander Klein e Thiago A. M. S.

Fotografia: Jairo Gonçalves.



1.1 Introdução



Figura 1.1: Galáxia e Universo. / Fonte: Hubblesite.org

Ao longo da história, o ser humano sempre tentou entender a natureza de todas as coisas ao seu redor. Uma busca constante, presente em todas as culturas e civilizações, tem sido entender a origem e as leis básicas que regem o Universo.

A ciência é a forma mais sistemática e bem-sucedida de explorar o desconhecido e desvendar seus mistérios. A física é a mais fundamental das ciências naturais e busca justamente compreender a essência (natureza) de todas as coisas (que os filósofos gregos chamavam de *Physis*, de onde deriva a palavra física) e as leis básicas da natureza. Esse caminho busca descobrir os blocos fundamentais a partir dos quais todo o Universo é constituído, bem

como entender as interações e transformações associadas às mais diversas condições, de modo a ser capaz de prever o seu comportamento futuro.

A questão acerca da constituição do mundo físico conduz-nos à ideia da elementaridade, das substâncias básicas e daquilo que denominamos interações (ou forças) fundamentais. Nesta disciplina, ao longo das próximas semanas, iremos abordar algumas dessas questões, fazendo uma viagem através de importantes conceitos a respeito da constituição da matéria, desde a física clássica (desenvolvida até o final do século XIX) até algumas das mais modernas descobertas e teorias da física contemporânea.

Nesta breve e interessante viagem, exploraremos alguns limites extremos da natureza, desde a estrutura mais elementar da matéria (entendendo como suas propriedades básicas dão origem a tudo que temos à nossa volta) até como esses conhecimentos nos permitem manipular e criar novos materiais com importantes aplicações tecnológicas e biomédicas.

Em outras palavras, entenderemos não só de que são feitas todas as coisas, mas também como o conhecimento científico (particularmente o da estrutura da matéria) é essencial para o desenvolvimento tecnológico, econômico, social e o modo de vida moderno.

1.2 Do micro ao macromundo

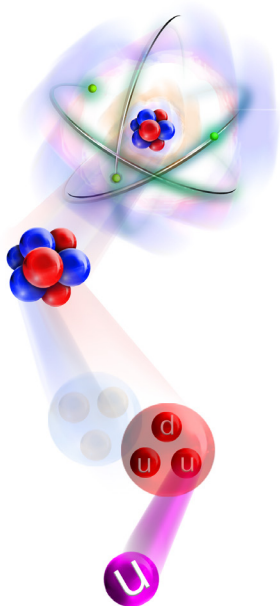


Figura 1.2: A partir dos menores objetos compomos os maiores.

É bem provável que você já tenha ouvido falar da existência de átomos e moléculas, que são os blocos básicos que formam a matéria ao nosso redor. De fato, nos dias atuais, ninguém mais questiona a existência dos átomos e podemos até vê-los diretamente usando instrumentos (microscópios) especiais. Isso nem sempre foi assim, e há pouco mais de um século ainda havia muito debate a respeito da sua existência real, pois os recursos da época não permitiam detectá-los de forma direta.

Alguns cientistas importantes acreditavam que o conceito de átomo era meramente uma construção hipotética conveniente, mas não necessariamente real, e talvez até desnecessária. Naquela época, não se tinha ainda a menor ideia da sua estrutura interna e de seus constituintes.

Na verdade, o conhecimento do mundo microscópico, fundamental para entender completamente a estrutura interna da matéria (a ponto de podermos manipulá-la a nosso favor), foi construído aos poucos, ao longo de vários séculos, a partir de observações empíricas e interpretações cuidadosas dos fenômenos estudados no mundo macroscópico.

Porém, foi só no século XX que passamos a compreender profundamente a estrutura interna do átomo, com o desenvolvimento das chamadas teorias quânticas. Ainda assim, essa busca começou a partir da observação do mundo macroscópico. Por exemplo, a busca para entender o movimento dos corpos (celestes ou não) levou o homem a descobrir as leis do universo mecânico, e assim entender as regras básicas do movimento. Esse primeiro passo foi muito importante, sobretudo, porque as observações sistemáticas e a verificação dessas primeiras conjecturas levaram ao estabelecimento da ciência moderna através da consolidação do método científico.

O conhecimento e a tecnologia atual permitem-nos hoje não apenas “ver”, mas também manipular e controlar com precisão escalas de tamanhos cada vez menores (escala atômica). Contudo, é muito importante entender que um dos grandes valores da ciência é justamente tornar-nos capazes de inferir e compreender fenômenos que ocorrem em escalas de tamanho (e energia) muito distantes daquelas que os nossos sentidos físicos permitem observar ou sentir diretamente. Em outras palavras, a ciência permite-nos entender mesmo aquilo que não podemos ver, ouvir ou tocar diretamente.

A física, como ciência, lida e explora os limites mais extremos do Universo, desde a escala microscópica (e muito além daquilo que somos capazes de observar com os instrumentos atuais) até a escala cósmica das estrelas e galáxias. Uma consequência surpreendente e fascinante da compreensão dos fenômenos nessas várias escalas é a de que um conjunto pequeno de conceitos e princípios fundamentais (como a conservação de energia, por exemplo), parece ser válido em praticamente todas as escalas, permitindo-nos explicar e sintetizar tudo que conhecemos até hoje, desde que, é claro, o assunto possa ser investigado cientificamente (permita realizar experimentos). A esse conjunto de princípios fundamentais, que sintetizam a compreensão de tudo, comumente damos o nome de Leis da Natureza ou Leis da Física. Nesta disciplina, faremos uma incursão para explorar e entender alguns desses conceitos e princípios fundamentais, em várias escalas e condições diferentes.

1.3 Matéria e suas modalidades

1.3.1 Massa e matéria

O conceito de matéria está intimamente ligado ao conceito de massa e, de modo geral, pelo menos no contexto da física clássica, é comum adotá-los como se fossem quase sinônimos. Assim, uma forma usual, porém limitada, de definir a matéria é: “matéria é tudo que tem massa e ocupa lugar no espaço”. Esta perspectiva sugere a visão de que a massa é uma medida da quantidade de matéria enquanto o volume seria uma medida da quantidade de espaço ocupado por ela.



Embora essa definição faça sentido na física clássica, ela requer cuidados diante das teorias mais modernas, que contemplam a existência de diferentes modalidades de matéria no Universo.

O conceito clássico de massa passou a ter uma expressão quantitativa bem clara a partir dos estudos de Isaac Newton, no século XVII. A proposição das chamadas Leis de Newton, que formaram a base da mecânica clássica, dá à massa um papel importante. De fato, podemos utilizar as expressões de Newton como uma forma de quantificar (medir) a massa de um corpo. Na mecânica de Newton há, a rigor, dois tipos distintos de massa: a massa inercial (presente na segunda lei: $F = ma$) e a massa gravitacional (expressa na lei da gravitação: $F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$).

Apesar de relacionadas, essas massas têm significados diferentes. No primeiro caso, a massa é uma medida da inércia do corpo, expressando a constante de proporcionalidade entre a força aplicada e a aceleração resultante, enquanto no segundo caso a massa é o atributo (propriedade) do corpo que causa a força (interação) gravitacional. Historicamente, porém, elas foram assumidas serem iguais até que a física moderna (particularmente a teoria da relatividade), já no início do século XX, viesse esclarecer definitivamente essa questão. Entretanto, na prática, para velocidades não relativísticas (muito abaixo da velocidade da luz), o valor numérico de ambas continua sendo o mesmo.

Na física moderna, a teoria da relatividade especial de Albert Einstein, proposta em 1905, mostra-nos que há uma interrelação entre massa e energia, na forma da famosa expressão $E = mc^2$, que expressa o fato de que elas (massa e energia) são equivalentes, como duas faces da mesma moeda, podendo ser convertida uma na outra. Além disso, a teoria quântica, que será abordada mais adiante nesta disciplina, estabelece que a matéria exibe um comportamento dual, podendo comportar-se simultaneamente como onda (não localizada de forma absoluta no espaço) e partícula.

Outro exemplo de uma situação que requer cuidado é o das partículas que não têm massa, como o fóton e o glúon e talvez o neutrino (partículas que serão discutidas logo mais). Neste caso, a associação entre massa e matéria parece ser especialmente problemática, pois tais partículas não seriam consideradas matéria, o que é contra-intuitivo ao próprio conceito clássico de partícula. Mas, na verdade, como veremos mais adiante, o fóton e o glúon geralmente não são considerados formas de matéria, mas meramente mediadores de determinadas interações (força) fundamentais da natureza. Além disso, experimentos recentes parecem indicar que o neutrino, que é, de fato, uma partícula de matéria, parecer ter uma massa muito pequena, mas não nula. Assim, na prática, uma das características fundamentais da matéria é ser dotada de massa e produzir interação gravitacional. De fato, é essa característica que nos permite inferir a existência de um tipo de matéria que preenche grande parte do universo, porém é completamente invisível para nós, pois não interage com nenhuma forma de radiação eletromagnética (como a luz). Essa matéria é chamada matéria escura.

Assim, do ponto de vista de classificação geral, temos basicamente dois tipos de matérias no universo: a matéria ordinária comum (ou “visível”), que inclui todas as partículas elementares que nós conhecemos, inclusive a chamada antimatéria (discutida mais adiante); e a matéria escura, que não sabemos bem o que é, mas há evidências indicando que provavelmente não é totalmente constituída dos mesmos elementos presentes na matéria ordinária. Voltaremos a discutir um pouco mais sobre isso depois. Por ora, vamos explorar e entender um pouco mais sobre a matéria que está à nossa volta.

1.3.2 Matéria comum

Como um primeiro exemplo, vamos considerar uma gota d'água (tamanho aproximado de $1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$). À primeira vista essa gota parece ser bastante homogênea e contínua. Porém, se olharmos com um instrumento especial que aumenta muito a capacidade da nossa visão, veremos que a gota não é tão homogênea como parece ser a princípio. Na escala atômica, em dimensões da ordem de angstrom ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$), poderemos perceber o surgimento das moléculas de água, com regiões claramente distintas e distribuições de cargas elétricas características de cada átomo da estrutura que forma essa molécula.

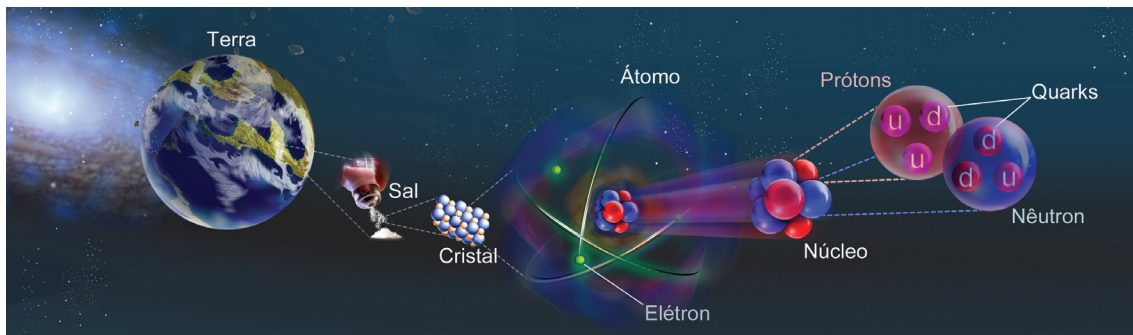


Figura 1.3: Entendendo as ordens de grandezas.

Mesmo nessa escala, usando, por exemplo, um microscópio de força atômica, pode-se ainda ter a impressão de que cada átomo é uma distribuição mais ou menos homogênea, como se fosse uma esfera rígida de matéria. Mas se pudéssemos continuar aumentando indefinidamente a magnificação de um microscópio imaginário, veríamos que o átomo também não é nada homogêneo, mas, sim, composto de elementos menores, com um enorme espaço “vazio” entre a região mais externa (negativa) e a região central (positiva).

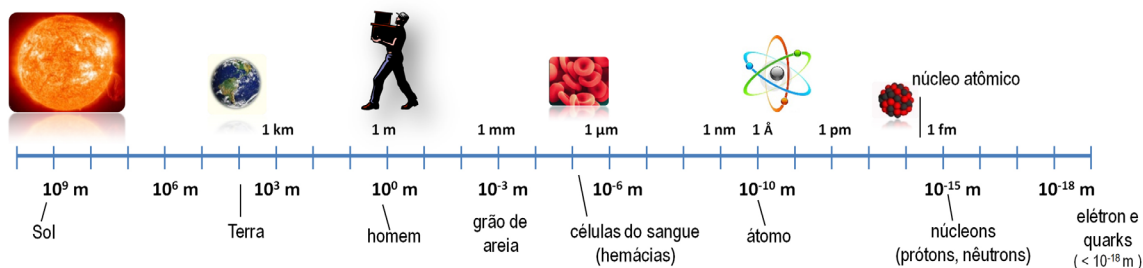


Figura 1.4: Entendendo as escalas e ordens de grandezas / Fonte: Sergio Muniz.

Ao atravessar a eletrosfera, que é onde estão as partículas negativas chamadas elétrons, percebe-se que há uma região central com uma distribuição de cargas positivas muito compacta (dez a cem mil vezes menor que a camada eletrônica mais externa, que define o tamanho do átomo), e cuja atração elétrica mantém os elétrons ligados (“orbitando”) ao seu redor. É isso que dá estabilidade mecânica e neutralidade de carga ao átomo. Esse caroço positivo é o núcleo atômico (tamanho da ordem de $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$), onde está concentrada praticamente toda a massa dos átomos. Um estudo detalhado do núcleo mostra que ele também é constituído de dois elementos básicos: os prótons, com carga positiva, e os nêutrons, que têm a mesma massa do próton, mas não têm carga elétrica.

Embora nenhum microscópio real nos permita atualmente “ver” (diretamente) a estrutura interna do núcleo atômico, hoje nós sabemos que mesmo os minúsculos núcleons (nome dado aos constituintes do núcleo) têm estrutura interna e também não são caroços homogêneos e indivisíveis. Na verdade, os prótons e os nêutrons são compostos de partículas elementares chamadas quarks, e estes, sim, até onde sabemos, são indivisíveis. Assim como os quarks, o elétron também é uma partícula elementar indivisível.

Seriam então os elétrons e os quarks, finalmente, os blocos mais fundamentais da matéria?

A resposta, na verdade, é sim e não! Sim, essas são as partículas fundamentais que formam os átomos e a matéria que vemos ao nosso redor, mas essas não são as únicas partículas elementares. Existem várias outras, como veremos logo mais. Antes disso, porém, vamos brevemente falar sobre outro conjunto de partículas subatômicas que dá origem à chamada antimatéria, e que, na nossa classificação geral, também faz parte da matéria comum, embora (felizmente) não tenhamos muitas delas ao nosso redor.

1.3.2.1 Antimatéria

Ao adequar a formulação matemática da recém-criada teoria quântica aos princípios exigidos pela teoria da relatividade, Paul Dirac foi o primeiro a propor a existência das chamadas antipartículas: um conjunto de partículas praticamente idênticas às aquelas conhecidas na época (1928), porém, com carga elétrica trocada.

A teoria de Dirac previa, por exemplo, a existência de um antielétron, também chamado de pósitron, que teria as mesmas propriedades do elétron, exceto pela carga elétrica, que é positiva. Da mesma forma, deveria existir um antipróton, com carga negativa, e até mesmo antiátomos.

De fato, essas partículas foram observadas experimentalmente. A primeira delas foi o pósitron, observado por Carl Anderson em 1932, e outras o seguiram. Isso motivou a construção dos grandes aceleradores de partículas (dispositivos usados para colidir partículas subatômicas com altas energias, na tentativa de estudar seus fragmentos menores), o que, por sua vez, levou à descoberta de um número ainda maior de outras partículas e antipartículas. Uma das dificuldades de se observar essas partículas está no fato de que matéria e antimatéria se aniquilam mutuamente (produzindo um fóton – luz – de alta energia, num processo chamado aniquilação de pares) se postas em contato. Além disso, a maioria das partículas elementares não é estável de forma isolada (fora do núcleo, onde as interações nucleares as estabilizam). Essas partículas, porém, podem ser observadas (produzidas e até aprisionadas por algum tempo) nos laboratórios dos grandes aceleradores de partículas. Algumas dessas partículas (de menor energia) são produzidas na atmosfera ou no interior da matéria, em número bem reduzido, devido a raios cósmicos. Essa foi justamente a forma pela qual o pósitron foi observado pela primeira vez.

A área da física que estuda essas partículas e suas interações é a física de partículas e a teoria mais completa para explicar as interações que dão ordem a esse aparente caos de partículas elementares é o chamado Modelo Padrão.



Aceleradores e a Física de Altas Energias

Nos aceleradores de partículas, os físicos buscam explorar escalas de tamanhos cada vez menores. Nesses experimentos, a ideia básica é acelerar uma dada partícula até energias bem maiores do que a energia de ligação das subpartículas que a compõem. Ao observar o produto (fragmentos) da colisão, os cientistas determinam os componentes menores das partículas subatômicas. É assim que podemos dizer que uma partícula é elementar (indivisível) ou não. Quanto menor a partícula, maior é a energia necessária para “quebrá-la”, e, por isso, a física de partículas também é conhecida como física de altas energias.

1.3.2.2 Partículas elementares

Com os resultados obtidos nos aceleradores e o desenvolvimento da física nuclear e de partículas, já a partir da década de 60 do século XX, sabe-se que todas as forças da natureza podem ser divididas em apenas quatro tipos de interações fundamentais. Essas interações são, em ordem decrescente de magnitude relativa, as interações:

- Nuclear forte;
- Eletromagnética;
- Nuclear fraca;
- Gravitacional.

Os quatro tipos de interações fundamentais nos oferecem uma forma conveniente de classificar as diferentes partículas. Algumas partículas participam de todas as interações, enquanto outras apenas de algumas.

De modo mais geral, toda matéria que conhecemos (formada por átomos) é composta, na sua forma mais fundamental, por quarks e elétrons. Mas, do ponto de vista das interações e atributos fundamentais, é conveniente dividir as partículas em algumas outras categorias, que serão brevemente discutidas a seguir.

Bósons e férmions

Cada partícula possui um conjunto de atributos e propriedades próprias. Numa descrição mais simples, podemos dizer que cada partícula (seja ela elementar ou composta) possui, pelo menos, três atributos fundamentais:

- Massa;
- Carga;
- *Spin*.

Desses, os dois primeiros são bem familiares, enquanto o terceiro é uma propriedade intrinsecamente quântica e sem um perfeito análogo clássico. Por ora, basta dizer que o *spin* é um número, que pode ser inteiro ou semi-inteiro, que define as propriedades estatísticas da matéria em nível microscópico. Essa característica é fundamental para o comportamento coletivo das partículas na matéria condensada (sólidos e líquidos), como veremos mais adiante no curso.

Nessa perspectiva, as partículas podem ser classificadas em duas grandes categorias: bósons e férmions. Os bósons são partículas cujo *spin* é um número inteiro ($s = \{0; 1; 2...\}$, conjunto que inclui o zero). Os férmions, por sua vez, são partículas cujo *spin* é um valor semi-inteiro ($s = \{1/2, 3/2, 5/2...\}$). Deixaremos os detalhes dessa classificação para o futuro, dizendo apenas que, individualmente, as partículas que formam o átomo são férmions: elétron, próton, nêutron; enquanto o fóton, por exemplo, é um bóson.



Os átomos são constituídos, em primeira aproximação, de elétrons, prótons e nêutrons, e a composição (soma) do número final dessa partícula pode fazer com que o *spin* total do átomo seja um número inteiro ou semi-inteiro. Portanto, dependendo do número de massa, os átomos podem ser bósons ou férmions. Assim, por exemplo, o átomo de ${}^3\text{He}$ é um férmion enquanto o de ${}^4\text{He}$ é um bóson.

O comportamento da matéria condensada em baixas temperaturas é extremamente dependente da sua estatística quântica, isto é, se as partículas compostas são bósons ou férmions. Por exemplo, todas as propriedades químicas dos átomos e a estrutura da tabela periódica dos elementos estão ligadas às propriedades estatísticas do elétron, e ao fato de ele ser um férmion (sujeito ao princípio de exclusão de Pauli). Voltaremos a discutir isso mais adiante neste curso, e também no curso de química no próximo semestre.

Quarks e léptons

Existem seis tipos de quarks: *up*, *down*, *strange*, *charm*, *top* e *bottom*. Eles não são observáveis diretamente de forma isolada, mas têm um conjunto de atributos que os fazem formar agrupamentos compostos de dois ou três quarks, chamados de hádrons. Os hádrons são observáveis diretamente.

Os hádrons são partículas compostas que participam da interação forte, além das outras três interações fundamentais. Existem dois tipos de hádrons: os bárions e os mésons. Os mésons são compostos por dois quarks e são bósons (*spin* inteiro). Os bárions são formados por três quarks e têm *spin* semi-inteiro, sendo, portanto, férmions. Os núcleons (próton e nêutron) são bárions.

O elétron faz parte de um grupo de partículas elementares chamadas léptons. Os léptons são partículas que participam das interações fracas, gravitacionais e eletromagnéticas, mas não das interações fortes. Exemplos de léptons são os elétrons, múons e neutrinos, todos mais

leves que o próton. A palavra lépton, que significa “partícula leve”, deriva desse fato, embora o tau (descoberto mais tarde, em 1975) seja mais pesado que o próton. Assim como os quarks, os léptons formam um conjunto de seis partículas elementares (elétron, múon, tau, e seus respectivos neutrinos), que não parecem ter estrutura interna. Cada uma dessas partículas tem a respectiva antipartícula, também considerada elementar.

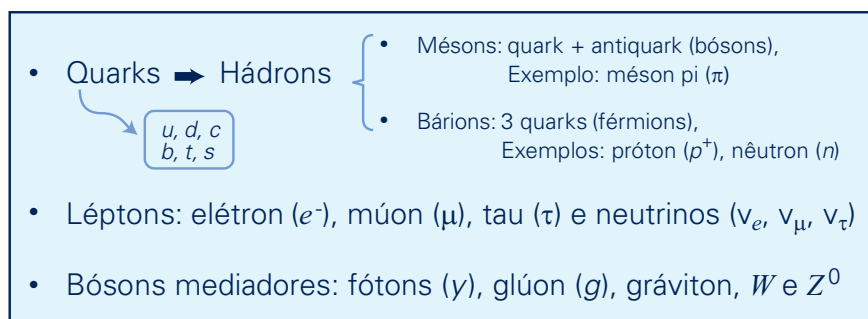


Figura 1.5

Além dos léptons e quarks (todos férmions), há outro pequeno grupo de partículas mediadoras das interações fundamentais, que são bósons. Fazem parte do grupo de bósons mediadores o fóton, o glúon, os bósons W (W^+ e W^-) e Z^0 , e possivelmente o gráviton (ainda não observado experimentalmente). Esses três conjuntos de partículas (6 quarks, 6 léptons e os bósons mediadores), juntamente com suas respectivas antipartículas, formam a base das partículas elementares da natureza, isto é, a estrutura elementar da matéria.



A matéria comum é composta por átomos formados por núcleons (prótons e nêutrons), que são hádrons (bárions), constituídos por quarks e elétrons. Os bárions formam estruturas que podem ser estáveis como os núcleons do núcleo atômico. Por isso, uma forma mais geral de classificar a matéria composta de quarks é a chamada matéria bariônica. Uma estrela de nêutrons, por exemplo, é uma forma de matéria bariônica não composta por átomos.

Os mésons, por sua vez, desempenham o papel de mediadores da interação nuclear (responsável pela atração entre o próton e o nêutron) e são instáveis quando isolados, eventualmente decaindo após certo tempo de vida. Os léptons, por sua vez, existem apenas como partículas isoladas e não parecem formar estruturas compostas estáveis (não se conhece nenhuma estrutura mantida apenas com a interação fraca).

1.3.2.3 O modelo padrão

O Modelo Padrão é a teoria física que descreve as interações entre léptons e quarks. Nesse modelo, além dessas partículas elementares fundamentais, existem algumas partículas especiais, que são bósons mediadores das interações fundamentais, como o fóton e o glúon, por exemplo.

Nesta introdução, não é possível discutir todos os detalhes envolvidos nesta teoria, que reúne algumas das mais avançadas teorias quânticas a respeito da estrutura da matéria (a saber: teoria eletrofraca, que une as interações fraca e eletromagnética (eletrodinâmica quântica), e a cromodinâmica quântica, que descreve a interação nuclear forte), todas muito além dos objetivos deste curso. Mas podemos tentar resumir, de forma qualitativa, alguns dos seus principais resultados. Basicamente, a teoria diz que uma partícula só experimenta uma dada interação (força) se possuir a carga associada àquela interação. Assim, a interação eletromagnética envolve cargas elétricas, enquanto a interação forte se dá através das cargas de cor (daí o nome cromodinâmica) e a interação fraca, através das chamadas cargas de sabor.

Na linguagem das teorias quânticas de campo, da qual o Modelo Padrão é um exemplo, as interações entre as partículas são sempre mediadas por partículas portadoras, que são tipicamente bósons. Assim, por exemplo, os fótons são os mediadores da interação eletromagnética, os glúons, da interação forte e os bósons W e Z^0 , da interação fraca.

O Modelo Padrão resume as três interações fundamentais numa única teoria, de forma bastante elegante e simétrica. Note, porém, que a interação gravitacional não é descrita neste modelo. Por isso, existe um grande esforço, já há algumas décadas, tentando unificar todas as interações fundamentais da natureza numa única teoria unificada. Essa teoria unificada tem o grande desafio de unificar a gravitação (na forma da teoria da Relatividade Geral, de Einstein) e as teorias quânticas da matéria, o que tem sido bastante difícil. Embora essa grande teoria unificada ainda não exista de forma completa, há um bom número de propostas teóricas que almejam fazer isso, mas todas elas ainda precisam de verificação experimental. Muitos experimentos atuais procuram esclarecer essas questões nos grandes aceleradores de partículas, detectores de ondas gravitacionais e outros. Alguns desses resultados já estão surgindo dos experimentos nos grandes aceleradores de partículas, como o *LHC (Large Hadron Collider)* no CERN¹.

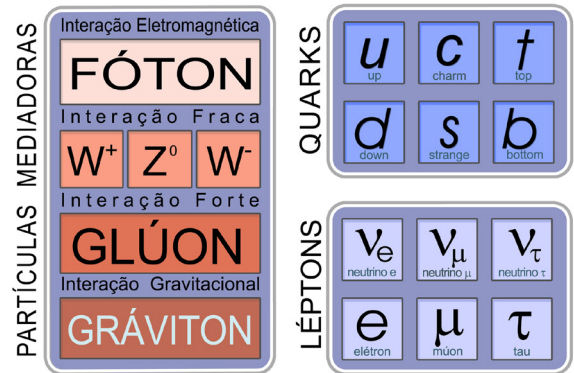


Figura 1.5: Partículas elementares do Modelo Padrão.

¹ O CERN (Centro Europeu de Pesquisa Nuclear) é um laboratório internacional, próximo a Genebra, na Suíça, onde está o maior acelerador de partículas construído pelo homem.



Em algumas das teorias quânticas da gravitação, a massa seria a carga associada à interação gravitacional, que é intermediada pelo gráviton (partícula mediadora ainda não observada experimentalmente). Acredita-se que, na próxima década, vários experimentos (alguns em andamento) vão ser capazes de nos ajudar a esclarecer alguns desses pontos e a entender mais a respeito da estrutura mais fundamental da matéria.

1.3.2.4 Bariogênese e nucleossíntese primordial

A teoria mais aceita sobre a origem da matéria no Universo é a de que a gênese das partículas elementares ocorreu há cerca de 15 bilhões de anos, num fenômeno chamado de *Big Bang*, onde toda a energia primordial do universo estava concentrada num único ponto (singularidade), a partir do qual toda a matéria e o próprio Universo (inicialmente na forma de energia e radiação) surgiram e se expandiram rapidamente, dando origem ao espaço-tempo que forma o universo observado hoje.

Por causa dessa rápida expansão inicial, é um erro comum dizer que o *Big Bang* foi uma grande explosão. Na verdade, tecnicamente não foi propriamente uma explosão que deu origem ao universo, mas para entendermos bem isso são necessários conceitos e detalhes, que estão além do nosso escopo neste momento. Alguns desses pontos serão discutidos mais adiante, no tópico de cosmologia, ao final deste semestre.

Para o que nos diz respeito neste momento, basta saber que, nos primeiros instantes após o *Big Bang*, a energia e a temperatura eram altíssimas e a matéria usual, com átomos e seus constituintes, ainda não existia (a temperatura e a energia dos fótons que preenchiam esse universo inicial eram muito maiores do que a energia de ligação dos átomos e partículas que formam os núcleons). Foi só com a rápida expansão inicial, e o resfriamento que se seguiu, que as energias de interação entre quarks começaram a formar os bárions, como os núcleons (próton e nêutron). Esse primeiro instante do universo primordial é chamado bariogênese, devido à formação dos bárions.

Nesse primeiro estágio do Universo, pequenas flutuações locais levaram a uma quebra da simetria entre as partículas elementares, fazendo com que houvesse uma pequena prevalência da forma de matéria usual, ao invés da antimatéria. Esse pequeno desbalanço inicial permitiu a sobrevivência desse excesso de matéria, enquanto a antimatéria formada inicialmente no *Big Bang* se aniquilava mutuamente com a maior parte da matéria criada até aquele momento. Acredita-se que foi isso que permitiu a prevalência da matéria sobre a antimatéria, como é observado hoje.

A partir de cerca de um segundo de existência, a temperatura e a densidade do universo já teriam baixado o suficiente para a formação dos primeiros núcleos atômicos e a matéria do Universo estaria em forma de plasma (matéria ionizada) e radiação. A partir desse ponto, os núcleos de deutério começam a ser suficientemente estáveis (não desintegrados por fótons de alta energia ainda presentes) para sustentar a cadeia de reações termonucleares que deu origem aos primeiros núcleos mais pesados. Nos instantes seguintes, durante aproximadamente os primeiros cinco minutos do Universo, as reações de fusão nuclear formaram os núcleos mais pesados, como os átomos de hélio e lítio, até o momento em que a temperatura e a densidade não fossem mais suficientes para sustentá-las.

É importante notar, porém, que tudo isso ocorreu numa escala de tempo muito rápida e não permitiu que fossem formados todos os elementos químicos da tabela periódica. Nesses primeiros minutos de formação da matéria, a que chamamos nucleossíntese primordial, teriam sido formados apenas os átomos de hidrogênio, hélio, lítio, berílio e boro. Os elementos mais pesados (inclusive o carbono, que é fundamental para a matéria orgânica) foram formados posteriormente (muito tempo depois) no ciclo de vida das primeiras estrelas e, sobretudo, nas explosões de supernovas. Isso também será discutido com mais detalhes em cosmologia.

1.3.3 Matéria e energia escuras

Como vimos, a massa parece ser o atributo que define a matéria, e numa versão simplificada poderíamos dizer que matéria é tudo aquilo que tem massa e produz interação gravitacional. Além disso, mencionamos também que, com base nos modelos cosmológicos atuais para explicar os efeitos gravitacionais observados no universo, infere-se a necessidade de haver uma grande quantidade de matéria (com massa e interação gravitacional atrativa), que não é observada em nenhuma faixa espectral (radiação eletromagnética) conhecida, e que por isso é chamada de matéria escura. Esses modelos cosmológicos, juntamente com resultados mais recentes sobre a expansão do universo, também sugerem que deve haver uma outra forma de interação gravitacional, de efeito repulsivo. Isso deu origem, nas últimas décadas, ao conceito de energia escura (em analogia ao conceito de matéria escura, proposto antes).

1.3.3.1 Matéria escura

Não se sabe exatamente qual a constituição da matéria escura, mas existem evidências que sugerem que ela não deve ser composta de matéria bariônica, e seria possivelmente composta de partículas subatômicas desconhecidas. Alguns modelos teóricos (ainda sem comprovação experimental) propõem que talvez a matéria escura seja composta por neutrinos, ou ainda outras formas exóticas de matéria não bariônica como áxions ou partículas supersimétricas (ambas ainda não observadas). O que se sabe é que a matéria escura corresponde a mais de 80% da matéria (interação gravitacional atrativa) do Universo. Outra forma de expressar isso é dizer que a matéria visível corresponde a apenas cerca de 20% da massa necessária para explicar as observações gravitacionais vistas no Universo. E isso não tem nada a ver com os chamados Buracos Negros (objetos astronômicos que serão discutidos no curso de Estrelas, Galáxias e Cosmologia), cuja quantidade prevista não seria suficiente para explicar toda a massa que falta.

A matéria escura é, portanto, uma designação geral e hipotética para essa quantidade de matéria que parece “faltar” no Universo. Se ela é, de fato, uma forma exótica de matéria “invisível”, ou apenas um pedaço faltando nas teorias atuais, é algo que a ciência deverá desvendar, com a ajuda de novos dados experimentais. É assim que a ciência evolui.

1.3.3.2 Energia escura

A energia escura foi proposta como uma forma de explicar a observação de que a curvatura do universo parece muito próxima de ser plana. Além disso, dados recentes (1998) do telescópio espacial Hubble mostram que a velocidade de expansão do universo parece ser acelerada, ao invés de diminuir com o tempo, como era esperado. Isso significa que deve haver algo como uma força gravitacional repulsiva para contrapor a atração gravitacional usual, produzida pela matéria. Os cientistas sabem muito pouco a respeito do que poderia causar isso (embora existam diversas teorias), mas deram o nome de energia escura a esse tipo de interação gravitacional desconhecida.

O que se sabe é que, para ter uma curvatura plana, deve haver um balanço entre as interações gravitacionais atrativas (que contêm a expansão) e a energia escura (que suspostamente causa a aceleração da expansão do universo), e isso permite estimar com boa precisão as quantidades de matéria e energia escura.

Além disso, medidas independentes, baseadas em várias fontes e comparadas aos melhores modelos cosmológicos, permitem determinar com boa precisão a composição de matéria e energia existente no universo hoje. Elas indicam que aproximadamente 70% do conteúdo gravitacional do universo deva ser devido à energia escura, cerca de 25% é matéria escura e apenas menos de 5% seria devido à matéria usual (sendo cerca de 4% hidrogênio e hélio!). Esses números são surpreendentes, pois mostram que tudo que observamos e conhecemos até hoje corresponde a uma fração mínima do universo como um todo.

1.3.3.3 Modelos alternativos

Embora haja algumas evidências e um consenso entre os especialistas a favor da existência da matéria e energia escura, devemos lembrar que, até o momento, elas são inferidas apenas a partir de observações gravitacionais, na escala cósmica (galáxias), e ainda não foram observadas diretamente em experimentos. Por isso, existem também algumas teorias alternativas, que tentam explicar as anomalias gravitacionais observadas de outra forma. Entre elas estão as várias teorias de gravitação quântica (como as teorias de supersimetria, supercordas, teoria M etc.), que buscam encontrar uma teoria unificada de todas as partículas e interações fundamentais da natureza.

Se alguma dessas teorias irá sobreviver, ou se novas teorias irão surgir para substituí-las, só irá depender dos resultados experimentais, alguns deles já em andamento.

1.3.4 Perspectivas futuras

Há uma grande expectativa entre os cientistas de que, nesta próxima década, novos resultados de observações cosmológicas, aliados aos resultados dos grandes aceleradores como o *LHC*, irão esclarecer algumas dessas dúvidas e nos ajudar a entender melhor o que são essas formas estranhas de matéria e energia gravitacional, ou se existem mesmo outras partículas (e, quem sabe, mais dimensões) no universo, além daquelas que já descobrimos e conhecemos até o momento.

Até lá, vamos seguir com nossa breve história sobre a estrutura da matéria (usual), concentrando-nos inicialmente na estrutura do átomo, entendendo melhor como é formado esse bloco fundamental da matéria, a partir do qual é possível compreender e desenhar os materiais que nos cercam, formados por moléculas e estruturas organizadas. Esse é o tema do próximo tópico.



Leitura Complementar

ABDALLA, Maria Cristina Batoni. **O discreto charme das partículas elementares**. São Paulo: Editora UNESP, 2006.

HAWKING, Stephen. **O Universo Numa Casca de Noz**. Tradução: Ivo Korytowski. São Paulo: Mandarin, 2001.

MARQUES, Gil da Costa. **Física: tendências e perspectivas**. São Paulo: Livraria da física, 2005.