E-BOOK AnimaFísica

Subtítulo

# E-Book - AnimaFísica

# Subtítulo

Projeto AnimaFísica

XX 2020

Universidade Estadual de Campinas Instituto de Física "Gleb Wataghin" E-BOOK AnimaFísica

#### **Creative Commons Licence**

©⊙ S Este trabalho está licenciado com uma Licença Creative Commons - Atribuição-NãoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0). Maiores informações: https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/ "Nós somos apenas uma raça avançada de macacos em um pequeno planeta de uma estrela comum. Mas nós conseguimos entender o universo. Isto nos torna algo muito especial."

- Stephen Hawking

# Índice

Índice v				
1 Método Científico			1	
	1.1	Introducão	1	
	1.2	Críticas ao método cartesiano	3	
	1.3	Método de Popper	4	
	1.4	Método de Kuhn	5	
	1.5	Modelos científicos	6	
2	Mov	vimento Browniano: Contactando o mundo macroscópico com o mi-		
	cros	cópico	9	
	2.1	Introdução	9	
	2.2	O andar do bêbado	9	
	2.3	Visão macroscópica: A lei de Stokes	12	
	2.4	Visão microscópica: Termodinâmica	13	
	2.5	A conexão de dois mundos: Constante de Avogrado	14	
	2.6	Redefinição do número de Avogrado: Sistema internacional de unidades	14	
3	Estr	utura Atômica	17	
	3.1	Núcleo atômico de Rutherford	17	
	3.2	Modelo de Bohr	19	
		Introdução Histórica	19	
		Movimento dos elétrons ao redor do núcleo	19	
		O núcleo do átomo	24	
		Átomos Hidrogenoide	26	
		Níveis de Energia	26	
		Entrada e Saída de Energia	27	
		Proporções	29	
		Os postulados de Bohr	30	
		Imprecisões no Modelo de Bohr: ele estava errado?	30	
	3.3	Modelo Atual do Átomo	31	
		O Princípio da Incerteza de Heisenberg	32	
		A função de onda de Schrödinger	34	
		Função de onda do Átomo de Hidrogênio	35	
		Verdadeira solução para o problema da luz emitida pelo Hidrogênio	36	
		A Probabilidade	37	
		Os Números Quânticos, as Subcamadas e os Orbitais	40	

		Como construir um átomo grande?	44
		Como desenhar um átomo?	47
		Conclusão	49
4	Moo	delo Padrão de Partículas Elementares: a melhor das teorias científicas	51
5	Part	ículas elementares	55
	5.1	O elétron (1897)	55
		Experimento das gotas de Millikan : Determinação da carga do elétron	
		(1911)	56
	5.2	O Múon	58
		O Espaço e o Tempo alterados	59
		A descoberta do Múon e o Méson Pi	60
	5.3	O Fóton	61
	5.4	Quarks e glúons	63
		Hádrons	64
		De volta aos quarks	65
		Os Glúons (1973)	65
	5.5	Bósons W e Z	66
	5.6	Os neutrinos	69
	5.7	Bóson de Higgs	71
6	Inte	rações Fundamentais	73
7	7 Raios Cósmicos		75
	7.1	Início das pesquisas em Raios Cósmicos	75
	7.2	Chuveiros Atmosféricos	75
	7.3	Detecção	76
Bibliografia			79

# Método Científico

# 1.1 Introdução

Os métodos científicos são os meios pelos quais fazemos ciência. A filosofia por trás desses métodos tornam-os ótimas ferramentas de investigação de *fenômenos*.

Um dos aspectos que fazem do método científico uma ferramenta tão poderosa é seu mecanismo de autocorreção, que permite um aprimoramento cada vez maior das *teorias científicas*. Desse modo, o conhecimento científico está em constante aperfeiçoamento; não é estático. O que hoje entendemos como conhecimento científico, no futuro, pode ser provado falso ou incompleto, e substituído por outro, como já ocorreu diversas vezes na história da ciência. Um exemplo são os modelos atômicos, que foram substituídos por modelos mais completos diversas vezes, como será discutido no Capítulo 3.

A palavra método vem do grego, *méthodos*, e nos sugere a ideia de uma sequência de passos, ou um caminho a se seguir para alcançar determinado objetivo[1]. O método científico é, portanto, uma sequência de passos que utilizamos para investigar determinado fenômeno. Diversos filósofos trataram sobre esse tema. Veremos alguns nesse capítulo, sobretudo Karl Popper e Thomas Kuhn, graças às suas importantes contribuições.

Começamos por dois filósofos importantes para o surgimento do método científico moderno: Francis Bacon (Figura 1.1) e René Descartes (Figura 1.2). Bacon propõe que, para conhecer de fato um objeto de estudo, não podemos nos basear apenas na razão, e que devemos, sim, apoiar-nos também em dados empíricos obtidos através dos sentidos. Ou seja, um dado conhecimento deve ter coerência lógica e experimental.[1].

#### pt0pt

Já Descartes nos traz a ideia de que precisamos de um método que nos oriente na busca de determinado conhecimento. Seu procedimento baseia-se em quatro princípios, sendo eles:

- 1. nunca assumir como verdade algo que não tenha evidências;
- 2. dividir o problema em várias partes menores;
- conduzir o raciocínio começando pelas partes mais simples, avançando até as mais complicadas;
- 4. revisar o que foi estudado para ter certeza de que nada foi omitido [1].

Essa ideia de conhecimento do todo através das partes ficou conhecida como "Modelo Cartesiano", ou "Modelo de Descartes".

1.1 Introdução	1
1.2 Críticas ao método cartesiano	3
1.3 Método de Popper	4
1.4 Método de Kuhn	5

1.5 Modelos científicos . . . . . 6

*Fenômeno,* do grego *phainómenon,* coisa que aparece, tudo que pode ser observado na natureza

*Teorias científicas* são um conjunto de ideias bem estabelecidas e embasadas em dados experimentais, diferentemente do uso cotidiano da palavra *teoria*, que seria uma suposição a respeito de algo. Na ciência, chamamos uma suposição de *hipótese*.



**Figura 1.1:** Francis Bacon, 1<sup>o</sup> Visconde de Alban (1561-1626) Fonte: artista desconhecido, Wikimedia Commons

Assim, vemos surgindo o método científico como muitas vezes aprendemos na escola, baseado em algumas etapas, sendo elas: observação de um fenômeno, elaboração do problema, formulação de hipóteses, experimentação, análise dos resultados e conclusão (Figura 1.3). Porém, com outras pessoas pensando a respeito, tivemos diversas contribuições ao modelo cartesiano. Desse modo, apesar da grande importância das ideias de Bacon e Descartes, o método científico, hoje, não é visto como essa "receita de bolo", descrita a seguir:

#### pt0pt



**Figura 1.2:** Retrado de René Descartes (1596-1650) Fonte: Frans Hals, Wikimedia Commons

Figura 1.3: Esquema ilustrativo do método científico cartesiano (mauricio desenhar)



Mas o que deve ser feito em cada uma dessas etapas? A fase de observação de um fenômeno é a fase onde elegemos o que será estudado, quais aspectos vamos tentar entender, como ele funciona, como ocorre, porque ocorre e quais as origens do fenômeno.

Na fase de elaboração do problema, escolhemos quais perguntas queremos responder a respeito do objeto de estudo. Quando decidimos estudar um fenômeno, não necessariamente o estudamos por completo. Aqui entra o segundo princípio proposto por Descartes, em que dividimos o problema em pequenas partes a serem estudadas, de modo a construir o conhecimento de forma gradual.

Após escolher o fenômeno e a pergunta a ser respondida, utilizamos do raciocínio lógico e conhecimentos prévios para tentar solucionar o problema. Para isso, sigamos o primeiro princípio de Descartes: não podemos tomar como verdade argumentos que não possuem evidências empíricas. Como proposto por Bacon, o argumento também deve possuir coerência lógica.

Após determinar o fenômeno a ser estudado, a pergunta que tentaremos responder e qual a possível solução para o problema, está na hora de testar. Montaremos um experimento ou faremos observações com o intuito de coletar dados que possam corroborar ou descartar nossa hipótese. Vemos claramente como o as ideias de Bacon destacam-se nessa fase. Nossa hipótese pode parecer perfeitamente correta quanto à sua lógica e coerência interna, porém, se não se comprova experimentalmente, não descreve o fenômeno de forma correta e, portanto, não tem validade como explicação para o nosso objeto de estudo.

Feito o experimento e coletados os dados, vamos analisá-los de forma crítica, considerando possíveis incertezas. Dessa forma, podemos verificar a validade ou não de nossa hipótese. Se ela mostrar-se falsa, devemos descartá-la e voltar a pensar em outra forma de descrever tal fenômeno ou objeto.

Caso os dados concordem com nossas hipóteses, publicamos o resultado para que outros cientistas possam reproduzir o experimento e, de fato, verificar sua veracidade. Depois que diversos cientistas refizerem nosso experimento, se a hipótese de fato for correta, ela passa a integrar o conhecimento teórico acerca daquele fenômeno ou objeto. Com esse novo conhecimento, temos uma nova visão sobre o fenômeno estudado, o que nos permite revisar os conhecimentos anteriores para ver se nada passou despercebido e, até mesmo, usá-lo como ferramenta para subirmos para o próximo degrau de conhecimento, pois lembre-se que, na formulação do problema, escolhemos apenas uma pequena parte para 'atacarmos'.

Todo esse processo pode ser um tanto quanto demorado por diversos motivos, tais como resistências da comunidade científica. Mas agora, conhecendo o método, vamos pensar em como sua ferramenta de autocorreção o torna tão potente? Quando mandamos os nossos resultados para serem publicados, eles serão revisados por outros cientistas, que vão verificar possíveis erros experimentais ou de análise, e refazer o experimento, para checar os resultados e encontrar possíveis falhas. Caso alguém encontre algum erro, a nossa hipótese será descartada. Em contrapartida, quanto mais uma hipótese resiste às análises da comunidade científica, mais credibilidade ela ganha.

O método cartesiano sofreu diversas críticas, que serão discutidas na próxima seção. Além disso, com o passar do tempo, muitas pessoas que pensaram sobre métodos científicos contribuíram de diversas formas. Em especial, Popper, com a ideia de falseabilidade, e Kuhn, com os paradigmas e as revoluções científicas.

# 1.2 Críticas ao método cartesiano

O método cartesiano, apresentado na introdução desse capítulo, pode parecer um tanto algorítmico, ou seja, uma sequência de passos que, seguidos à risca, sempre nos levará a um resultado satisfatório, como em uma receita de bolo.

Bem, as coisas não são exatamente assim.

A etapa de escolher um fenômeno a ser estudado não é clara e simples. Muitas vezes o objeto de estudo surge de previsões de teorias já consolidadas e não de uma observação da natureza em si. Em alguns casos, ele pode surgir de um erro ou problema em um experimento sobre outro assunto e o rumo da pesquisa pode acabar mudando completamente.

Outro ponto que pode parecer simples nessa sequência de passos é a etapa de experimentação. Há casos onde não é possível reproduzir o fenômeno que está sendo estudado, por diversos motivos, como falta de tecnologia, custo de execução, ou até mesmo pela natureza do fenômeno. Nesses casos, precisamos coletar os dados de uma maneira diferente. Podemos citar como exemplo um cientista que tenta estudar a formação de estrelas. Como não é possível recriar esse fenômeno em laboratório, o cientista deve buscar dados em simulações computacionais, observando outras estrelas e objetos cósmicos no universo.

Além disso, o método cartesiano pode não ser um bom método para ser aplicado às ciências humanas, que exigem metodologias diferentes comparadas às ciências naturais, mas não aprofundaremos essa discussão nesse livro.

As descobertas científicas que revolucionaram a Física no século XX também trouxeram questionamentos sobre esse método cartesiano [2]. Teorias como a da relatividade e da mecânica quântica mudaram o modo como vemos a Física. Com a relatividade, o tempo passa a ser visto como uma dimensão do universo, onde cada observador experiencia sua passagem de um modo diferente. A mecânica quântica traz a ideia de uma natureza probabilística e de que existe uma incerteza natural relacionada à observação (ver sessão 3.3).

Uma das críticas feitas ao método cartesiano é a do filósofo francês Gaston Bachelard (Figura 1.4). Dividir o problema em várias partes e estudar cada uma delas separadamente nos impede de enxergar o problema em sua complexidade, portanto o método cartesiano seria redutivo\*, e não indutivo<sup>†</sup>[2]. Uma análise complexa do fenômeno como um todo é essencial para entendermos as relações das partes entre si e com o todo.

#### pt0pt

Tentar entender o átomo de hidrogênio antes de entender átomos mais complexos pode ser um problema pois ignoramos a complexidade da relação das partes entre si e reduzimos ao caso mais simples[3].

O método é então circunstancial e não algo rígido e sólido. Diferentes tempos e objetivos vão requerer diferentes métodos. Agarrar-se a um específico pode ser um obstáculo para o avanço científico.

# 1.3 Método de Popper

Até então, a lógica vigente das ciências era uma lógica indutiva: a partir de observações da natureza, descrevíamos enunciados para explica-lá (Figura 1.5). Porém, esse método traz alguns problemas, como o da indução.



Figura 1.4: Gaston Bachelard (1884-1962) Fonte: Nationaal Archief, disponível https://www.nationaalarchief. em: nl/onderzoeken/fotocollectie/ aab3e27a-d0b4-102d-bcf8-003048976d84

<sup>\*</sup> Reduzimos o problema em pequenos pedaços a serem estudados separadamente

<sup>&</sup>lt;sup>+</sup> A ideia de método indutivo será explicada mais a frente

#### pt0pt

O problema da indução questiona se enunciados induzidos a partir de resultados experimentais levam ao conhecimento científico. Suponha que façamos um experimento de observar cisnes em diversos lugares e durante todo o experimento, observamos apenas aves brancas. Pelo método indutivo, poderíamos então enunciar que "todos os cisnes são brancos" [4]. No entanto, existem cisnes negros, que não foram observados, e a lógica indutiva nos levou a um erro no conhecimento.

Karl Popper (Figura 1.6), um filósofo austríaco, foi um dos pensadores a atacar esse problema. Para resolvê-lo, ele propôs uma lógica hipotético-dedutiva e a ideia de falseabilidade (ou refutabilidade).

#### pt0pt

Falseabilidade diz respeito à possibilidade de montar experimentos que mostrem que uma hipótese é falsa. Voltando para o exemplo dos cisnes, a hipótese "todos os cisnes são brancos" é falseável, pois basta encontrar um cisne de outra cor e ela é descartada. Note que é mais fácil provar que a hipótese é falsa do que verdadeira, pois para provar sua veracidade, precisaríamos observar todos os cisnes do mundo.

Quanto mais uma hipótese resiste a tentativas de ser falseada, mais credibilidade ela ganha e passa a fazer parte do conhecimento científico. Se é falseada, deve ser descartada ou reformulada.

Então, no método hipotético-dedutivo, ao observarmos um problema, propomos uma hipótese. Dela será deduzido um enunciado sobre o problema, e então a submetemos a testes de falseabilidade. Se a hipótese for falseada, o enunciado também o será. Se uma hipótese não é falseável, essa hipótese não é científica.

# 1.4 Método de Kuhn

Outro filosofo importante que pensou sobre o método científico foi Thomas Kuhn (Figura 1.7), que descreve em seu livro "A estrutura das Revoluções Científicas"\* a construção do saber não como acúmulo de conhecimento, mas como a sucessão de revoluções científicas, onde há a substituição de um paradigma científico por outro.

#### pt0pt

Kuhn vai olhar para o fazer da ciência a partir de uma visão histórica e sociológica, e não apenas lógica e empírica. Revendo o desenvolvimento da ciência na história, vai construir a ideia de paradigmas científicos, crises e revoluções científicas.

Em seu livro, o termo paradigma aparece com muitos significados, mas em seu posfácio, destacam-se dois: 1) todo o conjunto de conhecimento partilhado por uma comunidade científica e 2) as soluções concretas para problemas que podem ser base para a solução de outros problemas [5].





Figura 1.6: Karl Popper (1902-1994) Fonte: LSE Library, disponível em: https://www.flickr.com/photos/ lselibrary/

Observação enunciado singular j indução j enunciado universal

<sup>\* &</sup>quot;The Structure of Scientific Revolutions"



**Figura 1.7:** Thomas Kuhn (1922-1996), Fonte: Bill Pierce, Wikimedia Commons



Figura 1.8: Precessão do periélio de Mercúrio: a Mecânica Newtoniana prevê que o periélio (ponto mais próximo do Sol) da órbita de um planeta é alterado com o tempo, porém havia uma diferença entre o valor esperado e o valor medido para a órbita de Mercúrio, que só foi solucionada com a Mecânica Relativística. (mauricio desenhar)



Figura 1.9: Modelo do proton (mauricio desenhar)

Kuhn vai chamar de "ciência normal"a pesquisa baseada no conhecimento científico já estabelecido. A partir de uma teoria, busca-se resolver "quebra-cabeças"quanto ao conhecimento, encontrar implicações da teoria vigente, fazer pequenos ajustes a ela de modo a corresponder ao que é observado e testar sua robustez.

No fazer da ciência normal, o paradigma vigente não é capaz de solucionar alguns desses quebra-cabeças ou adequar-se ao que é observado na natureza. Estabelece-se então um período de crise, em que se questiona se o paradigma é adequado para a explicação dos problemas encontrados.

Esse período pode durar muito tempo e, durante ele, surgem novos paradigmas que competem entre si para se estabelecer como o paradigma vigente. Kuhn chama esse processo de "ciência extraordinária". Chama-se revolução científica a troca de um paradigma por outro. Assim, inicia-se de novo o período de ciência normal.

Como exemplo, podemos citar a mecânica newtoniana, que explica bem como a natureza se comporta em escalas do dia a dia, porém quando extrapolada para alguns cenários, começa a apresentar problemas que não podem ser resolvidos, como a precessão do periélio de Mercúrio (Figura 1.8) e a constância da velocidade da luz em um meio independente do observador. Então, após sua crise, a Mecânica Newtoniana foi substituída pela Mecânica Relativística.

pt0pt

# 1.5 Modelos científicos

Uma ferramenta importante dentro da ciência são os modelos científicos. Modelos são descrições simplificadas dos fenômenos que observamos, facilitando seu entendimento. Por ser uma simplificação do fenômeno, um modelo não representa a realidade tal qual como ela é, porém descreve comportamentos do objeto descrito com algum grau de confiança em determinado intervalo de validade.

De forma geral, podemos dizer que um modelo é um conjunto de ideias que descreve um processo, o mecanismo por trás do fenômeno, como os componentes do objeto de estudo interagem e resultam no que é observado. [6]

Esse conjunto de ideias podem levar a representações diversas sobre o fenômeno, como gráficos, equações matemáticas, versões do objeto de estudo em escalas diferentes e esquemas, de modo a facilitar a compreensão e comunicação do modelo. Um próton, (ver sessão 3.2) por exemplo: sabemos que ele é formado por três quarks (ver sessão 5.5), que interagem entre si através da interação nuclear forte. Com isso, conseguimos montar uma representação gráfica (Figura 1.9) que facilita nosso entendimento e comunicação do que é um próton. Um bom modelo científico deve ser possível de ser falseado, como discutido na seção 1.3. Além disso, deve explicar os dados observados a respeito do fenômeno que representa, fazer previsões e guiar experimentos.

Os mecanismos por trás de um modelo podem fazer previsões sobre fenômenos não antes estudados, o que possibilita novas descobertas. Caso o que foi previsto não concorde tão bem com o que foi observado posteriormente, o modelo deve ser reformulado para abranger esses novos dados, ou até mesmo substituído por um outro que explique melhor esse novo fenômeno.

Eles também nos ajudam a resolver problemas. Suponha, por exemplo, um modelo que represente a distribuição de um determinado tipo de peixe em um região. Através dele, é possível prever a quantidade de peixe que encontraremos em cada lugar dessa região de acordo com diversos dados, como estação do ano, temperatura, direção das correntes de água, entre outros. Então, podemos usar esse modelo para guiar políticas de pesca, de modo a determinar quais áreas, em quais períodos e em quais quantidades os peixes podem ser pescados peixes nessa região, de forma sustentável, evitando o consumo excessivo que pode causar sua extinção. Em alguns casos, é muito perigoso ou muito custoso realizar um experimento; podemos, então, usar os modelos para fazer simulações. [7]

Temos que lembrar sempre que a ciência não é estática, está sempre mudando e os modelos estão sendo constantemente testados. Hoje, podemos ter vários modelos que tentam explicar a mesma coisa e a qualquer momento novos dados podem surgir de modo a descartar vários deles, sobrando apenas um. Alguns modelos são muito bem estabelecidos hoje em dia e a qualquer momento eles podem ser substituídos por um completamente novo.

# Movimento Browniano: Contactando o mundo macroscópico com o microscópico

# 2

# 2.1 Introdução

Uma pergunta que um cientista deve sempre ter em mente é: como as hipóteses se encaixam e explicam fenômenos da natureza? É possível testar nossas alegações (ver seção 1.3)?

Não é diferente para a hipótese atômica (Capítulo 3), isto é, a ideia de que a matéria é constituída de pequenos elementos indivisíveis. Qual o tamanho destes elementos? Existe diferença entre esta hipótese e a ideia de substâncias que podem ser infinitamente divididas em pedaços cada vez menores?

Uma das grandes observações experimentais que mudou nossa maneira de enxergar o mundo microscópico foi o chamado "movimento Browniano". Através dele tivemos uma das primeiras observações que conectaram o mundo macroscópio ao microscópico.

Em 1827, o botânico Robert Brown observava grãos de pólen suspensos em água através de um microscópio quando percebeu que pequenas partículas que se desprendiam desses grãos nunca ficavam paradas, executando um movimento aparentemente aleatório.

Considerando que ele estudava material biológico, seria plausível atribuir este movimento ao fato das partículas estarem "vivas". Porém, o próprio Brown descartou esta hipótese ao observar o mesmo efeito em partículas de poeira, vindas de material inorgânico.

O que estava por trás deste fenômeno que ficou conhecido como movimento browniano? O completo entendimento veio somente em 1905, quando Albert Einstein, um físico alemão, descreveu o movimento browniano como causado pelas pequenas colisões das partículas presentes na água com o grão de pólen.

Neste capítulo descobriremos como podemos testar a hipótese atômica através do entendimento deste fenômeno aparentemente simples e sem importância.

# 2.2 O andar do bêbado

O movimento do grão de pólen é visto como aleatório. Como descrevêlo em linguagem matemática?

Um exemplo clássico é o chamado "andar do bêbado". Imagine uma pessoa embriagada que não consegue ficar parada. Ela não tem intenção de ir a lugar algum, então podemos considerar que a probabilidade dela dar um passo para qualquer direção é a mesma.

2.1 Introdução 9
2.2 O andar do bêbado 9
2.3 Visão macroscópica: A lei de Sto-
kes
2.4 Visão microscópica: Termodinâ-
mica 13
2.5 A conexão de dois mundos:
Constante de Avogrado 14
2.6 Redefinição do número de Avo-
grado: Sistema internacional de
unidades



**Figura 2.1:** Probabilidade do bêbado estar em um lugar no próximo passo até o quarto passo.

Para simplificar as coisas, considere que ela se move sobre uma linha. Assim, existe 50% de chance dela dar um passo para a esquerda e 50% para a direita.

#### pt0pt

Mas o que acontece quando nosso bêbado dá muitos passos? No primeiro passo, ele pode estar à direita ou à esquerda de onde começou. Para o segundo passo, existem 4 possibilidades: direita-direita, esquerdaesquerda, direita-esquerda e esquerda-direita. Note que em duas das possibilidades ele está de volta à posição inicial, isto é, 50% de chance de estar no meio e 25% de ter dado dois passos para cada um dos lados.

Na figura 2.1 vemos as probabilidades até o quarto passo do bêbado. Aqui notamos algumas coisas interessantes: as maiores probabilidades são sempre próximas da posição inicial do bêbado, porém, com mais passos, passa a existir a possibilidade do bêbado estar bem longe. Além disso, as probabilidades são simétricas: se existe uma probabilidade da pessoa estar dois passos para a esquerda, existirá a mesma probabilidade de estar dois passos à direita.

Considerando esta simetria, um fato importante surge: se usarmos a média da posição para descrever este movimento, sempre tremos este valor igual a zero, independente do número de passos! Assim, a média sozinha não consegue descrever um movimento aleatório.

Uma possibilidade é considerar a média do quadrado da posição, pois números ao quadrados são sempre positivos. Assim temos uma ideia de quão longe a partícula foi em relação à posição inicial, apesar de perdermos a noção de direção.

Para calcular a média do quadrado da posição ( $\langle x^2 \rangle$ ), basta pegar cada uma das posições possíveis ao quadrado, multiplicar pela sua probabilidade e somar. Por exemplo, se o número de passos foi dois, temos o seguinte:

$$\langle x^2 \rangle = (-2)^2 \cdot (25\%) + (-1)^2 \cdot (0\%) + (0)^2 \cdot (50\%) + (1)^2 \cdot (0\%) + (2)^2 \cdot (25\%) = 2$$
 (2.1)

Calculando o valor de  $\langle x^2 \rangle$  até o passo 3 e usando os valores da figura 2.1, temos:

$\langle x^2 \rangle$	Passo (N)
0	0
1	1
2	2
3	3

Percebemos que esse valor é proporcional ao número de passos, que denotamos por N. Assim:

**Tabela 2.1:** Média de  $x^2$  para um determinado número de passos.



Figura 2.2: Representação do movimento Browniano: as linhas pretas representam a trajetória da partícula. O livre caminho médio é quanto a partícula se desloca em média até ser desviada devido à colisão com um átomo da substância em que está suspensa.

$$\langle x^2 \rangle = N \tag{2.2}$$

Uma coisa importante a se considerar é que assumimos que o tamanho do passo do bêbado é igual a 1. Caso o tamanho deste passo seja  $\Delta s$ , a fórmula acima precisa ser corrigida:

$$\langle x^2 \rangle = N(\Delta s)^2 \tag{2.3}$$

Note que este será o caso quando consideramos o movimento de uma partícula de pólen. Na realidade, os passos não terão o mesmo tamanho. Sempre consideramos o chamado "livre caminho médio", que é a distância percorrida em média pela partícula antes de colidir com um átomo e mudar de direção.

Outra coisa importante é que o número de passos não é algo que possamos medir em um experimento, então o substituímos pelo tempo em que observamos o sistema (t), dividido pelo tempo médio entre colisões ( $\Delta t$ ):

$$N = \frac{t}{\Delta t} \tag{2.4}$$

Assim:

$$\langle x^2 \rangle = t \frac{(\Delta s)^2}{\Delta t} = 2Dt$$
 (2.5)

Onde estamos definindo o chamado "coeficiente de difusão" como  $D \equiv \frac{(\Delta s)^2}{2\Delta t}$ .

## 2.3 Visão macroscópica: A lei de Stokes

Agora que temos uma ideia da teoria matemática por trás de movimentos aleatórios, vamos descrever o movimento do grão de pólen através da Física.

O movimento de pequenas esferas em um fluido viscoso é dado pela chamada lei de Stokes, que descreve uma força de arraste atuando sobre o corpo em estudo ao se mover pelo fluido, dada pela seguinte expressão:

$$F = 6\pi\eta r v \tag{2.6}$$

Onde *r* é o raio da esfera, *v* é a velocidade da esfera e  $\eta$  é a chamada viscosidade dinâmica do fluido.

Considerando esta força constante por um período  $\Delta t$  de tempo, podemos escrever uma equação horária de movimento para o grão:

$$\Delta x = v_0 \Delta t + \frac{1}{2}a(\Delta t)^2 = v_0 \Delta t + \frac{3\pi \eta r v}{m}(\Delta t)^2$$
(2.7)

Aqui usamos *m* para denotar a massa do grão,  $v_0$  a velocidade inicial do grão e, na segunda passagem, usamos a segunda lei de Newton (*F* = *ma*) para calcular a aceleração (*a*).

Podemos agora calcular o valor médio dessa equação, considerando, como na seção anterior, que  $\Delta t$  é o tempo médio entre colisões. Para tanto, vamos considerar que, como o movimento para qualquer direção é igualmente provável, a média de velocidades iniciais é nula ( $\langle v_0 \rangle = 0$ ). Assim:

$$\langle \Delta x \rangle = \frac{3\pi\eta R}{m} \langle v \rangle (\Delta t)^2.$$
 (2.8)

Substituindo  $\langle v \rangle = \langle \Delta x \rangle / \Delta t$ , temos:

$$\Delta t = \frac{m}{3\pi\eta r} \tag{2.9}$$

Lembrando do coeficiente de difusão definido na seção anterior:

$$D = \frac{(\Delta s)^2}{2\Delta t} \to D = \left(\frac{\Delta s}{\Delta t}\right)^2 \frac{m}{6\pi\eta r}$$
(2.10)

Então podemos finalmente concluir que:

$$\langle v_0^2 \rangle = \left(\frac{\Delta s}{\Delta t}\right)^2 = \frac{6\pi\eta rD}{m}$$
 (2.11)

Assim, temos uma descrição macroscópica do movimento, mas precisamos de uma conexão com a teoria microscópica.

## 2.4 Visão microscópica: Termodinâmica

A grande contribuição de Einstein foi justamente pensar no problema do movimento browniano tanto do ponto de vista macroscópico quanto microscópico. Para o tratamento microscópico usamos a termodinâmica, que naquela época já admitia uma formulação atomística da matéria.

A grande hipótese usada nesta descrição é que o grão de pólen suspenso em água se comporta como uma partícula em um gás, onde seu movimento aparentemente aleatório é causado pelas colisões entre partículas, no nosso caso entre as moléculas de água e o grão.

Assim podemos usar a equação para energia de um gás no caso unidimensional:

$$E = \frac{1}{2}nRT \tag{2.12}$$

Onde n é o número de mols do gás, R é constante dos gases ideais e T é a temperatura. Considerando que a energia está igualmente dividida em todas as moléculas que compõem nosso "gás", podemos dizer que a energia do grão de pólen (e) é:

$$e = \frac{1}{2} \frac{nRT}{N} = \frac{1}{2} \frac{RT}{N_A}$$
 (2.13)

Sendo *N* o número total de moléculas,  $N_A$  é o chamado número de Avogrado que diz quantas moléculas existem em um mol e  $n = N/N_A$ .

Para o grão, esta energia é cinética, pois é responsável por seu movimento. Logo:

$$e = \frac{1}{2} \frac{RT}{N_A} = \frac{1}{2} m \langle v_0^2 \rangle \rightarrow \langle v_0^2 \rangle = \frac{RT}{mN_A}$$
(2.14)

Note que conseguimos calcular a velocidade quadrática de livre caminho médio ( $\langle v_0^2 \rangle$ ) através de duas teorias distintas. Vamos comparálas:

$$\langle v_0^2 \rangle = \frac{RT}{mN_A} = \frac{6\pi\eta rD}{m}$$
(2.15)

Assim, podemos determinar o número de Avogrado:

$$N_A = \frac{RT}{6\pi\eta r D} \tag{2.16}$$

Para tanto, é necessário realizar um experimento para medir o coeficiente de difusão, que pode ser feito observando os deslocamentos do grão de pólen, utilizando a equação 2.5 e medindo a temperatura do líquido, visto que os outros valores são tabelados. Este foi o primeiro experimento a dar uma medida confiável de  $N_A$ , dando uma noção de diferença de escalas entre o mundo microscópico e macroscópico.

# 2.5 A conexão de dois mundos: Constante de Avogrado

Para entender quão importante foi a medida do número de Avogrado precisamos falar um pouco sobre o conceito de mol. A Química adota modelos atômicos há muito tempo para explicar as leis observadas empiricamente, como a lei da conservação das massas e a proporção de reagentes necessários para uma reação química. No final do século XVIII, John Dalton já havia proposto o primeiro modelo científico do átomo e, desde então, ele foi usado para descrever suas observações experimentais.

Em 1805, Dalton publica a primeira tabela com massas atômicas, onde as massas dos elementos são inferidas através da estequiometria, isto é, das proporções entre elementos químicos em uma reação, mostrando a massa de vários elementos em relação à massa do Hidrogênio.

Em 1811, Amedeo Avogrado propõe que o volume de um gás em uma determinada pressão e temperatura dependia do número de átomos desse gás, independentemente da natureza química do gás. A hipótese de Avogrado apenas diz que volumes iguais de gases diferentes possuíam pesos diferentes, mas que os valores são proporcionais.

A diferença entre as massas de volumes iguais de diferentes gases era proporcional à massa atômica inferida pela estequiometria, mostrando uma ligação entre propriedades microscópicas e macroscópicas de um gás.

Para as chamadas condições naturais de temperatura e pressão (CNTP), isto é, temperatura igual a 0°C e pressão igual a 1 atm, temos que 22,4 litros de um gás pesa o equivalente em gramas da sua massa atômica. Por exemplo, a massa atômica de uma molécula de oxigênio ( $O_2$ ) é 32; assim, 22,4L de  $O_2$  pesam 32 gramas.

Mas qual era a quantidade de átomos nesse volume que faz uma correspondência de um pra um entre a massa do gás e massa atômica do elemento químico? Não era possível determiná-la. Esta quantidade de moléculas foi batizada de "mol"pelo químico Wilhelm Ostwald em 1894.

É exatamente isto que a constante de Avogrado determina: a quantidade de partículas em um mol. E por isto a sua medida precisa foi um marco muito importante para a teoria atômica, pois definiu a diferença de escalas entre eles dois mundos que pareciam separados, estabelecendo a ponte entre o microscópico e o macroscópico.

# 2.6 Redefinição do número de Avogrado: Sistema internacional de unidades

Em 2019, o Sistema Internacional de Unidades, que define o valor das unidades das grandezas físicas (como kg, m, A, etc), foi redefinido

15

através de constantes físicas. Entre as unidades afetadas está o mol, que atualmente é definido pela constande de Avogrado.

Assim, pela definição atual, o número de Avogrado é um valor exato dado por [8]:

$$N_A = 6,02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$
 (2.17)

Isto significa que a relação entre massa de um mol de átomos e a massa atômica é aproximada, pois os erros experimentais que antes entrariam na constante de Avogrado agora entram nessa relação. Porém, para fins práticos, dada a precisão necessária para perceber esta diferença, grande parte dos experimentos não detectará esta mudança de definição.

# Estrutura Atômica

# 3

# 3.1 Núcleo atômico de Rutherford

A humanidade sempre buscou aumentar seu conhecimento, marcando a história com descobertas importantes, não apenas no domínio de novas tecnologias, mas também para o seu avanço como civilização. Vamos pensar que, a cerca de 100 anos atrás, todo esse aparato tecnológico não estava disponível e, por exemplo, esse texto, precisaria de um trabalho muito maior para ser feito, não apenas na parte da pesquisa, mas também na sua escrita e publicação.

Foram em tempos assim, mais precisamente em 1871 na Nova Zelândia, que nasceu Ernest Rutherford. A sua família veio de uma origem muito humilde e ele era o quarto de doze filhos. Seu pai era um mecânico e agricultor e sua mãe, professora de uma escola infantil. Desde muito pequeno precisou ir em diversas bibliotecas na região de Spring Grove, o local em que nasceu, para conseguir aumentar o seu conhecimento através do próprio esforço. E com isso, tinha um sonho: sair da Nova Zelândia e ir para Cambridge, uma das faculdades de maior renome do mundo.

E podemos dizer que ele conseguiu, pois esse capítulo fala de sua maior descoberta: o núcleo atômico.

Para começar toda essa conversa, é preciso falar do conceito do átomo. Ele surgiu na Grécia Antiga, ou seja, nos primórdios do pensamento filosófico da humanidade. O homem começou a questionar a origem e composição de tudo o que o cercava. Dos elementos fundamentais até as coisas mais complexas, como as plantas, tudo era motivo de observação pelos gregos, mas, como o pensamento científico estava em seu estágio de nascimento, não existiam equipamentos que pudessem provar essas teorias. Além disso, algumas escolas de pensamento acreditavam que a razão era uma maneira mais confiável de chegar a conclusões em detrimento dos sentidos, que poderiam ser enganados. Com essas teorias surgiu um conceito chamado "atomismo", que foi uma corrente de pensamento que começou com Demócrito e Leucipo e chegou até Rutherford, ou seja, houve toda uma construção de conhecimento desde os gregos até os dias de hoje para a explicação do átomo.

### pt0pt

Segundo Demócrito e Leucipo, tudo era composto de partículas indivisíveis e imutáveis. Tanto que a palavra átomo tem origem grega e significa "o que não pode ser cortado".\*

3.1 Núcleo atômico de Rutherford17
3.2 Modelo de Bohr 19
Introdução Histórica 19
Movimento dos elétrons ao re-
dor do núcleo 19
O núcleo do átomo 24
Átomos Hidrogenoide 26
Níveis de Energia 26
Entrada e Saída de Energia 27
Proporções
Os postulados de Bohr 30
Imprecisões no Modelo de Bohr:
ele estava errado? 30
3.3 Modelo Atual do Átomo 31
O Princípio da Incerteza de Hei-
senberg 32
A função de onda de Schrödin-
ger 34
Função de onda do Átomo de
Hidrogênio 35
Verdadeira solução para o pro-
blema da luz emitida pelo Hidro-
gênio
A Probabilidade 37
Os Números Quânticos, as Sub-
camadas e os Orbitais 40
Como construir um átomo
grande? 44
Como desenhar um átomo? 47
Conclusão 49



Figura 3.1: Ernest Rutherford. Fonte: George Grantham Bain Collection (Library of Congress), Wikimedia Commons.

<sup>\*</sup> Esse conceito já foi desmitificado pela ciência atual, porque o átomo pode ser dividido através do método de fissão e existe um fenômeno chamado "radioatividade" que faz um elemento se transformar em outro (Rutherford entra aqui :D). O que chamamos hoje de partículas elementares são partículas que aparentam ser indivisíveis e sem outras

A corrente atomista criada pelos gregos ganhou base científica e avanços com cientistas como John Dalton, que formulou o modelo atômico da bola de bilhar, onde o átomo é uma esfera indivisível, e J.J. Thomson, com o modelo do pudim de passas, que vê o átomo com uma região positiva, com cargas negativas pontuais espalhadas, que são os elétrons 5.1.

Depois dessa breve contextualização é possível desenvolver o conceito descoberto por Rutherford. Ele colocou o modelo de Thomson à prova através de um experimento que causou uma revolução na maneira como os físicos entendiam matéria e o átomo.

#### pt0pt

#### pt0pt

Este experimento é conhecido como experimento da folha de ouro ou experimento de Rutherford. No final da primeira década do século XX, o jovem Dr.Hans Geiger (1882-1945) e o estudante de graduação Ernest Marsden (1889-1970) atuavam no Laboratório dirigido por Ernest Rutherford (1871-1937) em Manchester e procuravam desenvolver novos métodos de contagem de partículas alfa nos fenômenos radioativos investigados e também explicar os resultados (impenetrabilidade, impermeabilidade, espalhamento) obtidos quando diferentes tipos de materiais eram bombardeados com essas radiações. O experimentou consistiu em bombardear uma fina folha de ouro com partículas alfa, isto é, núcleos de hélio (dois prótons e dois nêutrons), emitidas pelo elemento rádio, que já era conhecido na época. O resultado esperado, usando o modelo de Thomson, era que essas partículas seriam levemente desviadas de maneira uniforme devido à carga elétrica e à homogeneidade da matéria com átomos massivos.

Porém, o resultado encontrado não foi este. O observado foi que a maioria das partículas alfa atravessavam a folha de ouro sem nenhuma deflexão, e algumas poucas voltavam na direção do feixe. A conclusão de Rutherford foi que a maior parte do espaço é vazia e, em alguns pontos, existia uma concentração de cargas positivas, que eram responsáveis pela deflexão das partículas alfa 3.4. Assim, através do experimento de Geiger e Marsden, Rutherford formulou o seu modelo atômico, com um núcleo massivo com carga positiva no meio, e com elétrons (que já havia sido descoberto no experimento de Thomson 5) orbitando ao redor, muito análogo a um sistema planetário orbitando uma estrela.

#### pt0pt

Realizando o mesmo experimento, porém com elementos mais leves que o ouro, Rutherford observou que quando ocorria o espalhamento das partículas alfa para trás, eram emitidos núcleos de hidrogênio, que não poderiam ter vindo de outro lugar que não o núcleo dos átomos. Assim, Rutherford também descobriu o próton como um constituinte do núcleo atômico.



Figura 3.2: Hans Geiger. Fonte: Autor desconhecido, Wikimedia Commons



**Figura 3.3:** Ernest Marsden (1921). Fonte: S P Andrew Ltd, Wikimedia Commons.

estruturas que as formam. Caso a ciência descubra uma subestrutura, elas deixarão de ser elementares, assim como os prótons e os nêutrons que falaremos adiante.

Experimentos análogos ao de Geiger e Marsden são feitos até hoje nos aceleradores de partículas, porém ao invés de colidirmos um feixe de partículas com objetos parados, podemos também acelerá-los a altas energias, colidirmos um feixe partículas com outro e analisar o produto dessa colisão, que são a base para os atuais colisores de partículas.

# 3.2 Modelo de Bohr

## Introdução Histórica

Um dos modelos atômicos mais importantes da história da Física Atômica foi o **Modelo de Bohr**. Vamos, agora, entender um pouco mais sobre como esse modelo é, como ele revolucionou a Ciência do Século XX e quais são uas imprecisões que o tornam incompleto.

Para começar, o cientista Niels Bohr foi um estudante do importante físico da seção anterior, Rutherford - o criador do "Modelo Planetário do Átomo". Contudo, Bohr conseguiu superar o seu mestre e expandir a teoria atômica adicionando uma colher de *Física Quântica* na história.

### pt0pt

Até o início do século XX, os físicos usavam apenas a chamada *Física Clássica* - o que já incluía diversas áreas ainda hoje muito utilizadas, como o estudo do *lançamento de corpos*, do *calor* e da *eletricidade*. Entretanto, percebeu-se que a Física Clássica não era suficiente para estudar alguns fenômenos mais complexos - como fenômenos MUITO GRANDES, a exemplo dos estudados pela *Astrofísica/Cosmologia*, e os fenômenos muito pequenos, como os estudados pela *Física de Partículas*.

### Movimento dos elétrons ao redor do núcleo

O modelo atômico de Bohr também é conhecido como Modelo Planetário do Átomo (como o de Rutherford), por conta da sua semelhança com os modelos planetários tradicionais.

Genericamente, os modelos planetários são formados por uma estrela (como o Sol) no centro junto aos planetas, que giram ao redor dela em órbitas quase circulares, como na imagem abaixo:



Figura 3.4: Segundo o Modelo de Thomson, um feixe de partículas alfa ao ser colimado em direção à folha de ouro passaria reto sem nenhuma deflexão, já que o átomo estaria neutro. O que foi observado experimentalmente e que serviu de base para a formulação do Modelo Atômico de Rutherford foi que algumas partículas alfa eram defletidas em outras direções.

Fonte: Kurzon, Wikimedia Commons.



Figura 3.5: Niels Bohr, físico. Fonte: George Grantham Bain, Wikimedia Commons.



**Figura 3.6:** Imagem ilustrativa do sistema solar.

Vamos agora entender o motivo dos planetas ficarem girando ao redor do Sol e não caírem dentro dele?

Na Física, existe uma lei que diz que um objeto irá continuar se movendo com uma mesma velocidade em uma direção reta para sempre, se não houver uma força para pará-lo (Lei da Inércia) [9, 10]. Assim, se um planeta estivesse sozinho no espaço, movendo-se para frente, ele continuaria a se mover infinitamente, sem diminuir sua velocidade.



Figura 3.7: Planeta continua se movendo quando não há nenhuma força para impedi-lo.

Contudo, o Sol exerce uma força no planeta que está ao redor dele exatamente igual à necessária para mudar a direção da velocidade do planeta.



**Figura 3.8:** Direção da velocidade do planeta muda por conta da força do sol.

Desta maneira, a cada instante o planeta muda a direção de sua velocidade, de forma que ele se mantém em órbita quase circular ao redor do Sol [9, 11].



Figura 3.9: Planeta fica em órbita.

Analogamente, no modelo de Bohr, há um **Núcleo Atômico** e, ao redor dele, umas 'particulinhas' chamadas de elétrons ficam se movimentando em órbitas circulares [12], como no desenho 3.10 abaixo:



Figura 3.10: Imagem ilustrativa do modelo de Bohr.

Esse fato já foi uma grandiosa descoberta para a Física Atômica... Deixa eu explicar o motivo:

Antes do modelo de Bohr, os cientistas utilizavam o modelo de Rutherford, que também via o átomo como um modelo planetário, mas não conseguia explicar como os elétrons estavam. Vou tentar explicar a partir das imagens abaixo, mas antes é importante você conhecer duas propriedades básicas do eletromagnetismo:

Muitos objetos têm uma característica que se chama "carga elétrica". O núcleo tem uma carga elétrica positiva e o elétron tem uma carga elétrica negativa. No estudo da eletricidade, nós sabemos que cargas elétricas iguais (*positivo com positivo* ou *negativo com negativo*) têm uma tendência a se afastar:



Já cargas elétricas diferentes (*positivo com negativo*) têm uma tendência a se aproximar. Essas tendências são descritas por uma força chamada de força elétrica.

**Figura 3.11:** Representação do afastamento de dois objetos de cargas iguais pela ação da Força Elétrica.



Desta forma, se os elétrons estivessem parados, a força elétrica iria puxá-los para o centro e eles iriam colidir com o núcleo, pois o núcleo tem uma carga positiva e os elétrons, uma carga negativa, como na imagem abaixo [13]:



No outro caso, se os elétrons estivessem em movimento, existiria um outro problema que Rutherford não soube explicar...

Na Física Clássica, se um objeto que tem uma carga elétrica se move alterando sua velocidade, ele tende a perder energia. Assim, como o elétron têm carga elétrica e está alterando a direção da sua velocidade, ele iria perder energia e, por consequência, diminuir sua velocidade aos poucos, aproximando-se do núcleo até se chocar com ele. [13, 14]



Figura 3.13: O que aconteceria se os elétrons estivessem parados ao redor do núcleo.

Figura 3.12: Representação da aproximação de dois objetos de cargas opostas

pela ação da Força Elétrica.

Figura 3.14: Trajetória do elétron se ele perdesse energia.

A solução de Bohr para esse problema foi bem ousada. Ele propôs que existem camadas no átomo em que os elétrons não respeitam essa última lei da Física Clássica e, portanto, mesmo tendo uma carga elétrica, eles se movem sem perder energia (nem velocidade)\*. Esse foi um dos pontos cruciais do modelo de Bohr: o elétron, em certas camadas específicas, não respeita a Física Clássica na questão de perder energia que falamos agora, mas respeita a Física Clássica em relação a ficar em movimento circular ao redor do núcleo de forma semelhante a como os planetas ficam se movendo ao redor do Sol. Se você quiser entender

<sup>\*</sup> Estamos nos referindo principalmente à "Energia da Velocidade", chamada de *Energia Cinética*, por isso estamos sempre relacionando a perda de energia com a perda de velocidade nessa seção.

mais profundamente, essa hipótese foi proposta levando em consideração a **dualidade onda-partícula do elétron** [15], um conceito que explicaremos melhor na subseção 3.3 do Modelo Atual do Átomo.

#### O núcleo do átomo



O núcleo do átomo foi descoberto em 1911 pelo cientista Ernest Rutherford em um experimento que ficou conhecido como Experimento da Folha de Ouro [16, 17], como explicado nas seções anteriores (3.1). Além disso, o próprio Rutherford, ao repetir os experimentos com alvos mais leves, percebeu que o núcleo atômico era formado de outras partículas, as partículas *sub*atômicas (dentro do átomo), que hoje são chamadas de prótons e nêutrons.

pt0pt

desenho, pois pode ficar infanfil). Podemos pedir para o Maurício fazer um desenho aqui



Figura 3.16: (ainda nao sei se é bom esse desenho, pois pode ficar infanfil). Podemos pedir para o Maurício fazer um desenho aqui

pt0pt

Os **prótons** são partículas de carga positiva que foram descobertas em 1917. Após 50 anos de sua descoberta, foi provado que o próton era formado de três elementos menores chamados de *Quarks*. Falaremos mais sobre eles no capítulo 5, das partículas elementares.

Já os **nêutrons** são partículas de carga neutra (nem positiva, nem negativa) que foram propostos em 1920 por Rutherford para justificar a massa do átomo, porém só foram realmente descobertos em 1932 pelo cientista James Chadwick [18].

Importante destacar que os nêutrons também são formados de *quarks*, mas de um jeito diferente, e, novamente, nós falaremos melhor dos quarks no capítulo 5 sobre partículas elementares.

Desta forma, os prótons e os nêutrons basicamente se encontram um do lado do outro formando o núcleo, como na imagem abaixo:



Figura 3.17: Imagem ilustrativa dos prótons e nêutrons

E quando estivermos falando de um átomo muito leve, seu núcleo pode conter poucos prótons e nêutrons. Um exemplo típico é o átomo de hidrogênio: geralmente seu núcleo não tem nêutrons e tem apenas um próton\*. Portanto, podemos também chamar o próton simplesmente de núcleo de hidrogênio e vice-versa<sup>†</sup>.

Agora, **CUIDADO**: os prótons, os nêutrons e os quarks (e tudo que estamos apresentando neste livro sobre Física de Partículas) não são "círculos" nem "bolinhas" como nas imagens que estamos te mostrando (nem são coloridos dessa forma). Essas imagens são apenas ilustrativas com o intuito de facilitar a compreensão.

Chegando até aqui na sua leitura, uma pergunta que pode surgir é: "Como os prótons podem estar tão perto um do outro, se cargas elétricas iguais se repelem?".

Essa é uma pergunta extremamente interessante e sua resposta não é tão complicada assim... Quer ver só?

Realmente, a força elétrica tende a afastar os prótons um dos outros, contudo, dentro no núcleo do átomo há também uma outra força, uma força mais forte, que puxa um próton para perto do outro. Essa força se chama *Força Nuclear Forte* e será melhor explicada no capítulo **??** sobre o **Modelo Padrão** da Física de Partículas.

<sup>\*</sup> Existem isótopos de hidrogênio, que possuem nêutrons em seu núcleo, como o deutério, que possui um nêutron em seu núcleo

<sup>&</sup>lt;sup>+</sup> A palavra próton e a expressão núcleo de hidrogênio são equivalentes.

# Força Forte



Figura 3.18: Força Elétrica atuando em duas partículas positivias (azul) e Força Forte (roxo).



Figura 3.19: Max Planck, físico



Figura 3.20: Einstein, físico

Força Elétrica

## **Átomos Hidrogenoide**

O átomo mais simples da natureza é o Átomo de Hidrogênio (H), uma vez que o Hidrogênio tem apenas um próton e um elétron. Assim, por muitos anos os estudos sobre os átomos ficaram voltados apenas ao átomo de hidrogênio e a outros átomos semelhantes, chamados de Átomos Hidrogenoides.

Os Átomos Hidrogenoides são formados apenas por um elétron e um núcleo (que pode ter mais de um próton e pode ter nêutrons) [19]. Considerando o núcleo como um corpo, os problemas envolvendo átomos hidrogenoides são conhecidos como problemas de dois corpos.

As conquistas que Bohr obteve para seu modelo foram principalmente para átomos hidrogenoides, pois são os átomos em que conseguimos resolver as contas necessárias (demais átomos dependem de medidas experimentais para serem caracterizados), portanto iremos focar apenas neles por agora. Na subseção 21 sobre "Como construir um átomo grande" da seção 3.3 do "Modelo Atual do Átomo" iremos estender a teoria para átomos maiores.

## Níveis de Energia

Um dos principais pilares da Mecânica Quântica foi proposto por um cientista chamado Max Planck (figura 3.19) e tratava a energia de uma forma quantizada, isto é, pensava na energia como um conjunto de pequenos pacotes chamados de quanta (que é o plural em grego de quantum). Posteriormente, Einstein (figura 3.20) utilizou a ideia da energia em pacotes para explicar um fenômeno chamado de Efeito Fotoelétrico.

pt0pt

pt0pt

E os elétrons?

O modelo de Rutherford não conseguia explicar como os elétrons se distribuíam ao redor do núcleo e a qual distância eles estavam do núcleo [13]. Contudo, Bohr conseguiu resolver esse problema utilizando justamente a ideia da energia em pacotes e dizendo que os elétrons estavam em camadas fixas\* e que cada uma dessas camadas conseguia

<sup>\*</sup> Também chamadas de quantizadas ou de discretas.

segurar um número específico de elétrons.

Observe o desenho abaixo (fig. 3.21):



Podemos ver que cada camada tem um número<sup>\*</sup>, *n*, representando-a, esse número *n* é chamado de **número quântico principal**)<sup>†</sup>. A grande ideia de Bohr foi dizer que um elétron tem que estar "dentro" de uma dessas camadas, isto é, não pode existir um elétron entre duas camadas. Na seção 3.3 de Modelo Atual do Átomo, veremos que cada uma dessas camadas poderá conter um número específico de elétrons e que essas camadas poderão ser subdivididas em outras subcamadas.

### Entrada e Saída de Energia

Um fenômeno muito conhecido na época de Bohr era a luz emitida pelo Átomo de Hidrogênio (figura 3.23). Um dos principais cientistas que estudava esse fenômeno foi um pesquisador chamado Johannes Rydberg (figura 3.22) que percebeu (junto com outros cientistas) que as cores (comprimento de onda, mais precisamente) emitidas são distribuídas em valores específicos bem definidos. Ele, então, elaborou experimentalmente a seguinte equação que relaciona o comprimento de onda emitido,  $\lambda$ , com um número *n* que pode ser 1,2,3,... e uma constante,  $R_y$ , chamada de constante de Rydberg [20]:

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right). \tag{3.1}$$

pt0pt

 $<sup>^{\</sup>dagger}$  O termo "principal" é utilizado, pois veremos que existem outros número quânticos além do n.



Figura 3.22: Johannes Rydberg, físico.



<sup>\*</sup> É comum alguns autores utilizarem as letras do alfabeto começando de K (para n = 1) até Q (para n = 7)



Figura 3.23: Essa imagem tem direitos autorais e deverá ser alterada

Uma das principais conquistas do modelo de Bohr é que, com a ideia de elétrons em camadas, ele conseguiu prever precisamente os resultados de entrada e saída de energia do Átomo de Hidrogênio obtidos por Rydberg da equação 3.2. Isto é, Bohr conseguiu derivar de forma teórica as relações experimentais de Rydberg.

Assim, Bohr chegou à equação:

$$\frac{1}{\lambda} = R_y Z^2 \left( \frac{1}{\left(n_{\text{final}}\right)^2} - \frac{1}{\left(n_{\text{inicial}}\right)^2} \right).$$
(3.2)

em que *Z* é o número de prótons no átomo, e n é a camada inicial e final que o elétron irá partir/chegar.

Além disso, Bohr chegou à equação abaixo, que dá a energia de cada camada do átomo

$$E = -R_y \frac{Z^2}{n^2}.$$
 (3.3)

Agora que já entendemos o formalismo matemático, vamos entender de forma qualitativa como funciona a entrada e saída de energia do átomo. É interessante notar que essa teoria foi proposta por Bohr e é válida (nas devidas proporções) até hoje.

Mas, para não deixar nada confuso, é importante enfatizarmos que quando falarmos sobre saída de energia, de luz ou de radiação, estamos falando exatamente do mesmo conceito, pois a palavra "luz" é equivalente à "radiação eletromagnética" (que às vezes chamamos apenas de radiação), que é uma forma de energia. Outros dois termos muito utilizados são "onda eletromagnética" e "fóton", mas falaremos mais deles no capítulo 5 sobre Partículas Elementares.

Observem a imagem 3.24 abaixo:




Quando o elétron absorve energia, ele sai da sua camada de origem e pula para uma camada superior, mudando para um **"estado excitado"**. Com o passar do tempo, o elétron volta a uma camada mais interna, pois esta tem menos energia, e o átomo libera radiação eletromagnética! Essa radiação eletromagnética às vezes pode ser em forma de luz visível ao olho humano e às vezes pode ser em forma de luz invisível, isto é, fora do espectro que podemos enxergar.

É interessante também notar que a energia que o átomo absorve deve ser exatamente igual à variação de energia entre as camadas iniciais e finais e que o comprimento de luz emitido será exatamente aquela

prevista pela equação (3.4) de Rydberg  $\left(\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{(n_f)^2} - \frac{1}{(n_i)^2}\right)\right)$ 



Figura 3.25: Veja nosso vídeo sobre medidas e escalas.

pt0pt

Proporções

As imagens que apresentamos nessa seção são muito boas para compreendermos melhor as camadas do Átomo de Bohr, contudo elas carregam uma falha muito grande... As PROPORÇÕES!! Como você pode ver no nosso vídeo sobre escalas (figura 3.25), os elementos do átomo têm um tamanho bem particular!! Podemos fazer a seguinte comparação: se um átomo fosse um campo de futebol (figura 3.27), o núcleo atômico seria a bola e os elétrons seriam apenas as pequenas poeiras que vagam pela arquibancada e, enquanto isso, todo o resto seria um grande espaço vazio!! Um desenho que representaria melhor essas proporções seria o desenho 3.26, entretanto é bem mais difícil estudar as propriedades atômicas nele, não é mesmo?!







Figura 3.27: Campo de futebol.

# Os postulados de Bohr

Já conseguimos recapitular os principais pontos do modelo de Bohr. Agora, podemos organizar esses pontos nos postulados de Bohr, isto é, nas hipóteses que Bohr apresentou para a comunidade científica:

- 1. Os elétrons estão em níveis de energia específicos. Expressando de maneira matemática, Bohr diz que a quantidade de rotação\*, L, do elétron é dada em função do número quântico, n, e de uma constante  $\hbar^{\dagger}$  por  $L = n \cdot \hbar$  [12].
- 2. O elétron gira ao redor do núcleo em uma órbita circular da mesma maneira que os planetas giram em torno do sol [12].

É importante ressaltar que a primeira hipótese se mostrou incompleta e a segunda, incorreta...

# Imprecisões no Modelo de Bohr: ele estava errado?

pt0pt



Figura 3.28: Representação incompleta do átomo como conhecemos hoje, mas muito importante para a História da Atomística e para os estudos atuais.

<sup>\*</sup> Mais precisamente, o módulo do momento angular. \*  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ , em que *h* é chamada de constante de Planck.

Com a evolução da ciência, o modelo de Bohr ficou incompleto e ultrapassado. A equação (3.3) obtida por Bohr para o átomo de hidrogênio  $\left(E = -R_y \frac{Z^2}{n^2}\right)$  está correta, contudo as hipóteses que Bohr utilizou para obter a equação de forma teórica mostraram-se equivocadas a partir das novas descobertas científicas. [12, 14].

Contudo, não podemos desvalorizar o trabalho feito por Bohr. Seu modelo atômico trouxe peças essenciais que foram utilizadas por Schrödinger, Pauli e outros cientistas para criação de um modelo atômico mais moderno, mais preciso e mais inovador, o Modelo Atômico Atual.



**Figura 3.29:** Primeira foto: Ehrenfest, Lorentz e Bohr no laboratório de criogenia de Leiden. Segunda foto: Bohr e Einstein na casa de Paul Ehrenfest [21].

# 3.3 Modelo Atual do Átomo

Após o modelo de Bohr, os estudos sobre a Mecânica Quântica continuaram a evoluir rapidamente e muitos foram os cientistas envolvidos nessa evolução. Neste início de seção falaremos de alguns dos principais princípios que levaram ao modelo atual do átomo e sobre cada cientista envolvido nesse estudo.

pt0pt

# Dualidade Onda Partícula

Por volta de 1924, o cientista francês Louis de Broglie (figura 3.31, prêmio nobel em 1929) publicou seu trabalho, em que explica sobre a dualidade onda-partícula.

pt0pt

A dualidade onda-partícula é uma das bases da Física Quântica, que diz que as partículas (como o elétron) podem ser interpretadas como ondas (como a luz), e as ondas podem ser interpretadas como partículas. Essa teoria não é simples nem intuitiva e revolucionou toda a teoria atômica, abrindo um grande mar de novas possibilidades para os estudos na Física, como por exemplo, fenômenos de difração e interferência.

A equação de De Broglie que conectava essas duas áreas é



**Figura 3.30:** Veja nosso vídeo e nosso podcast sobre o modelo atual do átomo.



Figura 3.31: Louis de Broglie, físico.

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$

isto é, o comprimento de onda da partícula é igual à divisão de uma constante h (conhecida como constante de Planck) pelo produto da massa pela velocidade da partícula<sup>\*</sup>.

Essa relação foi extremamente importante para o modelo de Bohr e para que um outro cientista, Schrödinger, escrevesse uma função de onda para descrever o átomo, como veremos daqui a pouco.

# O Princípio da Incerteza de Heisenberg

## A incerteza na Física Clássica

A teoria estatística da probabilidade e da incerteza sempre esteve presente na Física Clássica, pois a Física é uma ciência experimental, isto é, tem resultados baseados em experimentos e, portanto, faz uso da estatística para saber os limites de cada experimento. Não há problema nisso. Existem diversos artifícios matemáticos que são utilizados pelos cientistas para descobrir esses limites do experimento, isto é, a incerteza deles, como o Método dos Mínimos Quadrados, as Funções de Densidade de Probabilidade, os ajustes não lineares e muitos outros.

Um dos conceitos mais antigos e rudimentares da física experimental é a incerteza em uma medição física. Vamos tentar entender como ela funciona?

Imagine que você tem uma régua e deseja medir o comprimento de um pedaço de madeira, *L*, como na figura abaixo:



Bem, se estamos utilizando uma boa régua, nós temos aproximadamente<sup>†</sup> 100% de certeza de que a medida da barra está entre 9 cm e 10 cm. Além disso, nós podemos (talvez de forma ousada) falar que o valor da barra é muito próximo de 9,5 cm. Portanto, a forma mais elementar e mais antiga de se inferir uma medição desse tipo é dizer que  $L = (9,5 \pm 0,5)$  cm. Toda medição física deve ser dada pela notação  $\langle x \rangle \pm \Delta x$ , em que  $\langle x \rangle$  é um valor médio e  $\Delta x$  é o valor da incerteza, ou por outras notações equivalentes.

<sup>\*</sup> Na verdade, a equação mais completa escreve o momento linear, *p*, da partícula e não necessariamente a massa vezes a velocidade. Contudo essa pequena diferença só é importante quando se leva em conta da Teoria da Relatividade de Einstein, na qual não entraremos em detalhes aqui.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup> Quando utilizamos uma teoria avançada de probabilidade, cada algarismo tem uma porcentagem de chance de estar errado, contudo, como essa porcentagem é muito baixa NÃO ENTENDI O QUE SE PRETENDE DIZER COM ESTA NOTA (MARCELO)

Mas, como podemos melhorar essa medição? Existem diversas formas de fazer isso:

Se utilizarmos uma teoria mais moderna de probabilidade, podemos inferir, se a régua for de metal, que  $L = (9, 5 \pm 0, 2)$  cm com probabilidade 65% ou, se a régua for de madeira, que  $L = (9, 5 \pm 0, 3)$  cm com probabilidade de 58%.

Podemos, além disso, repetir a medição diversas vezes e, depois, utilizar a média das medições, implementando na nossa incerteza o quanto os valores desviam da média, isto é, o desvio padrão.

Podemos, também, pegar uma régua que tem maior precisão (imagem 3.32), repetir o mesmo procedimento



Figura 3.32

e inferir que  $(L = 9,65 \pm 0,05)$  cm.

### A incerteza na Física Quântica

A medição da incerteza na Física é utilizada em todas as suas áreas, desde o estudo do movimento de blocos até o estudo do calor e o estudo dos líquidos. Contudo, quando vamos tentar medir o valor, por exemplo, da posição de uma pequena partícula na Física Quântica nos deparamos com um problema claro: ela se comporta também como uma onda. Da teoria ondulatória sabemos que algumas incertezas estão relacionadas de forma que quanto mais informação temos sobre uma grandeza, menos temos sobre a outra. Este fenômeno acontece até mesmo em ondas clássicas. Por exemplo: em eletrônica, a frequência e o intervalo de tempo percorrido por uma onda estão relacionadas desta forma. Isso leva a um grande problema na Física Quântica que foi descrito pelo físico alemão Heisenberg (figura 3.33, premio nobel de 1932), chamado de Princípio da Incerteza de Heisenberg [14].

pt0pt

### O Princípio da Incerteza de Heisenberg

O Princípio da Incerteza de Heisenberg estabelece que nós não podemos medir com precisão a posição e velocidade\* do elétron ao mesmo

<sup>\*</sup> Mais precisamente, o momento linear, que é *normalmente* igual ao produto massa × velocidade. O momento linear pode ser dado por outras equações quando levamos em conta a Teoria da Relatividade de Einstein.



Figura 3.33: Werner Heisenberg, físico.

tempo. Quanto maior a precisão<sup>\*</sup> na medição da velocidade, menor a precisão na medição da posição da partícula e vice-versa [14].

Além disso, o Princípio da Incerteza estabelece o análogo para a medição da energia e do tempo do objeto: não podemos ter precisão quando medimos simultaneamente a energia da partícula e o instante de tempo em que a partícula tem essa energia. Quanto maior a precisão na medição da energia, menor a precisão na medição do tempo e vice-versa [14].

Se denotarmos de  $\Delta E$  a precisão na Energia,  $\Delta t$  a precisão no tempo,  $\Delta x$ a precisão na posição e de  $\Delta p_x$  a precisão no momento linear (quando não considerarmos a Teoria da Relatividade de Einstein<sup>†</sup>, o momento é dado pelo produto massa × velocidade), podemos escrever o Princípio da Incerteza de maneira matemática, como Heisenberg fez:

$$\begin{array}{l} \Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{1}{2}\hbar \\ \Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}\hbar, \end{array}$$

Os dados acima são o equivalente à definição que fizemos agora pouco em língua portuguesa. Não se preocupe com o  $\frac{1}{2}\hbar$ , isso é apenas o número 3,291 · 10<sup>-16</sup> em unidades de elétron-volts segundo – uma unidade utilizada na Física Quântica – e quer dizer que quando aumentamos a precisão na posição, diminuímos a precisão no momento linear e assim por diante. O número  $\hbar$  é apenas a Constante de Planck Reduzida, um número conhecido<sup>‡</sup>.

# A função de onda de Schrödinger

Para voltarmos a discutir os modelos atômicos, precisamos conhecer um último elemento da Física Quântica: a Função de Onda, proposta pelo físico austríaco Erwin Schrödinger (figura 3.34, schrödinger dividiu o prêmio nobel com o cientista inglês Paul Dirac – fig. 3.35 – em 1933)

pt0pt

pt0pt

Como falamos na seção 3.3, as partículas podem ser interpretadas como uma onda. Assim, Schrödinger escreve uma equação que dita essa relação, que é denominada Equação de Onda de Schrödinger.

Essa equação é extremamente complexa e necessita de conhecimentos avançados em Cálculo Diferencial para ser utilizada. Por questão de curiosidade a equação é a seguinte:

$$E\psi=\frac{-\hbar^2}{2\mu}\nabla^2\psi+U\psi,$$



Figura 3.34: Erwin Schrödinger, físico



Figura 3.35: Paul Dirac, físico

<sup>\*</sup> Isto é, quanto menor a incerteza.

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup> Não considerar a Teoria da Relatividade é totalmente normal e aceitável para partículas que tem uma velocidade suficientemente menor que a velocidade da luz.

<sup>&</sup>lt;sup>‡</sup> Seu valor é dado por  $\frac{h}{2\pi}$ , em que *h* é a Constante de Planck. *h* = 4, 136 · 10<sup>-15</sup> elétronvolts segundos,  $\hbar$  = 6, 582 · 10<sup>-16</sup> elétron-volts segundos.

em que *E* é energia da partícula,  $\hbar$  é a constante de Planck reduzida,  $\mu$  é a massa reduzida (relacionada à massa da partícula),  $\nabla$  é o operador de Laplace,  $\psi$  é a função de onda e *U* é a energia potencial sobre a partícula. Não nos aprofundaremos na explicação sobre cada elemento dessa equação, pois, para entendê-los, são necessários conhecimentos de Física universitária.

# Função de onda do Átomo de Hidrogênio

A partir de agora, focaremos nossa discussão no Átomo de Hidrogênio para podermos, depois, conversarmos sobre átomos maiores.

Quando aplicamos a equação de Schrödinger para o Átomo de Hidrogênio, podemos dividi-la em duas partes: uma parte **radial** – que é relacionada com a distância do elétron até o núcleo do átomo – e uma parte **angular** – que é relacionada com os ângulos. Falamos *os* ângulos, pois a equação de Schrödinger é trabalhada em 3 dimensões, então temos um ângulo em relação ao plano xy e outro em relação ao eixo *z*, como na imagem abaixo [18].



**Figura 3.36:** Essa imagem tem direitos autorais e deve ser alterada

Além disso, no Átomo de Hidrogênio, a solução da equação de Schrödinger para a parte radial é a seguinte equação exponencial:

$$\psi(r) = \frac{1}{a^{3/2}\sqrt{\pi}}e^{-r/a},$$

em que *r* é a distância que o elétron está do núcleo, *e* é um número dado por *e* = 2,71828· chamado de número de Euler e *a* é um número dado por *a* = 5,291772 · 10<sup>-11</sup> metros, chamado de Raio de Bohr [12].

A equação de Schrödinger – da forma que foi definida inicialmente – tinha mais algumas simplificações possíveis, que, entretanto, não faziam sentido físico. Isso foi debatido por um tempo até que se chegou a uma condição matemática que passou a ser imposta à equação de Schrödinger para retirar essas simplificações indesejáveis. Essa condição ficou conhecida por Condição de Contorno<sup>\*</sup>. Essa condição diz que, quando o valor da distância, r, do elétron ao centro começa a ficar muito grande, o valor de  $\psi$  começa a ficar muito pequeno até chegar em zero. Em um sentido físico, essa condição de contorno é totalmente plausível, pois quanto mais afastamos o elétron do núcleo, menor será a interação entre eles [14].

# Verdadeira solução para o problema da luz emitida pelo Hidrogênio

Como vimos na seção 10 sobre a entrada e saída de energia no Modelo Atômico de Bohr, Bohr descobriu a relação

$$\frac{1}{\lambda} = R_y Z^2 \left( \frac{1}{(n_f)^2} - \frac{1}{(n_i)^2} \right),$$
(3.4)

que relacionava o comprimento de onda emitido,  $\lambda$ , com as camadas inicial,  $n_i$ , e final,  $n_f$ , o número de prótons, Z, e uma constante,  $R_y$ , chamada de constante de Rydberg [18].

Além disso, vimos que Bohr conseguiu achar a relação teórica correta de que

$$E = -R_y \frac{Z^2}{n^2}$$

em que *E* é a energia, *n* é o número da camada (número quântico principal), *Z* é a quantidade de prótons e  $R_y$  é a constante de Rydberg.

Schrödinger conseguiu, a partir de algumas manipulações na função de onda, obter a mesma relação  $E = -R_y \frac{Z^2}{n^2}$  em sua teoria. Essa relação é exatamente a mesma que a encontrada por Bohr, contudo a forma que Bohr utilizou para encontrar essa equação estava errada. Foi apenas um golpe de sorte, diferente de Schrödinger, que conseguiu encontrá-la de maneira correta a partir das novas descobertas físicas que ocorreram após o modelo de Bohr [12].

A forma como ocorre a entrada e saída de energia é a mesma proposta por Bohr: a energia fornecida para o elétron deve ser exatamente igual à diferença de energia entre as camadas, como já foi explicado na seção 10. Contudo, com o estudo de Schrödinger sobre a entrada e saída de energia do átomo, foram descobertas mais relações atômicas interessantes. Uma delas foi uma explicação moderna para a Ionização. Se a energia dada ao átomo for tão grande que passa das possíveis camadas descrita pelos possíveis números quânticos principais (visto na seção 7 sobre Níveis de Energia), o elétron sairá do átomo e esse átomo (agora que perdeu um elétron) passará a ser chamado de Íon.

<sup>\*</sup> Esse nome (Condição de Contorno) vem do Cálculo Diferencial. É muito comum atribuir condições de contorno para esses tipos de equações.

Se o elétron não tiver uma velocidade muito alta<sup>\*</sup>, ele irá conservar sua energia do movimento (chamada de energia cinética, *K*) que será dada pela relação abaixo. Esse processo como um todo é chamado de Ionização [12].

$$K = \frac{1}{2}mv^2,$$

em que *m* é a massa do elétron e *v* é sua velocidade no instante do escape.

# A Probabilidade

Como vimos na seção 13 sobre o princípio da incerteza de Heisenberg, nós não conseguimos calcular com precisão a posição e a velocidade de um elétron ao mesmo tempo e, portanto, não faz mais sentido utilizarmos a ideia de Bohr de um elétron girando ao redor do núcleo parecido com um modelo planetário, pois essa visão, mesmo muito compartilhada, está totalmente errada. A partir de agora, a pergunta correta a se fazer não é mais quando o elétron estará em uma certa posição, mas qual a probabilidade de um elétron ser detectado em um pequeno volume naquela posição [12].

Portanto, precisamos agora de uma teoria de probabilidade para conseguirmos fazer cálculos na Física Quântica.

# A Densidade de Probabilidade

Para podermos utilizar uma teoria de probabilidade moderna, vamos precisar, primeiro, entender o que é uma Função de Densidade de Probabilidade.

Infelizmente, para entendermos essa função de forma plena, precisaríamos de um curso de Estatística e Probabilidade! Mas, para o nosso propósito aqui, vamos simplificar e olhar os elementos principais por trás dessa função.

Um Função de Densidade de Probabilidade é simplesmente uma função como a do gráfico abaixo em que, quando calculamos a área abaixo de um pequeno intervalo do gráfico, essa área será o valor da probabilidade, aplicando para o nosso caso, do elétron ser encontrado naquele intervalo.

<sup>\*</sup> Isto é, não tiver uma velocidade próxima da velocidade da luz. Essa condição é importante para evitar a necessidade do uso da Teoria da Relatividade de Einstein.





Infelizmente, a função de densidade de probabilidade não dá a probabilidade de um elétron estar em um ponto do espaço. Ela dá apenas a probabilidade do elétron estar em um intervalo do espaço, como em um volume do espaço. Para "burlar" essa dificuldade, podemos pegar um pequeno volume do espaço que, por motivos de cálculo diferencial, normalmente chamamos de dx.



**Figura 3.38:** Pequeno volume *dx* na Função de densidade de probabilidade.

Vamos ver agora como aplicar esses conhecimentos de probabilidade avançada no átomo a partir de duas visões: uma volumétrica e outra radial...

# Visão Volumétrica

Felizmente, a Função de Onda de Schrödinger,  $\psi(r)$  já é uma função probabilista. Para podermos transformá-la em uma Função de Densidade de Probabilidade, basta elevarmos ao quadrado e obter a função  $\psi^2$ , que é uma Função de Densidade de Probabilidade.

Apenas com isso, já podemos obter o desenho do Átomo de Hidrogênio (figura 3.39), em que a densidade dos pontos (quantidade de pontos por área) representa uma maior probabilidade de encontrarmos o elétron naquele local. Falaremos mais desses desenhos daqui a pouco no tópico 20 sobre Números Quânticos e Orbitais.



Figura 3.39: Essa imagem é do Halliday, temos que alterá-la

Para conseguirmos ampliar matematicamente nossa análise, é interessante transformarmos nossa visão volumétrica em uma visão radial, pois a Função de Onda de Schrödinger está em função de r (a distância do elétron até o núcleo).

### Visão radial

Para fazermos essa transformação, vamos criar um pequeno pedaço de distância dr e uma função de densidade de probabilidade P(r) dada por

$$P(r) = \frac{4}{a^3} r^2 e^{-2r/a},$$

em que a é um número chamado de Raio de Bohr e r é a distância do elétron ao núcleo do átomo.

Essa nossa nova função é extremamente poderosa, pois agora conseguimos calcular a probabilidade do elétron estar a uma certa distância do átomo apenas calculando a área abaixo da função P(r) no pequeno intervalo dr, como na imagem abaixo:



Figura 3.40: Imagem do Halliday, temos que alterá-la.

# Os Números Quânticos, as Subcamadas e os Orbitais

Como vimos na seção 7, o elétron tem um Número Quântico Principal (*n*) que diz em qual camada o elétron tem maior probabilidade de estar. Com a equação de Schrödinger, foram descobertos mais 2 números quânticos, chamados de Número Quântico Orbital (*l*) e Número Quântico Magnético Orbital (*m*<sub>l</sub>). Com a evolução dos estudos e a aplicação da equação de Schrödinger, foi descoberto mais um número quântico chamado de Spin, sobre o qual trataremos daqui a pouco, na seção 21 sobre como construir um átomo grande, pois ele será importante para isso. Nesta seção, iremos tratar apenas dos números quânticos *n*, *l* e *m*<sub>l</sub> (Principal, Orbital e Magnético), pois eles serão necessários para entendermos o que são orbitais atômicos.

Como vimos na seção 18 sobre a função de onda no átomo de hidrogênio, a equação de Schrödinger é dividida em uma parte radial – relacionada à distância do elétron ao núcleo – e uma parte angular – relacionada aos ângulos que o elétron faz em relação ao núcleo. Veremos a seguir que os números quânticos n,  $l e m_l$  serão relacionados a essas partes da equação de onda.

### Número quântico principal

O Número Quântico Principal (*n*) dá nome a cada camada de um átomo. Como vimos na seção 7 sobre níveis de energia, o átomo pode ser dividido em algumas camadas<sup>\*</sup>. Com estudos mais modernos, foi descoberto que cada camada consegue segurar um número específico de elétrons, como descrito na tabela abaixo. Os químicos costumam chamar as camadas a partir de uma série de letras, a partir da letra K; já os físicos costumam chamar as camadas pelos números quânticos, *n*, começando do número 1.

<sup>\*</sup> Também chamada de órbitas ou níveis de energia.

Tabela 3.1: Número máximo de elétrons

que cabem em cada camada.

Camada	Letra	Número máximo de elétrons
<i>n</i> = 1	K	2
<i>n</i> = 2	L	8
<i>n</i> = 3	М	18
<i>n</i> = 4	N	32

Por se tratar da distância que o elétron está do núcleo, o número quântico principal é relacionado com a parte radial da equação de onda de Schrödinger.

### Número quântico orbital e magnético

O número quântico orbital, ou simplesmente número orbital, é denotado pela letra l (l = 0, l = 1, l = 2, ...) ou pelas letras s, p, d, f (apenas por motivos históricos) e, posteriormente pela ordem alfabética (g, h, i...).

Denotação por Número	l = 0	l = 1	<i>l</i> = 2	l = 3	<i>l</i> = 4	l = 5	
Denotação por letra	s	р	d	f	g	h	

**Tabela 3.2:** Formas de denotar o número quântico orbital, *l*.

Para facilitar nossa explicação, vamos adicionar um novo jargão ao nosso vocabulário: a **subcamada**! Quando falarmos a palavra "subcamada", estaremos nos referindo ao mesmo tempo ao número quântico principal (n, a camada do átomo) e ao número quântico orbital. Por exemplo, temos a subcamada 1s, isto é a subcamada de número quântico principal n = 1 e número quântico orbital s. Outros exemplos de subcamadas são a subcamada 2s (número principal n = 2 e número orbital s), a subcamada 2p (número principal n = 2 e número orbital p) e assim por diante [19].

É importante enfatizar uma relação: existem camadas em que cabem várias subcamadas e outras nas quais cabem bem poucas. Para sabermos quantos números quânticos orbitais teremos disponíveis para termos uma subcamada, falamos que os valores de *l* vão de zero até n - 1. Por exemplo, se temos n = 3, *l* poderá ser 0, 1 ou 2 e, portanto, temos em n = 3 as subcamadas 3*s*, 3*p* e 3*d*; se temos n = 1, então *l* poderá ser apenas zero e só teremos a subcamada 1*s*.

O valor do número quântico orbital indicará a forma como se distribui a probabilidade de se encontrar um elétron em certa subcamada.

Vamos ver o exemplo da subcamada 1s. Como temos o número quântico orbital com valor *s*, a probabilidade de se encontrar um elétron será distribuída de maneira esférica como no desenho abaixo:



**Figura 3.41:** Probabilidade de se encontrar um elétron na subcamada 1*s*. Imagem com direitos autorais.

O núcleo do átomo é representado pelo centro do desenho. As bolinhas vermelhas representam a região onde há maior probabilidade de se encontrar um elétron. Neste caso da subcamada 1*s*, temos que a maior probabilidade de se encontrar um elétron é nessa região esférica e que a probabilidade vai diminuindo à medida que nos afastamos do núcleo.

Vejamos mais um exemplo: a subcamada 2p. Os elétrons na subcamada 2p de um átomo terão maior probabilidade de serem encontrados em uma dessas distribuições peculiares abaixo:



O que definirá como ocorrerá essa distribuição será o nosso próximo número quântico, o **Número Quântico Orbital Magnético**.

Se juntamos os três desenhos da figura 3.42, obtemos o desenho da subcamada 2*p*:



**Figura 3.43:** Desenho completo da subcamada 2*p*. Imagem com direitos autorais.

O **número quântico orbital magnético**, ou simplesmente número magnético, é denotado pela letra  $m_l$ . Semelhante ao que ocorre com

**Figura 3.42:** Subcamada 2p do átomo dividida em três desenhos. Imagem com direitos autorais.

o número quântico orbital, nem toda subcamada admitirá muitos valores para o número magnético. Para sabermos quais valores o número magnético poderá assumir, falamos que  $m_l$  vai de -l até l. Por exemplo, se l = 0, nós temos apenas  $m_l = 0$  disponível e apenas um possível desenho, como mostrado na imagem 3.41; se l = 1, então nós temos  $m_l = -1$ , 0 e 1 disponível, como é representado pelos três desenhos na figura 3.42.

Um novo jargão que devemos introduzir agora é o **orbital**. Quando falarmos a palavra "orbital", estaremos nos referindo a três informações: ao número quântico principal (n), ao número quântico orbital (l) e ao número quântico orbital magnético ( $m_l$ ). Na figura 3.42, por exemplo, cada desenho é um orbital, pois tem seus próprios trios de números quânticos. Agora, cuidado: às vezes alguns autores utilizam o jargão "orbital" para se referir também ao Número Quântico Orbital, l, e escrevem "o orbital s", "o orbital p" e assim por diante, então tenham cuidado quando lerem esse nome.

Em resumo, temos os seguintes termos técnicos:

Nome	Números Quânticos	Exemplo	Desenho
Camada/Nível/Orbita	n	<i>n</i> = 1	
Subcamada/Subnível	n, l	2 <i>p</i>	
Orbital	n, l, m <sub>l</sub>	$2p \ (m_l = 0)$	

Observe que, em alguns casos, mais de um termo pode ser utilizado. Na camada n = 1, temos apenas uma subcamada (1s) e apenas 1 número magnético ( $m_l = 0$ ), portanto podemos usar os três termos para nos referirmos ao desenho da tabela.

Vamos, então, visualizar as subcamadas de número orbital *d* e *f*.

Como os desenhos começam a ficar muito complexos, não vale a pena juntarmos os desenhos dos orbitais em um desenho da subcamada como fizemos em s e p.

Para o número orbital d, temos os seguintes desenhos para cada número magnético,  $m_l$ :



**Figura 3.44:** Subcamada *d* do átomo dividida em 5 desenhos. Imagem com direitos autorais.

Tabela 3.3: Resumo dos jargões da física atômica.

Para o número orbital f, temos os seguintes desenhos para cada número magnético,  $m_l$ :



**Figura 3.45:** Subcamada *d* do átomo dividida em 7 desenhos. Imagem com direitos autorais.

Por se tratar da distribuição espacial do átomo, os números quânticos  $l \in m_l$  são relacionados com a parte angular da equação de onda de Schrödinger.

## Como construir um átomo grande?

Nesta seção, vamos tentar entender como podemos construir um átomo! Quais serão as regras sobre onde podemos ou não colocar elétrons em cada camada/subcamada?

### As camadas e as subcamadas

Os átomos são formados por um núcleo e uma nuvem de elétrons. Essa nuvem de elétron é dividida em diversas camadas (semelhante a como Bohr trouxe em seu modelo) que são numeradas pelos Números Quânticos Principais, n, começando de n = 1, ou por uma série de letras, começando pelo K. Além disso, cada camada pode também ser dividida em uma série de subcamadas que serão dadas pelo Número Quântico Principal e pelo Número Quântico Orbital, l. Contudo, para entendermos quantas subcamadas existem em cada camada, precisamos conhecer primeiro um novo número quântico, o Spin Eletrônico.

### O Spin Eletrônico

Como será melhor explicado no capítulo 5 de partículas elementares, os elétrons<sup>\*</sup> têm um número quântico chamado de spin e denotado por  $m_s$ . O spin é mais uma das propriedades do elétron: ele tem uma massa (~ 9,  $12 \times 10^{-31}$  Kg), uma carga (carga negativa) e, também, um spin. O interessante é que existem dois valores possíveis para o spin do elétron: o elétron pode ter  $m_s = 1/2$  (chamado de spin-up) ou  $m_s = -1/2$  (chamado de spin-down), o que trará diversas implicações para o átomo.

Por uma questão de curiosidade (pois não entraremos em detalhes neste capítulo), o nome spin vem do inglês, rotação, pois pensava-se que o elétron estivesse girando, uma vez que o spin ser  $m_s = 1/2$  ou ser  $m_s = -1/2$  implica em diferentes campos magnéticos gerados por

<sup>\*</sup> Não só os elétrons, mas também outras partículas sobre as quais não entraremos em detalhes neste capítulo.

esse elétron. Contudo, o elétron na verdade não está girando e isso será discutido melhor no capítulo 5.

A grande importância de sabermos o valor do spin do elétron será por conta do Princípio de Exclusão de Pauli, que impõe alguns limites sobre onde podemos colocar elétrons em um átomo.

### Princípio de Exclusão de Pauli

O Princípio de Exclusão de Pauli determina que não podem existir dois elétrons<sup>\*</sup> no átomo com mesmos números quânticos (n, l,  $m_l$ ,  $m_s$ ). Esse será um dos mais importantes princípios para entendermos a quantidade de elétrons que cabem em cada camada do átomo [14].

Vamos tentar ver um exemplo:

Na primeira camada do átomo n = 1, só podemos ter l = 0 (*s*) e  $m_l = 0$ , por conta das regras que discutimos na seção 20 sobre os números quânticos e os orbitais. Contudo, o elétron pode ter spin do tipo  $m_s = +1/2$  ou do tipo  $m_s = -1/2$ . Portanto, existem dois tipos de elétrons possíveis na camada n = 1:

Podemos ter um elétron do tipo  $\begin{cases} n = 1 \\ l = 0 (s) \\ m_l = 0 \\ m_s = 1/2 \end{cases}$  e podemos ter um elétron

do tipo  $\begin{cases} n = 1 \\ l = 0 (s) \\ m_l = 0 \\ m_s = -1/2 \end{cases}$ 

Portanto, só cabem dois elétrons na camada n = 1.

Utilizando essa ideia, os cientistas criaram uma notação padrão para indicar onde o elétron se encontra com maior probabilidade no átomo.

Para indicar que há dois elétrons na camada n = 1, subcamada 1s, nós escrevemos  $1s^2$ . Genericamente, temos

(*n*) (Letra do orbital) <sup>(Quantidade de Elétrons)</sup>

#### Quantos Elétrons cabem em cada orbital?

Já vimos que cabem apenas 2 elétrons na subcamada de número quântico orbital *s*, pois só há  $m_l = 0$  disponível e, portanto, cabem um elétron com spin-up ( $\uparrow$ ) e um elétron com spin-down ( $\downarrow$ ):



Tabela 3.4: Número Quântico Orbital s

<sup>\*</sup> Na verdade quaisquer dois férmions, mas explicaremos o que são férmions no capítulo 5 de Partículas Elementares.

Na subcamada de número quântico orbital p, temos disponíveis os números magnéticos  $m_l = -1, 0$  e 1. Portanto, caberão os seguintes elétrons:

Tabela 3.5: Número Quântico Orbital p

p	$m_l = -1$	p	$m_l = 0$	р	$m_l = 1$	
$\uparrow \downarrow$			$\uparrow\downarrow$	$\uparrow \downarrow$		

Desta forma, cabem 6 elétrons na subcamada de número quântico orbital p

Na subcamada de número quântico orbital *d*, temos disponíveis os números magnéticos  $m_l = -2, -1, 0, 1, 2$ . Portanto, caberão os seguintes elétrons:

 $m_{l} = 0$ 

↑↓

d

 $m_{l} = 1$ 

1 ↓

d

 $m_{l} = 1$ 

î↓

d

Desta forma, cabem 10 elétrons na subcamada de número quântico orbital *s* 

Fazendo o raciocínio análogo para o número quântico orbital f, notamos que cabem até 14 elétrons em f. Portanto, podemos resumir tudo na seguinte tabela:

Número Quântico Orbital	Número máximo de elétrons		
S	2		
p	6		
d	10		
f	14		

Em qual orbital entrar?

d

 $m_l = -2$ 

↑↓

d

 $m_l = -1$ 

↑↓

Agora que nós já sabemos quantos elétrons cabem em cada orbital, precisamos descobrir em qual orbital o elétron ficará mais estável. Para essa tarefa, existe uma série de regras que verificam onde haverá maior estabilidade para o elétron. Como são muitas regras e elas entram mais no escopo da Química Quântica que na Física Quântica, vamos apenas explicar a principal regra prática e citar algumas das suas exceções.

A principal regra será seguir a ordem das flechas azuis da imagem abaixo, colocando o máximo de elétrons possíveis em cada orbital.

**Tabela 3.7:** Quantidade máxima de elétrons que cabem por número quântico orbital



Figura 3.46: Essa imagem tem direitos autorais e será substituída

Podemos ver, por exemplo, a distribuição de um átomo de Germânio (Ge) com 32 elétrons.

Seguindo o diagrama, podemos começar pelo orbital 1*s*, onde cabem 2 elétrons. Sobram ainda 30 elétrons para colocarmos... O próximo na ordem é o 2*s*, onde cabem 2 elétrons. Depois, o 2*p*, onde cabem 6 elétrons e assim por diante, até distribuirmos os 32 elétrons do átomo de Germânio (Ge) da seguinte forma:

Ge: 
$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^2$$

Vamos tentar agora com o átomo de ferro (Fe) com 26 elétrons... Se fizermos o raciocínio análogo, obtemos

Fe: 
$$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^6$$

Essa regra serve para quase todos os átomos. Quatro átomos famosos que não seguem essa regra são os átomos de Cobre (Cu), Crômio (Cr), Prata (Ag) e Ouro (Au).

# Como desenhar um átomo?

O átomo é um núcleo positivo rodeado por uma nuvem eletrônica negativa. Como já discutimos, não faz sentido desenharmos os elétrons da nuvem eletrônica como planetas ao redor do sol, pois não sabemos onde o elétron está localizado a cada instante. Portanto, nosso desenho do átomo deve mostrar onde há maior probabilidade de encontrarmos os elétrons do átomo, mostrando cada camada e subcamada, isto é, sua configuração eletrônica.

Vamos desenhar um átomo de **Neon** (Ne). Sua configuração eletrônica é dada por

Ne: 
$$1s^2 2s^2 2p^6$$
.

Vejamos quais informações conseguimos tirar dessa configuração:

- ▶ Temos duas camadas: n = 1 e n = 2;
- ► A camada n = 1 é "dividida" apenas na subcamada 1s e tem dois elétrons;
- ▶ A camada *n* = 2 é dividida em duas subcamadas: 2*s* e 2*p*;
- ► A subcamada 2*s* tem dois elétrons e a subcamada 2*p* tem seis elétrons.

Para desenharmos um átomo, temos que desenhar todas as suas subcamadas. Portanto, faremos três desenhos:

- 1. Subcamada 1s;
- 2. Subcamada 2s;
- 3. Subcamada 2*p*.

e depois juntaremos todos em uma figura só.

Como se trata do número quântico orbital *s*, a subcamada 1*s* será desenhada da seguinte forma:



**Figura 3.47:** Probabilidade de se encontrar um elétron na subcamada 1*s*. Imagem com direitos autorais.

A subcamada 2*s* também tem o número quântico orbital *s* e, portanto, terá um desenho semelhante. Contudo, como a subcamada 2*s* pertence à camada n = 2, ela terá um raio maior que a subcamada 1*s*:



**Figura 3.48:** Probabilidade de se encontrar um elétron na subcamada 2*s* em comparação com a subcamada 1*s*. Imagem com direitos autorais.

A subcamada 2p terá um desenho como o abaixo, pois tem o número quântico orbital p e tem 6 elétrons.





Assim, conseguimos desenhar as três subcamadas do átomo de Neon. Por fim, podemos juntar as três figuras para fazermos um desenho do átomo de Neon como abaixo. Como a visão utilizando pontos pode ficar confusa, foi feito um outro desenho à direita simplificando a visualização.



**Figura 3.50:** O desenho do átomo de Neon. Imagem com direitos autorais.

# Conclusão

Chegamos aqui conseguindo ver os principais pontos do estudo dos átomos. É importante ressaltar que esse estudo continua a evoluir até

hoje, com pesquisadores buscando resolver problemas cada vez mais complexos, entendendo melhor como funciona o universo atômico.

Terminamos esse capítulo com uma frase do físico Richard Feynman sobre o estudo dos átomos e com uma foto da Quinta Conferência de Solvay, uma conferência sobre elétrons e fótons que reuniu grandes mentes da Mecânica Quântica como Schrödinger, Pauli, Heisenberg, Dirac, Compton, de Broglie, Max Born, Bohr, Planck, Marie Curie, Lorentz e Einstein.

"Se, em algum cataclisma, todo o conhecimento científico for destruído e só uma frase puder ser passada para a próxima geração, qual seria a afirmação que conteria maior quantidade de informação na menor quantidade de palavras? Eu acredito que seria a hipótese atômica de que todas as coisas são feitas de átomos..." - Richard Feynman (1918-1988)



Figura 3.51: Quinta conferência de Solvay sobre Elétrons e Fótons. Alguns dos participantes dessa conferência (e também presentes na foto) são Schrödinger, Pauli, Heisenberg, Dirac, Compton, de Broglie, Max Born, Bohr, Planck, Marie Curie, Lorentz e Einstein [21].

# Modelo Padrão de Partículas Elementares: a melhor das teorias científicas

# 4

A Física sempre teve como um dos principais objetivos tentar explicar o mundo à sua volta, desde as gigantes galáxias até as menores partículas existentes. E, com o Modelo Padrão de Partículas Elementares, isso foi possível. Através dele, fomos capazes de entender desde as partículas fundamentais do universo até o porquê das estrelas não colapsarem!



Figura 4.1: Via Láctea

Mas o que é o Modelo Padrão das Partículas Elementares e como ele consegue explicar tanto do universo? Bom, para chegar à resposta, vamos entender primeiro a ideia de "Modelo".

Quase todas as áreas de estudo que a humanidade desenvolve seguem estruturas bases ou modelos que conduzem a construção do conhecimento em questão, como foi discutido no Capítulo 1. O que eu quero dizer com isso?

Imagine que você quer escrever um poema. Olhando os estilos que conhece, você decide escrever um soneto, que é um estilo de escrita criado no século XIII e que segue algumas regras de estrutura de texto. Então, para além do conteúdo que você escrever em seu soneto, você tem que se preocupar também com a estrutura básica do texto, como, por exemplo, as estrofes. O soneto, entre várias outras características, possui quatro estrofes, sendo que as duas primeiras são constituídas por quatro versos cada uma, os quartetos, e as duas últimas, de três versos cada uma - os tercetos. Mas se você não for escrever um soneto e sim um poema épico, será trocada a estrutura base do texto. Você abandona o modelo de soneto e passa a usar o modelo de um poema épico, e assim por diante. Essa é a ideia por trás de um modelo: ele é uma base bem estruturada que vai ser o ponto de partida de qualquer estudo em determinada área.

Para áreas de estudo diferentes, como o eletromagnetismo, a mecânica clássica ou a relatividade de Einstein, esses modelos base se diferenciam entre si. Se eu quero estudar o movimento dos corpos celestes, vou ter que usar o modelo da Gravitação de Newton ou a Relatividade Geral de Einstein, e se eu quero estudar Partículas Elementares, recorro ao modelo chamado de Modelo Padrão de Partículas Elementares. É

claro que dentro da Física existem vários modelos diferentes, e o motivo disso acontecer é que até hoje nunca chegamos em uma "Teoria de Tudo". Essa teoria seria um modelo físico que conseguiria relacionar todas as áreas da física para escalas altas de energia. O que eu quero dizer com escalas de energia? Estou basicamente falando sobre quantidades de energia relacionadas a fenômenos diferentes. Por exemplo, a energia liberada na colisão de buracos negros é infinitamente maior do que a energia liberada pelo motor do seu carro quando o liga de manhã. Para as baixas energias - ou seja, o nosso dia a dia - as nossas teorias são válidas e funcionam muito bem. Para as altas energias<sup>\*</sup> as teorias atuais se mostram de difícil testagem. Em especial, não temos uma teoria consistente da gravitação para pequenas escalas, como o centro de buracos negros e o início do universo, e a incorporação da gravidade dentro do modelo de partículas ainda é uma questão em aberto.

De volta ao Modelo Padrão, agora vamos entender quais são as características desse modelo que o fazem explicar tão bem as partículas elementares e suas interações. O objetivo do modelo é explicar as coisas mais primordiais do nosso universo, as Partículas Elementares. Essas partículas, as menores coisas que conhecemos, compõem tudo o que existe<sup>†</sup> no universo e não são compostas de nada além delas mesmas. Então, o primeiro passo que esse modelo toma é de classificar as partículas elementares em diferentes grupos, cada grupo tendo suas características e todas as partículas dentro de um mesmo grupo vão compartilhar particularidades[22, 23].

No nosso modelo em questão existem várias divisões, mas os dois grupos mais importantes são os Férmions e os Bósons como na figura 4.2. Entre esses grupos, as partículas se dividem assim:

O grupo dos Férmions, compostos pojr 36 quarks e 12 léptons[24], divididos assim:

- Quarks - Quark Up, Down, Top, Charm, Strange e Bottom e suas anti partículas (Antiquark Up, antiquark Down, antiquark Top, antiquark Charm, antiquark Strange e antiquark Bottom). Totalizando 12 quarks. Entretanto, os Quarks carregam uma característica chamada de "Cor". Existem 3 Cores, a vermelha, azul e verde, logo, como cada Quark carrega uma cor, temos um total de 36 Quarks. E para deixar claro, a "Cor"não representa uma cor real. O Quark não é vermelho ou azul, a "Cor"representa as cargas referentes à interação Forte.

 - Léptons - Elétron, Múon, Tau, Neutrino do Elétron, Neutrino do Múon, Neutrino do Tau e suas antipartículas (Pósitron, Antimúon, Antitau, antineutrino do Elétron, antineutrino do Múon e antineutrino do Tau). Total: 12 Léptons.

E há o grupo dos Bósons, compostos por bósons são separados em:

<sup>\*</sup> Atualmente, pela dificuldade de testagens experimentais, não sabemos qual dos modelos disponíveis melhor explica a física de altíssimas energias, isto é, energias acima dos aceleradores de partículas que conseguimos construir

<sup>&</sup>lt;sup>†</sup> Ainda é uma incerteza se e quais são as partículas elementares que compõem a Matéria Escura e a Energia Escura. Então quando dizemos que elas compõem tudo que existe, estamos tratando apenas da matéria comum, que é o que você vai ver no seu dia a dia.



# Modelo Padrão das Partículas Elementares

- Bósons de Gauge (ou Bósons vetoriais): Fóton, Glúons, Bóson Z, Bóson W+ e Bóson W-. Esses Bósons são a base para o capítulo Interações Fundamentais, pois são eles os mediadores de 3 das 4 interações fundamentais. Mas não vamos nos adiantar muito.

- Bósons Escalares: Bóson de Higgs. Como a última previsão do Modelo Padrão experimentalmente comprovada, o Bóson de Higgs veio como uma validação do Modelo Padrão explicando a origem das massas dos Quarks e dos Léptons.

O grupo dos Bósons e dos Férmions são divididos em partículas e antipartículas. Mas o que são essas antipartículas? As antipartículas são similares às partículas elementares, entretanto, todas as suas cargas são opostas. A carga é uma característica da partícula que será melhor explicada no capítulo de Interações Fundamentais, mas faremos um breve resumo aqui. A "Carga"é o nome que demos para as características da partícula que se referem às interações fundamentais. Por exemplo, o pósitron é similar ao elétron em muitas características, com exceção de suas cargas, que são opostas. Por exemplo, o elétron tem carga elétrica negativa e o pósitron, positiva, ou seja, sua carga referente a interação eletromagnética é invertida. As antipartículas cumprem o papel de partículas elementares no que chamamos de Antimatéria\*.

Voltando aos Férmions e Bósons... Esses grupos são os dois principais pilares do Modelo Padrão de Partículas Elementares. Enquanto os



<sup>\*</sup> Antimatéria seria a "matéria"que é construída a partir de antipartículas. Ela seria "idêntica"à matéria que conhecemos, mas com as cargas de suas partículas todas invertidas. A antimatéria está envolvida em uma das maiores incógnitas da Física, a assimetria bariônica.

Férmions são as partículas que compõem todo o universo, desde os pequenos átomos até as gigantes galáxias, os Bósons são as partículas responsáveis pelo o que chamamos de Interações Fundamentais, que é o outro pilar do Modelo Padrão[25].

Funciona assim: tudo ao seu redor é composto de algo primordial. A mesa da sua casa vai ser composta por moléculas, que são compostas por átomos, que, por sua vez, são constituídos por Quarks Up e Down e Elétrons. A mesma coisa o ar, que é composto de moléculas de nitrogênio, oxigênio, dentre outras que são compostas por átomos e formados, primordialmente, por Quarks Up e Down e Elétrons. Podemos fazer essa redução para todos os objetos ao nosso redor e chegaremos na mesma formação elementar: Quarks Up e Down e Elétrons. A ideia aqui é entender que os Férmions "desenham" tudo que existe no universo. Entretanto, esses corpos "desenhados" não existem em um isolamento completo, eles interagem um com o outro, e é aí que entram os Bósons. No Modelo Padrão, todas as interações existentes entre corpos são apenas variações práticas de 4 interações fundamentais: a Eletromagnética, a Força Fraca, a Forte e a Gravitacional\*. Assim, se entende que cada uma dessas interações é o resultado da troca de Bósons específicos entre corpos. Mas explicaremos isso melhor no próximo capítulo.

54

<sup>\*</sup> A interação Gravitacional não é explicada pelo Modelo Padrão. De fato, sua partícula mediadora, o Gráviton, nunca foi experimentalmente encontrada. Para a interação Forte, Fraca e Eletromagnética, todas as partículas mediadoras foram experimentalmente comprovadas.

# Partículas elementares

# 5

# 5.1 O elétron (1897)

O elétron talvez seja uma das partículas mais conhecidas e uma das que a gente mais ouve falar por aí. O termo "elétron" nos remete muito à ideia de eletricidade, e foi estudando fenômenos da eletricidade que os elétrons se revelaram para nós. Eles formam a camada externa dos átomos e respondem por fenômenos físicos tais como a eletricidade, o magnetismo e a criação da luz.

A descoberta do elétron aconteceu em 1897 no Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, pelo físico inglês Joseph John Thomson (1856-1940), que vinha pesquisando o comportamento dos raios catódicos na presença de forças elétricas e magnéticas através de experimentos.

# pt0pt

Tubos de raios catódicos são basicamente tubos de vidro fechados, nos quais a maior parte do ar foi retirado (Figura 5.2). É aplicada uma alta diferença de potencial entre dois eletrodos, que faz com que um feixe de partículas flua do cátodo (o eletrodo carregado negativamente) para o ânodo (o eletrodo carregado positivamente), gerando assim uma descarga elétrica. Os tubos são chamados tubos de raios catódicos porque o feixe de partículas, ou "raio catódico", se origina no cátodo (Figura 5.3).

# pt0pt

Descargas elétricas em tubos de vidro contendo um gás a baixa pressão eram estudadas desde 1709. Nessas descargas, o interior do tubo fica iluminado e a cor da luz depende do gás. Sabe-se, hoje, que as luzes são emitidas na ionização\* das moléculas do gás, quando colidem com elétrons provenientes do cátodo. Se a pressão for baixa o suficiente, ocorrem menos colisões, o que resulta em um feixe bem preciso dos elétrons do cátodo. Na época de Thomson, a natureza da eletricidade não era conhecida e descargas em tubos de vidro eram um instrumento de investigação da natureza da eletricidade; o que distinguiu a pesquisa de Thomson foi que, diferentemente de outros pesquisadores, ele conseguiu obter uma boa pressão e um "bom feixe", o que lhe permitiu observar desvios do feixe por forças elétricas e magnéticas [26].

Bom, já que os raios catódicos consistem de partículas eletricamente carregadas, deve ser possível desviar seu caminho através da força elétrica (no capítulo 6 abordaremos a natureza das forças fundamentais). E foi isso que Thomson fez em seu experimento: garantindo as

\* *Ionização:* processo pelo qual um átomo perde ou ganha elétrons, ficando assim eletricamente carregado.

5.1 O elétron (1897)	55
Experimento das gotas de N	1il-
likan : Determinação da carga	do
elétron (1911)	56
5.2 O Múon	58
O Espaço e o Tempo alterado	s59
A descoberta do Múon e o M	∕ <b>I</b> é-
son Pi	60
5.3 O Fóton	61
5.4 Quarks e glúons	63
Hádrons	64
De volta aos quarks	65
Os Glúons (1973)	65
5.5 Bósons W e Z	66
5.6 Os neutrinos	69
5.7 Bóson de Higgs	71



**Figura 5.1:** Joseph John Thomson (1856-1940). Fonte: Benjamin Crowell, Wikimedia Commons.



**Figura 5.2:** Tubo de Crookes através do qual os raios catódicos foram descobertos. Fonte: D-Kuru, Wikimedia Commons.

condições necessárias, ele conseguiu observar uma deflexão (desvio) dos raios para uma das placas. Como se conhecia a natureza negativa determinada pelo cátodo, o feixe de raios foi defletido na direção da placa positiva (Figura 5.3), o que também confirmava a natureza negativa através do experimento. Thomson mediu o deslocamento produzido para diferentes valores das forças elétricas e magnéticas e calculou a razão carga/massa. Os cálculos podem ser consultados na referência [27].

Thomson repetiu seus experimentos usando diferentes metais como materiais de eletrodo, e descobriu que as propriedades do raio catódico permaneciam constantes independentemente do material catódico de onde se originavam. Então, o experimento de Thomson caminhava para as seguintes conclusões :

#### pt0pt

- O raio catódico é composto por partículas carregadas negativamente.
- A massa de cada partícula era muito, muito menor que a de qualquer átomo conhecido, então átomos não são indivisíveis, pois partículas negativamente eletrizadas podem ser arrancadas deles.
- Essas partículas subatômicas poderiam ser encontradas nos átomos de todos os elementos e possuíam a mesma massa.

Thomson denominava essas partículas de "corpúsculos" e foi com esses corpúsculos que se abriram as portas para a física do século XX. A partícula dos raios catódicos recebeu o nome de elétron, nome que havia sido proposto muito antes por George Stoney, para a unidade de eletricidade ganha ou perdida quando os átomos se tornam eletricamente carregados. Na década após o experimento de Thomson essa partícula fundamental tornou-se aceita e foi chamada de elétron [26].

# Experimento das gotas de Millikan : Determinação da carga do elétron (1911)

Por muito tempo, não se conhecia a carga dessas partículas negativamente carregadas que chamamos de elétron. Foi só com o aparato experimental de Millikan que foi possível determinar essa unidade de carga. Até então, só eram conhecida a razão entre a carga e a massa do elétron.

$$\frac{e}{m} = 0, 8 \cdot 10^{11} \frac{C}{Kg}$$

Assim, se alguém conseguisse determinar a carga do elétron seria possível também determinar a sua massa, ou vice-versa.

Esse cientista engenhoso capaz de determinar com precisão a carga elétrica do elétron foi Robert Andrews Millikan com seu experimento das "gotas de óleo".



Figura 5.3: Esquema de um tubo de raios catódicos.(mauricio desenhar)



# pt0pt

Millikan usou o seguinte aparato experimental, mostrado na figura 5.6: em um recipiente colocou um campo elétrico, gerado a partir de duas placas carregadas com uma diferença de potencial entre elas, sendo uma positiva e outra negativa; uma fonte de raio x, que é uma radiação ionizante, isto é, capaz de "arrancar" elétrons de átomos e moléculas do ar; um microscópico visualizador e um borrifador de óleo, capaz de expelir microgotículas 5.5.

### pt0pt

Através de um orifício, as gotículas de óleo desciam sob a ação da gravidade. Ao entrarem na parte ionizada, elétrons se juntavam às gotículas de óleo que ficavam eletricamente carregadas, com um elétron, com dois, três ou mais. Como as gotas ficam carregadas negativamente, ao entrarem no campo elétrico ficavam sob a ação de três forças : força gravitacional ( $F_g$ ), força elétrica ( $F_c$ ) e uma força de de atrito viscoso ( $F_d$ ), como representado pela figura 5.7.

## pt0pt

Ao ligar a fonte de alta tensão gerando campo elétrico, pode-se observar gotas subindo, caindo ou em repouso. Para uma gotícula subindo sob a ação do campo elétrico, ao atingir velocidade constante, podemos escrever  $F_c = F_g + F_d$ .

Fazendo o uso desses conceitos e resolvendo matematicamente as equações [28], Millikan catalogou a carga de cada gotícula que estudava, e para cada uma, ele encontrava um resultado de carga. Assim, como cada gotícula tinha uma quantidade de elétrons, percebeu que ao pegar o menor resultado e dividir pelos maiores encontrava sempre números inteiros 1,2,3... E com base nesses resultados determinouse a carga elétrica do elétron e consequentemente a sua massa como sendo :

- ►  $\mathbf{e} = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- ▶ massa do elétron, **m**<sub>e</sub>= 9.10938356 · 10<sup>-31</sup> kg

É interessante notar que a carga do elétron é, na verdade, chamada de unidade fundamental de carga. Isto porque todas as partículas observadas têm sempre uma carga que é um múltiplo da carga elementar  $\mathbf{e} = 1,602176634 \cdot 10^{-19}$  C. Posteriormente, descobrimos que algumas partículas, os quarks, podem ter carga fracionária, porém elas nunca são observadas sozinhas na natureza.

**Figura 5.5:** Representação do aparato experimental de Millikan. Fonte: KIWANGA, Christopher Amelye, Wikimedia Commons.



**Figura 5.4**: Robert Andrews Millikan (1858-1953). Fonte: Clark Millikan, Wikimedia Commons.



Figura 5.6: Aparato experimental de Millikan. Fonte: Autor desconhecido, Wikimedia Commons.



**Figura 5.7:** Representação das forças atuando sobre a gotícula de óleo. Fonte: Antoni Salvà, Wikimedia Commons.



**Figura 5.8:** Carl David Anderson (1905-1991).

Assim, como Thomson abriu caminho para física do século XX, Millikan ajudou a consolidar a unidade fundamental de carga através dos invisíveis corpúsculos que conhecemos como elétrons.

Bem como a massa e a carga, uma outra característica fundamental do elétron e de outras partículas é o Spin, também chamado de momento angular intrínseco. A ideia inicial proposta pelos físicos Samuel Goudsmit e George Uhlenbeck era de que o elétron se comportaria a certo nível como uma esfera em rotação e essa rotação seria o spin da partícula.

Contudo, o spin não pode ser definido através dos conceitos de mecânica clássica e, dessa forma, a ideia de uma esfera girando não seria uma definição precisa. Uma definição mais completa passa pela abordagem de momento angular, ou a quantidade de movimento rotacional, sendo essa uma grandeza discreta e quantizável. [29]

O spin dá uma nova característica intrínseca às partículas, que permite agrupar pares com spin em direções diferentes, respeitando o Princípio de Exclusão de Pauli, conforme definido no capítulo 3. As demais partículas elementares também possuem Spin: no caso dos férmions é uma quantidade fracionária e dos bósons, um número inteiro.

# 5.2 O Múon

O Múon é uma partícula elementar, que, assim como os elétrons, o tau e os neutrinos, faz parte da classe de léptons e é representado pela letra grega  $\mu$ . Os Léptons são férmions, conforme foi apresentado no capítulo **??**, que não interagem fortemente. Os léptons com carga, como o Múon, Elétron e Tau, possuem mesmo valor de carga elementar, com diferença apenas em sua massa e seu tempo de vida médio.

O múon foi descoberto simultaneamente por dois grupos diferentes, tendo sua primeira publicação em 1937. Um dos grupos era formado pelo nobel de física Carl D. Anderson e Seth Neddermeyer, enquanto o outro, por E. C. Stevenson e J. C. Street. A comprovação da existência dessa partícula se deu através de observações de raios cósmicos que chegavam à Terra, o que será abordado posteriormente no capitulo 7.

## pt0pt

Nos anos que se seguiram, e com grande participação de pesquisas brasileiras, o múon começa a ter suas características entendidas. Porém, uma delas ainda era desconhecida: a presença de múons originados de raios cósmicos na superfície do planeta.

Para abordar essa questão, antes, vamos entender o que são chuveiros atmosféricos. Imagine uma partícula cósmica de alta carga energética que chega de algum lugar do espaço. Ao entrar na parte mais alta da atmosfera terrestre, colide com outros átomos e partículas que já se encontravam no planeta. Após tal colisão, originam-se, novos núcleos e novas partículas. Desta forma, a interação continua como em um efeito dominó até chegar à superfície da Terra, fenômeno que é chamado de chuveiro atmosférico. Mais sobre raios cósmicos será apresentado no capítulo 7. Voltemos, pois, ao múon.

O múon possui um tempo médio de vida de aproximadamente 2, 2 ×  $10^{-6}$ s. Ou seja, por ser instável, acaba decaindo espontaneamente em uma combinação de outras partículas, sendo elas um elétron, um neutrino e um anti-neutrino que são explicados em capítulo mais à frente. Através disso e de detecções feitas a cerca de 15km de altitude, encontrou-se que a velocidade desta partícula era muito próxima à da luz, sendo de aproximadamente 2, 92 ×  $10^8$ m/s. Assim, utilizando os cálculos da mecânica clássica para determinar o tempo:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{\Delta v} \tag{5.1}$$

com a velocidade já conhecida e com o espaço de 15km, tem-se que:

$$\Delta t = \frac{15 \times 10^3 m}{2,92 \times 10^8 m/s} \approx 50,55 \times 10^{-6} s$$
(5.2)

Como notado na equação (), o tempo que a partícula levaria para chegar ao nível do mar é maior que o tempo médio de vida dela. Utilizando o conceito de decaimento dado pela lei estatística da radioatividade, a conclusão seria de que a quantidade de múons que deveriam chegar é muito menor da que realmente chega. Nota-se assim, que a mecânica clássica não é capaz de explicar o fenômeno. Para explicá-lo então é necessária a Mecânica Relativística. [30]

## O Espaço e o Tempo alterados

### pt0pt

A explicação para a quantidade de múons encontradas a nível do mar é dada pela famosa Teoria da Relatividade Restrita, proposta pelo físico alemão Albert Einstein em 1905 e complementada por ele posteriormente. A proposição de Einstein define que a velocidade da luz é constante para qualquer referencial e que as leis da física são as mesmas independentemente do referencial inercial, que é aquele em que, na ausência de forças resultantes, os corpos se encontram em movimento retilíneo e uniforme. Uma das consequências disso é que o tempo e o espaço não são invariáveis. [31]

Desta forma, objetos com velocidades altíssimas passariam por um fenômeno de distorção nas dimensões de espaço-tempo que são notadas de maneira diferente de acordo com o referencial com que são observados. Quanto mais próxima à velocidade da luz, mais evidente se torna o fenômeno.

Para ficar mais fácil a visualização, imagine uma pessoa na Terra e outra viajando em um foguete em uma velocidade extremamente próxima à velocidade da luz no vácuo. Essa pessoa no planeta aponta uma lanterna para a outra e a aciona. Para ela, a velocidade da luz seria de 299.792.458 m/s. Mas, por mais contraintuitivo que possa



Figura 5.9: Albert Einstein (1879-1955).

parecer, para a pessoa no foguete a luz também estaria com a mesma velocidade. Ou seja, as medidas de espaço e tempo se deformam, mantendo a luz constante para qualquer observador.

Como o espaço e tempo não são invariáveis, não é viável utilizá-los como unidade de medida. Assim, em casos de altíssimas velocidades, a unidade padrão é a velocidade da luz, representada pela letra 'c'. [31]

No caso do Múon em particular, vamos pensar que ele seja observado por dois observadores diferentes, e que ambos se encontram em referenciais inerciais. O primeiro deles, em um laboratório na Terra observando os raios cósmicos e o segundo, viajando juntamente com a própria partícula. A velocidade média do Múon em relação a pessoa no planeta é de cerca de  $2,92 \times 10^8$  m/s, ou seja 0,998c. Para o observador viajando junto com o Múon, o tempo sofre o fenômeno de dilatação, ou seja, ele passará mais devagar quando comparado com o tempo medido no laboratório na Terra, enquanto que, para o observador no laboratório, o espaço percorrido pelo múon terá sido contraído. Mas como determinar o quanto do espaço-tempo foi deformado em cada uma das observações?

Para isso usa-se a transformação de Lorentz, dada pelas seguintes equações:

$$x' = \gamma(x - v.t) \tag{5.3}$$

$$t' = \gamma (t - \frac{v}{c^2} x) \tag{5.4}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta}}$$
(5.5)

Em que,

 ${\bf c}$  é a velocidade da luz,  ${\bf v}$  é a velocidade do objeto observado e  ${\bf t}$  é o tempo.

# A descoberta do Múon e o Méson Pi

Quando o múon foi descoberto, antes de realmente se entender sua natureza, acreditava-se que ele seria a partícula responsável por manter o núcleo do átomo estável.

Essa era a proposta de Hideki Yukawa (1907-1981), para quem deveria existir algo que mantivesse os núcleos atômicos unidos, mesmo com a carga elétrica dos prótons os repelindo. A ideia era a de que existisse uma partícula média responsável pelo fenômeno, chamada de *Méson* que em grego significa "meio". Apesar de não serem partículas elementares, elas são de extrema importância para a construção do modelo padrão. Conforme natureza do múon foi sendo conhecida, notou-se que ele não poderia ser essa partícula.



Figura 5.10: César Lattes (1924-2005).

Além disso, os mésons têm uma interessante relação com a física brasileira. Se o múon não poderia ser a partícula que mantinha o núcleo atômico coeso, ainda faltava encontrar a partícula de Yukawa. Foi então que um grupo da universidade de Bristol, liderado por Cecil Powell (1903-1969) e com grande participação do físico brasileiro César Lattes (1924-2005), detectou em 1947 o Méson Pi, também chamado de Píon ( $\pi$ ). [32]

Lattes foi um físico brasileiro, graduado pela Universidade de São Paulo (USP), que além de ser codescobridor do Méson Pi, também foi capaz de gerá-los artificialmente em um acelerador de partículas, com a ajuda de Eugene Gardner (1901-1986). Foi também grande incentivador da ciência nacional, sendo um dos principais expoentes no desenvolvimento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico (CNPq), do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e do Instituto de Física Gleb Wataghin da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). [33]

# 5.3 O Fóton

A natureza da luz já foi palco de grande debate na história da Física. Antes do desenvolvimento da Mecânica Quântica, alguns cientistas acreditavam que a luz era composta de partículas; outros, que era uma onda.

Um dos principais defensores da teoria corpuscular da luz foi o físico e matemático Isaac Newton (1643-1727) e essa teoria é baseada na filosofia grega atomista. A luz seria então formada de partículas (ou corpúsculos) microscópicas, que viajam em linha reta com velocidade finita. Newton, utilizando um prisma, conseguiu decompor a luz branca do Sol e viu que ela era formada por um espectro multicolorido (Figura 5.11).

# pt0pt

Através das ideias de Newton, era possível explicar os fenômenos de reflexão e refração a partir de propriedades geométricas. O modelo corpuscular, elaborado por Newton por volta de 1672, durou até o início do século XIX, quando experimentos feitos por Young e Fresnel demonstraram efeitos que não podiam ser explicados pela teoria corpuscular.

Contemporaneamente a Newton, o físico e matemático Christiaan Huyguens (1629-1695) desenvolveu uma teoria ondulatória da luz. Ele propôs que a luz é uma onda, tal qual o som, que se propaga por um meio chamado de éter luminífero. Esse éter seria invisível, não teria massa e preencheria todo o universo[34].

A teoria ondulatória de Huyguens não é bem como a que temos hoje, mas era capaz de explicar diversos efeitos óticos como a velocidade reduzida em um meio denso, refração e a polarização[34].

No início do século XIX, experimentos feitos por Thomas Young (1773-1829) e Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) demonstraram efeitos que



Figura 5.11: Luz branca do Sol decomposta por um prisma gera um espectro multicolorido da luz visível, mesmo efeito que gera o arco-íris.

Fonte: D-Kuru/Wikimedia Commons, disponível em https://commons.wikimedia.org/ wiki/File:Light\_dispersion\_of\_a\_ mercury-vapor\_lamp\_with\_a\_flint\_ glass\_prism\_IPNr%C2%B00125.jpg Luz Laser

Figura 5.12: Padrão de interferência formado pelo experimento de dupla fenda

Fonte: Adaptado de NekoJaNeko-Ja/Wikimedia Commons, disponível em https://commons.wikimedia.org/ wiki/File:Double-slit.svg



### pt0pt

Assim, a teoria ondulatória ganhou força e substituiu a teoria corpuscular. Apesar disso, diversos experimentos haviam sido feitos com o intuito de detectar o éter luminífero, mas todos falharam e a ideia do éter acabou descartada.

não podiam ser explicados pela teoria corpuscular da luz, como, por exemplo, os efeitos de interferência e difração. Young, através do expe-

O desenvolvimento do eletromagnetismo culmina, na segunda metade do século XIX, nas equações de Maxwell, que mostram a existência de uma onda transversal que se propaga no vácuo com velocidade constante, igual à velocidade da luz. A ótica passa então a ser um braço da teoria eletromagnética. Novos espectros são descobertos além do espectro visível (Figura 5.13).



Em 1887, o físico Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) descobre o efeito fotoelétrico, que anos mais tarde iria revolucionar a visão da teoria da luz. Hertz percebe que ao incidir luz na frequência do violeta ou ultravioleta em um metal, era possível arrancar faíscas do metal, independente da intensidade. Diversos experimentos mostraram que esse efeito ocorria apenas a partir de uma determinada frequência da luz incidida e, quanto maior a intensidade, mais faíscas eram arrancadas. Porém, para baixas frequências, não era arrancada nenhuma faísca, independente da intensidade da luz incidida.

Mas antes de continuarmos, vamos fazer uma pausa para falarmos de Max Planck e a quantização da energia.

No final do século XIX e incio do século XX, um dos grandes problemas da física era a catástrofe do ultravioleta: não havia uma teoria

Figura 5.13: Espectro eletromagnético Fonte: Khemi/Wikimedia Commons, disponível em: https: //commons.wikimedia.org/wiki/File: Espectro\_EM\_pt.svg

satisfatória que explicasse o espectro de emissão de radiação\* de um corpo negro.

Um corpo negro é um objeto ideal que absorve toda a luz que incide sobre ele<sup>†</sup>. Porém, ao absorver essa luz, ele aumenta sua temperatura, e todo corpo com temperatura acima de 0 K emite radiação no que chamamos de espectro de corpo negro (Figura 5.14).

## pt0pt

O espectro de emissão de radiação de um corpo negro já era bem conhecido, porém a teoria que explicava sua emissão funcionava apenas para baixas frequências. Para altas frequências, a quantidade de radiação emitida prevista divergia, isto é, a teoria previa um valor infinito.

Para resolver esse problema, o físico Max Planck (1858-1947) propõe a quantização da energia da radiação eletromagnética. Segundo a teoria clássica do eletromagnetismo, uma onda eletromagnética de frequência  $\nu$  poderia ter qualquer energia. Planck vai propor que uma onda eletromagnética de frequência  $\nu$  pode ter apenas energia que sejam múltiplos inteiros de  $h\nu$ , ou seja:  $h\nu$ ,  $2h\nu$ ,  $3h\nu$  e assim por diante. Energias do tipo  $0, 5h\nu$  ou  $3, 333h\nu$ , por exemplo, são proibidas. Com isso, Planck consegue resolver o problema da radiação de corpo negro.

A partir da quantização da energia de Planck, Einstein, em 1905, publica seu artigo sobre o efeito fotoelétrico. Einstein propõe que a luz seria formada de pequenos pacotes de onda (partículas chamadas fótons) que carregam energia proporcional à sua frequência, dada por E = hv.

Além disso, um elétron só poderia ser emitido de um metal (faíscas arrancadas) se recebesse energia maior ou igual à sua energia de ligação de um único fóton.

Uma luz de intensidade maior significa mais fótons chegando ao metal e mais elétrons arrancados. Porém, uma quantidade grande de fótons de baixa energia não é capaz de arrancar elétrons.

Assim, Einstein unifica as teorias corpuscular e ondulatória da luz, dando origem à uma teoria unificada de dualidade onda-partícula e a quantização do eletromagnetismo.

O fóton, como será discutido na seção 6, é um bóson, mediador da força eletromagnética. Não possui carga nem massa e é a sua própria antipartícula.

# 5.4 Quarks e glúons

Ao passar pelos prótons, nêutrons, elétrons e as descobertas de tantas outras partículas até a década de 1950, os avanços científicos e tecnoló-



Figura 5.14: Espectro de emissão de radiação de corpo negro para diferentes temperaturas e previsão que funciona apenas para baixas temperaturas Fonte: Darth Kule/Wikimedia Commons

<sup>\*</sup> Radiação é o mesmo que ondas eletromagnéticas, como já comentado no capítulo 3

<sup>&</sup>lt;sup>+</sup> De fato, nenhum objeto real absorve toda a radiação que incide sobre ele

gicos nos revelariam blocos ainda mais fundamentais constituintes da matéria nas décadas seguintes: os quarks.

Antes de sua descoberta, os quarks já haviam sido teorizados por Murray Gell-Mann (1964) e George Zweig (1964).

É importante tomarmos como ponto de reflexão aqui o que já discutimos no capítulo 1: muitas vezes, pensa-se que as teorias físicas são elaboradas para explicar observações que já foram realizadas. Isso não é totalmente verdade. Existe uma interdependência entre teoria e experimentação muito grande. Uma alimenta a outra. A física de partículas é um grande exemplo disso: partículas como os quarks foram postuladas e teorizadas antes dos resultados experimentais.

Há outros exemplos: os Neutrinos foram postulados por Pauli, em 1931, para explicar resultados experimentais anômalos no decaimento de nêutrons e foram detectados experimentalmente só em 1956.

Yukawa propôs o píon (méson  $\pi$ ) em 1935 e sua evidência experimental foi obtida apenas em 1947.

Dentre os mais recentes exemplos, podemos citar a descoberta do Bóson de Higgs e das Ondas Gravitacionais. O Bóson de Higgs, teorizado ainda no século XX, em 1960, por Peter Higgs, foi descoberto experimentalmente em 2013 no LHC (Large Hadron Collider) do CERN. E as ondas gravitacionais, previstas em 1916 por Albert Einstein, foram descobertas somente em 2015.

A ciência é fruto da curiosidade humana. As ciências da natureza, apesar de terem como ponto de partida a observação do nosso mundo, são inteiramente humanas, no sentido de que são inteiramente criadas e abstraídas por homens e mulheres cientistas, que, com seus erros e acertos, se propõem a buscar e entender os fenômenos, a vida e as coisas ao nosso redor, para que possamos enxergar mais adiante a cada nova descoberta.

# Hádrons

Como vimos, até 1950 ocorreu um tremendo avanço na física de partículas. Muitas partículas foram detectadas e nomeadas. Contudo, muitas delas não são partículas elementares, isto é, são formadas por outras partículas ainda mais elementares. E muitas delas possuem um tempo de vida muito baixo, isto é, decaem em outras partículas.

As partículas que são formadas por quarks são chamadas hádrons (do grego, hádrons significa massivo, robusto, forte). Há dois tipos de hádrons: os bárions, formados por três quarks ou três antiquarks, e os mésons, formados por um quark e um antiquark.

Um hádron é um composto de partículas subatômicas, regido pela interação forte, como veremos mais adiante na seção 5.4. Assim, prótons e nêutrons são exemplos de hádrons. E como são compostos por três quarks, são exemplos de bárions.
Outro exemplo de bárion é o píon, que é formado por um quark e um antiquark e, portanto, é um méson. Na tabela 5.1 podem ser vistos os três tipos de píons, carga elétrica, massa e tempo de vida.

Nome	símbolo	Carga elétrica	Massa (MeV/ $c^2$ )	Tempo de Vida (s <sup>Tab</sup>	ela 5.1: Tabela de píons
píon	$\pi^+$	+1	139,6	$2,6 \times 10^{-8}$	
píon	$\pi^{-}$	-1	139,6	$2,6 \times 10^{-8}$	
píon	$\pi^0$	0	135,0	$0,9 \times 10^{-16}$	

### De volta aos quarks...

Temos ao todo seis tipos de quarks, que são distinguidos por uma propriedade denominada "sabor"em física de partículas. Os sabores são: Up, Down, Top, Charm, Strange e Bottom. Além disso, todos os quarks têm spin igual a 1/2.

Todas as partículas elementares são férmions ou são bósons. Os férmions são partículas que possuem spin semi-inteiro. Os bósons são partículas que possuem spin inteiro. Assim, os quarks são férmions!

O Princípio de Exclusão de Pauli nos diz que férmions idênticos não podem ocupar o mesmo estado quântico simultaneamente. Esta regra deve ser respeitada paelos quarks, que são férmions de spin igual a 1/2. E então surge uma questão que vai nos revelar uma característica fundamental dos quarks: partículas como a  $\Delta^{++}$ , formada por três quarks up (u,u,u), não deveriam existir, pois violam o Princípio de Exclusão de Pauli, uma vez que os seus quarks constituintes têm os mesmos sabores, o mesmo spin etc. e estão no mesmo estado quântico, que é a própria partícula  $\Delta^{++}$ .

Assim, para se respeitar o Princípio de Exclusão de Pauli é adicionada uma diferenciação: o número quântico denominado "cor": vermelho, azul e verde. Os quarks possuem "cor". E a partícula  $\Delta^{++}$  pode existir respeitando o Princípio de Exclusão de Pauli se os seus três quarks up possuirem cores diferentes entre si.

Assim como temos as cores, também temos as anticores, e a analogia pode ser justamente criada através das cores primárias (Figura 5.15). Amarelo, ciano e magenta são as anticores. O branco pode ser entendido como cor neutra, gerada pela combinação de cores dos quarks.

pt0pt

### Os Glúons (1973)

Os quarks não existem isolados na natureza. Nunca se observou um quark sozinho, fora de um hádron. Eles se unem por meio de uma propriedade chamada "carga de cor". Os quarks interagem entre si e mudam de cor trocando partículas. Essas partículas são os *glúons*.

A força entre os quarks tem sua origem no número quântico cor. A cor é uma espécie de carga que origina a força forte, da mesma forma



Figura 5.15: Cores primárias e combinações.

que a carga elétrica é fonte da interação eletromagnética. Apesar de o número quântico cor ter sido proposto para resolver o problema do Princípio da Exclusão de Pauli, a razão mais profunda da necessidade desse número quântico extra consiste no fato da força forte que interrelaciona os quarks ser mediada pela cor [35].

Os glúons são as **partículas** que medeiam a força forte. Da teoria Cromodinâmica Quântica (QCD), que é a teoria que estuda interações fortes, sabe-se que a força forte é transmitida por oito glúons diferentes entre si,que não têm massa, são eletricamente neutros e têm spin 1. O termo "glúon"se originou da palavra *glue*, cola, em inglês. É essa "cola", os glúons, que mantem os quarks unidos e não permite que eles sejam detectados isolados na natureza.

Os glúons carregam cor e anticor. Como há três cores (vermelho, azul, verde) e três anticores ( $\overline{v} \ \overline{a} \ \overline{v}$ ), podemos ter 8 espécies de glúons diferentes. Essa contagem, contudo, não é tão trivial, e demandaria um conhecimento mais aprofundado sobre a teoria.

A força forte é a responsável pela coesão nuclear. É aquela que mantém os *nucleons* juntos, uma vez que prótons são todos eletricamente positivos e teriam, pela força eletromagnética, a tendência de se repelir. Como dito anteriormente, um quark isolado nunca foi "observado". Em experiências, quando se tenta separar dois quarks, a força necessária é tão grande que se torna energeticamente mais favorável criar um par quark/antiquark do que separá-los, isto é, a energia fornecida para separá-los é usada para criar um par de partícula-antipartícula.

## 5.5 Bósons W e Z

Até agora vimos que o fóton é a partícula mediadora da força eletromagnética e os glúons são as partículas mediadoras da força forte. Os fótons conseguem explicar as interações do eletromagnetismo: é através da troca de fótons entre as partículas carregadas que a força eletromagnética é sentida, gerando uma força de atração ou repulsão. Os glúons, por sua vez, são responsáveis pela coesão nuclear.

Os bósons  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$  são as partículas elementares mediadoras da força nuclear fraca. Esta força é a responsável pelos processos nucleares de decaimento radioativo, como o decaimento  $\beta$ , por exemplo.

Já que estão intimamente ligados aos processos nucleares de decaimento, vale a pena mencionar a importância e algumas aplicações que envolvem o conhecimento dessas interações fundamentais, como os raios x, os raios gama, radioterapia, energia nuclear, dentre muitas outras aplicações fortemente presentes em nosso dia a dia.

No inicio do século XX um dos tipos de radiação que os cientistas estavam estudando era a radiação  $\beta$ , um processo no qual o núcleo de um átomo emite um elétron e se transforma em outro elemento. Para os físicos da época, o processo parecia violar um dos princípios fundamentais da física, a conservação de energia. O núcleo inicial teria mais energia do que o núcleo final e o elétron resultante.

e compõem o núos prótons e nêuPauli postulou a existência de uma partícula leve, neutra e fracamente interagente com a matéria, para explicar a aparente falha da conservação de energia nas medidas do decaimento  $\beta$ . Esta partícula "extra"estaria carregando a energia que faltava para recuperar o balanço energético da reação. Hoje sabemos que o processo fundamental desse decaimento é a desintegração do nêutron, resultando em um próton, um elétron energético e um antineutrino.

#### $n\hat{e}utron \longrightarrow pr\acute{o}ton + el\acute{e}tron + antineutrino$

ou, de modo equivalente:

$$n \longrightarrow p + e^- + \overline{v}_e$$

pt0pt

Foi o físico italiano Enrico Fermi que, em 1933, sugeriu o formalismo que explicaria teoricamente a desintegração beta. Segundo Fermi, além da força que une os núcleos entre si, deveria haver outra força capaz de converter um nêutron em um próton juntamente com a emissão de um elétron, que é o antineutrino. Mais tarde essa força foi nomeada de *força nuclear fraca*, em contraposição à força nuclear forte.

Vimos que temos seis quarks diferentes, que são conhecidos também como sabores: Up, Down, Charm, Strange,Boton e Top. Os léptons também existem em seis tipos: elétron, múon, tau, neutrino do elétron, neutrino do múon, neutrino do tau. A força fraca é capaz de mudar o tipo de quarks e léptons.

Hoje, entendemos estes processos da seguinte maneira: um quark Down presente em um nêutron do núcleo inicial se transforma em um quark Up e emite um bóson *W*. Esta transformação de um quark Down em um quark Up faz com que o nêutron se transforme num próton. O bóson *W* emitido no processo de transformação do quark Down no quark Up é capaz de se transformar em um elétron e um antineutrino.

pt0pt

pt0pt

Os bósons W e Z também foram teorizados (em 1967) antes de serem descobertos experimentalmente. Assim, temos três bósons responsáveis por mediar a força fraca, com seus respectivas cargas e massas de acordo com a tabela 5.2.

Como os bósons mediadores da força fraca são muito massivos, eles se tornam instáveis e decaem em partículas menores. Assim, a força

Partícula	Carga elétrica	Massa (GeV/ $c^2$ )	Spin
$W^+$	+1	$80,423 \pm 0,039$	1
$W^-$	-1	$80,423 \pm 0,039$	1
$Z^0$	0	$91,187 \pm 0,002$	1



**Figura 5.16:** Decaimento Beta. Fonte: Inductiveload, Wikimedia Commons.



**Figura 5.17:** O nêutron é formado um quark up e dois quarks down.



Figura 5.18: O próton é formado por dois quarks up e um quark down

Tabela 5.2: Tabela dos Bósons de Gauge

## 68 5 Partículas elementares

fraca é uma força de curto alcance e só se manifesta a uma distância muito curta, de cerca de 0,1% do diâmetro do próton.

### 5.6 Os neutrinos

Para completarmos o conjunto das partículas elementares previsto pelo Modelo Padrão da Física de Partículas, não podemos nos esquecer dos neutrinos! Estas partículas intrigam os cientistas desde a sua postulação até os dias de hoje, e são atualmente uma das mais prováveis fontes de descoberta de física além do Modelo Padrão.

Como mencionado na seção anterior, no começo do século 20, observações inesperadas feitas durante o estudo do decaimento beta levaram os cientistas a questionarem um dos principais pilares da física: a conservação de energia. Originalmente, pensava-se que o decaimento beta consistia no decaimento de um núcleo X, em um núcleo mais leve Y, com a emissão de um elétron,

$$X_Z^A \to Y_{Z+1}^A + e^-,$$
 (5.6)

onde A e Z são o número de massa e o número atômico, respectivamente. Neste cenário, a energia do elétron emitido deveria ser constante no centro de massa do núcleo original,

$$E_e = \frac{1}{2m_x} \left( m_X^2 - m_Y^2 - m_e^2 \right) c^2.$$
 (5.7)

pt0pt

Entretanto, enquanto estudava o decaimento beta, James Chadwick observou que os elétrons eram emitidos obedecendo um vasto espectro de energia, ao invés de um valor fixo como esperado. Ou seja, aparentemente, energia não era conservada no decaimento beta! Esta observação gerou grandes discussões entre os físicos da época. Houve cientistas propondo a violação da conservação de energia, como foi o caso de Niels Bohr. Em 1930, a fim de salvar o princípio de conservação de energia, Wolfgang Pauli propôs que haveria uma outra partícula leve, neutra e fracamente interagente com a matéria sendo emitida no decaimento beta, juntamente com o elétron. Enrico Fermi foi o primeiro a chamar esta partícula de *neutrino*. Para o alívio de muitos cientistas, a confirmação da existência do neutrino se deu em 1956, com o experimento de Cowan e Reines que conseguiu detectar os neutrinos emitidos no decaimento beta. Esta descoberta rendeu o prêmio Nobel em 1995 para Frederick Reines.

pt0pt

pt0pt

pt0pt

A confirmação da existência dos neutrinos marcou o começo de uma nova área de estudos na física, a física de neutrinos!

O Modelo Solar Padrão, que descreve a física que ocorre no Sol, rapidamente implementou a existência dos neutrinos em sua teoria e em 1960, usando o Modelo Solar Padrão, John Bahcall calculou pela primeira vez o fluxo esperado de neutrinos provindos do Sol usando



**Figura 5.19:** Energia esperada do elétron emitido no decaimento beta (vermelho) e o espectro de energia observado para o elétron (azul).



**Figura 5.20:** James Chadwick (1891-1974).



Figura 5.21: Enrico Fermi (1901-1954).



**Figura 5.22:** Frederick Reines (1918-1998).

este modelo. Entretando, em 1968, o experimento Homestake, liderado por Bahcall e Raymond Davis, mediu um fluxo de neutrinos solares de aproximadamente 1/3 do previsto pelos cálculos da Bahcall. Esta discrepância entre o fluxo de neutrinos solar calculado e medido ficou conhecida como *o problema dos neutrinos solares*. Por que o experimento mediu um fluxo tão menor do que o esperado? Onde estariam os outros neutrinos? A resposta está em uma propriedade incrível dos neutrinos. Quer ver só?

Atualmente sabemos que existem três tipos (também conhecidos como *sabores*) de neutrinos, um para cada lépton: neutrino eletrônico ( $v_e$ ), neutrino muônico ( $v_\mu$ ) e neutrino tauônico ( $v_\tau$ ). E, pasmem, um neutrino criado com um sabor leptônico específico pode ser detectado com um sabor diferente posteriormente! Dizemos que os neutrinos *oscilam de sabor*. Ou seja, os neutrinos eletrônicos produzidos no interior do Sol podem ser detectados como neutrino muônico, por exemplo, após escapar do Sol e viajar até a Terra. Como o experimento Homestake não conseguia medir todos os sabores de neutrinos, suas descobertas representavam um fluxo parcial dos neutrinos solares na Terra.

Em 1984, o experimento SNO (The Sudbury Neutrino Observatory) conseguiu finalmente dar uma resposta definitiva para o problema dos neutrinos solares. Por ser capaz de detectar todos os sabores de neutrinos, foi possível medir o fluxo *total* dos neutrinos provenientes do Sol na Terra, que coincidiu com a previsão teórica. Confirmou-se então que neutrinos mudam de sabor durante a sua trajetória do Sol até a Terra. Isto é, os neutrinos se transformam espontaneamente de um sabor a outro.

Vale comentar que o Modelo Padrão prevê que apenas partículas com massa não nula podem oscilar. Então qual seria a massa dos neutrinos? Qual é o neutrino mais pesado e qual é o mais leve? Ou, em outras palavras, qual é a *hierarquia das massas* dos neutrinos? Nós ainda não sabemos estas respostas!

Os neutrinos são partículas pouco interagentes com a matéria, e então difíceis de serem detectadas. Vamos quantificar um pouco esta afirmação: o fluxo de neutrinos solares na Terra,  $\phi$  é de

$$\phi = 60 \times 10^9 \, v/s \, cm^2. \tag{5.8}$$

Isto é, neste exato segundo, cerca de 60 bilhões de neutrinos vindos do Sol estão atravessando cada uma das unhas das suas mãos! Todo o seu corpo é atravessado por cerca de 300 trilhões de neutrinos solares a cada segundo. Destes, menos de 5 interagem com alguma partícula do nosso corpo durante toda a nossa vida! Então podemos ficar tranquilos que o fluxo de neutrinos na Terra, apesar de intenso, atravessa a maior parte da massa que encontra no seu caminho. Por esse fato, os detectores de neutrinos tendem a ser grandes e densos, para se aumentar a probabilidade de detecção.

Os neutrinos também podem desempenhar um papel importante na nossa compreensão de um problema curioso que passa despercebido para a maioria das pessoas mas que chama muito a atenção dos físicos. Desde a sua descoberta, tem sido observado que a antimatéria se comporta de maneira muito semelhante à matéria. E isso vale para o principal modelo cosmológico que explica a formação do universo: o Modelo do Big Bang. Segundo este modelo, matéria e antimatéria foram criadas em igual quantidade no instante da grande explosão que originou o universo há cerca de 13,8 bilhões de anos. Entretanto, hoje em dia observamos somente matéria. À exceção de algumas poucas partículas observadas em raios cósmicos ou produzidas em laboratórios, tudo é feito de matéria: nós mesmos, tudo o que existe na Terra, o sistema solar, as estrelas e galáxias, tudo é feito de matéria. Então fica a pergunta: para onde foi toda a antimatéria? A resposta pode estar relacionada àquilo que é chamado de "Violação de Carga-Paridade"ou, simplesmente, "Violação de CP". Este fenômeno corresponde a um comportamento ligeiramente diferente da matéria quando comparado com o comportamento da antimatéria. A Violação de CP será investigada em experimentos importantes, atualmente em construção, envolvendo os neutrinos, como o DUNE, o "Deep Underground Neutrino Experiment". Neste experimento se comparará o comportamento de um feixe de neutrinos e de um feixe de antineutrinos. A descoberta de violação de CP neste sistema de neutrinos abrirá caminho para a compreensão do misterioso sumiço da antimatéria ao longo da história do universo.

Vamos encerrar este capítulo mencionando uma curiosidade sobre os neutrinos: as bananas também são uma fonte de neutrinos! Isso porque o potássio-40 presente na banana sofre decaimento beta e, como aprendemos nesta sessão, neutrinos são produzidos no decaimento beta! Pense nisso quando estiver saboreando a sua próxima banana!

## 5.7 Bóson de Higgs

O bóson de Higgs foi a última partícula elementar descoberta e é uma peça fundamental para o modelo padrão das partículas elementares. Ele foi detectado em 2012 pelos experimentos ATLAS e CMS, ambos parte do grande colisor de hádrons (LHC), e sua descoberta, desde a construção do acelerador, um dos objetivos propostos.

A grande importância dessa partícula se deve ao fato do modelo padrão só conseguir explicar como partículas elementares ganham massa através do campo de Higgs. Nosso entendimento teórico atual nos leva a supor que, para cada partícula elementar, existe um campo associado; as partículas que detectamos são excitações destes campos fundamentais. O campo de Higgs é especial pois apresenta algo conhecido como "valor esperado no vácuo". De forma prática, isso quer dizer que ao interagir com o campo de Higgs haverá a geração de massa para todos os quarks e léptons. Quanto mais forte a interação, maior é a massa atribuída à partícula.

Mas para provar a existência do campo de Higgs, precisávamos detectar suas excitações, e por muito tempo este foi um dos grandes objetivos da física de partículas. Um problema para detectar esta partícula é que além de bastante instável, sua massa é bastante elevada, sendo cerca de 125 vezes maior que a massa de um próton. Isto exigiu que novas tecnologias para aumentar a energia dos aceleradores de partículas fossem desenvolvidas, e mesmo com um acelerador tão potente como o LHC, poucas eventos são criados.

Nós também não detectamos essa partícula diretamente. Como citado anteriormente, o Higgs é bastante instável e por isso decai rapidamente. Os cientistas detectam as partículas filhas geradas na colisão de partículas do acelerador e, com auxílio de computadores, inferem as reações e partículas que existiram lá dentro. Somente assim foi possível mostrar de forma científica a existência do Bóson de Higgs.

### pt0pt

O nome da partícula é uma homenagem ao físico Peter Higgs, um dos físicos que descobriu o mecanismo que gera o valor esperado no vácuo do campo de Higgs, gerando consequentemente as massas das partículas. O mecanismo ficou conhecido como quebra espontânea de simetria (ou mecanismo de Higgs) e é fundamental para a teoria, pois em altíssimas energias, precisamos ter partículas sem massa para explicar as interações fundamentais do modelo padrão. Assim os quarks e léptons não podem ter massa desde o início, mas sim precisam adquiri-las de maneira espontânea, o que acontece devido à interação com o Higgs.

Perceba que considerando modelos cosmológicos, nos primórdios do universo, após o Big Bang, a temperatura, e consequentemente a energia, eram extremamente altas. Assim, no começo do universo, as partículas não possuem massa. Conforme o universo expande e esfria, a temperatura permite ao mecanismo de Higgs dar massa para as partículas. Este é um momento importante na história do universo, conhecido como transição de fase eletrofraca.

Este nome se deve ao fato de que, antes da quebra de simetria, as interações eletromagnéticas e fracas eram uma única interação, conhecida como interação eletrofraca. A quebra de simetria faz com que estas interações se tornem independentes, da maneira que a conhecemos no dia a dia. Isto também é explicado pelo mecanismo de Higgs.

### pt0pt

Em 2013, Peter Higgs e François Englert ganharam o premio Nobel de Física por terem proposto este modelo, que se confirmou após a detecção do Bóson de Higgs.



**Figura 5.23:** Peter Higgs (1929-)



Figura 5.24: François Englert (1932-)

# Interações Fundamentais

Como conversamos no capítulo do Modelo Padrão, as interações fundamentais são um dos pilares mais importantes que temos nesse modelo. Esse capítulo será dedicado a nos aprofundarmos nas interações fundamentais da natureza.

Primeiramente, o que são as interações fundamentais e quais são elas? Bom, no nosso dia a dia vemos milhares de interações diferentes, seja um aperto de mão, uma caneta caindo ou simplesmente um carro andando na rua. Todas essas são interações que acontecem entre diferentes corpos, entre pessoas, objetos e pessoas ou objetos com o planeta. Apesar de cada uma dessas interações parecerem únicas e singulares, todas elas são resultados de 4 interações básicas, ou interações fundamentais, e elas são a interação Eletromagnética, a Gravitacional, a Forte e a Fraca.

Agora, antes de explicar como as interações funcionam, vamos voltar um pouco e falar sobre os Bósons. O Modelo Padrão é composto por dois grupos, os Férmions e os Bósons. Enquanto os Férmions compõem a matéria que vemos à nossa volta, os Bósons, com exceção do Bóson de Higgs, são os mediadores das interações que essa matéria tem. Tendo isso claro, vamos entender como funciona essa interação.

Vamos supor que temos dois ímãs em nossas mãos. Como sabemos, um ímã tem um polo Norte e um polo Sul. Se você aproximar os polos opostos, os ímãs se atrairão, mas se aproximarmos os polos iguais, eles se repelirão. Essa repulsão e atração, dentro do Modelo Padrão de Partículas Elementares, são explicadas pela troca desses Bósons pelos corpos, no caso de interações eletromagnéticas, a troca de Fótons. Então, no nosso exemplo, o que acontece é, quando aproximamos os dois ímãs eles trocam fótons entre si e esses fótons carregam informações sobre o outro corpo. Essa troca de informações entre os corpos é o que vai fazer com que eles se atraiam ou se repilam.

Agora que entendemos como essas interações acontecem, vamos descobrir quem são elas e quais são suas partículas mediadoras<sup>\*</sup>. Já sabemos que existem 4 interações fundamentais: a Eletromagnética, que tem como partículas mediadora o Fóton; a Força Fraca, que tem como partículas mediadoras os Bósons  $Z^0$ ,  $W^+$  e  $W^-$ ; a Força Forte, que tem como partícula mediadora os Glúons, e a interação Gravitacional. Vale notar que ainda não existe uma teoria quântica de gravitação bem consolidada, por isso não temos uma partícula mediadora para a Força Gravitacional, porém caso ela venha a ser descoberta, provavelmente será chamada de Gráviton.

A interação eletromagnética seria a responsável por quase todas as interações que vemos no dia a dia. Digamos que seu carro não está ligando

<sup>\*</sup> Se quiser entender melhor o funcionamento do Modelo Padrão, recomenda-se ler o capítulo "Modelo Padrão de Partículas Elementares: A melhor das teorias científicas"

e você chama seus amigos para te ajudarem a empurrar. Quando vocês empurram, a impressão é que vocês aplicam uma força na parte de trás do carro e por isso ele anda para frente. Essa ideia não está errada, mas está incompleta. Em nível microscópico, vemos que os átomos das suas mãos interagem com os átomos do carro em uma troca de fótons quando você empurra o veículo. Assim, podemos entender que essa interação, e outras similares, não passam de interações eletromagnéticas. Essa interação pode se estender até o infinito, entretanto ela fica mais fraca conforme aumentamos a distância dos corpos que estão interagindo.

A força Forte é uma interação em nível sub-atômico. Ela atua entre Quarks e sua partícula mediadora são os Glúons. O nome Glúon vem da palavra da língua inglesa "Glue"que significa "Cola", isso por que a força Forte é a responsável por manter os Quarks unidos dentro dos Prótons e Nêutrons. No ensino médio, aprendemos que um átomo é formado por Prótons, Nêutrons e Elétrons e que esses Prótons e Nêutrons ficam juntos dentro do núcleo do átomo. Não é estranho ver tantos prótons juntos dentro do núcleo sem que eles se repilam e destruam o núcleo? Bom, é nesse ponto que o Glúon entra: ele é o responsável por essa estabilidade dos núcleos atômicos.

A força Fraca também é uma interação de nível sub-atômico, entretanto, como seu nome sugere, não é uma interação muito intensa. A distância em que ela atua de maneira considerável é menor que o diâmetro de um próton. A força Fraca é responsável pelo decaimento radioativo das partículas, como por exemplo, no decaimento beta, onde um nêutron se transforma em um próton, emitindo um elétron e um antineutrino. Os decaimentos promovidos pela interação fraca têm por característica a emissão de neutrinos, partículas neutras e de difícil detecção.

E por último temos a Interação Gravitacional. Essa é uma força que age atrativamente sobre a massa dos corpos. Ela não é prevista no Modelo Padrão e não há teorias consolidadas sobre existir uma partícula mediadora da força gravitacional.

A interação gravitacional pode ser melhor explicada pela Teoria da Relatividade Geral. Como esse não é o assunto desse e-book, não nos aprofundaremos muito, mas de forma resumida, corpos com massa são capazes de deformar o espaço-tempo. Essa deformação altera o caminho percorrido pelos corpos, gerando um efeito de atração. Mas apesar de boa, esta teoria é determinística e não pode ser levada para um domínio quântico. Uma teoria quântica de gravitação ainda não foi elaborada e é um problema em aberto da Física contemporânea.

# **Raios Cósmicos**

Raios cósmicos são partículas que podem ser super energéticas, que vêm do espaço em direção à Terra. Esses raios cósmicos são normalmente compostos por núcleos atômicos, como os de hidrogênio, ou mais pesados como os de ferro.

pt0pt

### 7.1 Início das pesquisas em Raios Cósmicos

A radiação cósmica é tópico de estudo desde 1910, e, nos anos que se seguiram, foi alvo de inúmeros experimentos, afim de comprovar sua real presença e possíveis efeitos.

Até então, acreditava-se que a radiação ionizante presente na atmosfera vinha de elementos no solo. Porém, Theodore Wulf, um padre jesuíta e físico, levou até o topo da torre Eiffel, em 1910, um detector de radiação, e notou que sua intensidade era maior, mesmo com certa distância do solo. Porém, não concluiu que isso tivesse seu efeito devido a interações originárias de elementos de fora da Terra.

Nos anos que se seguiram, diversos experimentos ocorreram para encontrar uma explicação daquela radiação ser alta, mesmo longe do solo. O físico Victor Hess decidiu a partir disso realizar estudos repetidos, em diversos horários e locais, utilizando-se de um balão de ar quente. Desta forma comprovou que a radiação não tinha origem no nosso planeta, mas sim vinha do espaço exterior, do cosmos. [32]

## 7.2 Chuveiros Atmosféricos

Com o novo campo de estudos criado, mais pesquisadores começaram a buscar explicações e aplicações para o fenômeno. Em 1938, o francês Pierre Auger descobriu que, ao chegar na parte mais alta da atmosfera, essas partículas vindas do espaço colidiam com outras que já estavam presentes aqui, dando origem, através de interações eletromagnéticas e nucleares, a novas partículas energéticas, que se chocavam com outras e davam origem aos chamados chuveiros atmosféricos (Figura 7.2).

### pt0pt

Após essa descoberta, houve uma divisão de estudo dos raios cósmicos em dois campos. Um que utiliza a energia dessas partículas vindas do espaço para entender como a matéria se comporta e outro para entender sua origem.

7.1 Início das pesquisas em	F	la	ios
Cósmicos	•	•	75
7.2 Chuveiros Atmosféricos	•	•	75
7.3 Detecção	•	•	76



Raios Cósmicos - animação do projeto AnimaFísica

Figura 7.1: Sugestão de material: Animação Raios Cósmicos, disponível em https://www.youtube.com/watch? v=itZA-rjTSIE



Figura 7.2: Representação esquemática dos chuveiros atmosféricos Fonte: Pierre Auger Observatory, disponível em: https://www.flickr.com/ photos/134252569@N07/21978580568/ in/album-72157659225375559/

O primeiro se dá porque os raios cósmicos podem ser usados de modo bem parecido com grandes colisores de partículas. Nos grandes colisores, partículas são aceleradas até velocidades próximas à da luz e são colididas com outras para que possamos investigar distâncias muito pequenas, onde as partículas elementares e suas interações são relevantes. Devido à alta energia que alguns raios cósmicos possuem, ao se chocar com partículas no topo da nossa atmosfera, teríamos o mesmo efeito. A vantagem dos raios cósmicos é que podem ser muito mais energéticos e gerar resultados que ainda não conseguimos reproduzir em laboratório.

### pt0pt

Apesar dessa vantagem, os raios cósmicos tendem a ser imprevisíveis. Além disso, quanto maior a grandeza de energia, menor a frequência com que chegam à Terra. Com esses aspectos sendo mais facilmente controlados por um acelerador de partículas, esse objeto de estudo foi perdendo força, restando apenas os estudos sobre o que originam o fenômeno.

Utilizando-se dessa fonte natural de energia, foram possíveis diversas pesquisas e descobertas. Uma das primeiras e mais notáveis foi a descoberta do pósitron, em 1932, por Carl D. Anderson. Além do pósitron, também foram detectados o Múon e o Píon (Méson-Pi).

Em relação à outra frente de pesquisa, sobre a origem dos raios cósmicos, ainda não se sabe ao certo a origem dasa partículas de mais alta energia, sendo esse um campo ativo de estudo.

## 7.3 Detecção

Há diversas maneiras de detectar raios cósmicos. Inicialmente, a detecção era feita através de eletroscópios, mas somente se detectava a presença ou não de radiação, não sendo possível determinar diretamente sua natureza e direção.

Com o passar do tempo, novas técnicas foram sendo inventadas e hoje há diversas maneiras de fazer essas detecções, tanto no espaço como na superfície terrestre.

Como dito anteriormente, os raios cósmicos interagem com as partículas logo que elas chegam à atmosfera, sendo difícil estudá-los diretamente a partir da superfície terrestre. O que podemos fazer então, é estudar as partículas geradas por essas interações, as partículas filhas.

No observatório Pierre Auger (Figura 7.4), maior observatório de raios cósmicos do mundo, a detecção de raios cósmicos é feita através de dois mecanismos principais: os detectores de superfície e os detectores de fluorescência[36].

### pt0pt

Os detectores de superfície são grandes tanques contendo água purificada e fotomultiplicadoras e funcionam pelo efeito Cherenkov[36].



**Figura 7.3:** Decaímento Méson-Pi em Múon. (Assinado por: César Lattes, Cecil Powell e Giuseppe Occhialini)



Figura 7.4: Observatório Pierre Auger Fonte: Pierre Auger Observatory, disponível em https://www.flickr.com/ photos/134252569@N07/49177599711/ in/album-72157712084469461/

A maior velocidade que um corpo pode atingir é 299 792 458 metros por segundo, a velocidade da luz no vácuo. Porém, a velocidade da luz pode ser menor quando ela se propaga num meio diferente do vácuo. Quando uma partícula carregada atravessa um meio em uma velocidade maior do que a luz naquele meio, há a emissão de luz. Chamamos esse efeito de efeito Cherenkov. Dessa forma, quando um raio cósmico numa velocidade maior que a da luz na água atravessa o tanque, é emitido um sinal luminoso, que é coletado e amplificado pelas fotomultiplicadoras. E então é possível fazer a análise de dados.

Como cada chuveiro atmosférico extenso gera muitas partículas filhas durante todo seu percurso na atmosfera, é possível que mais de uma dessas partículas sejam detectadas na superfície terrestre por mais de um dos 1600 detectores do Observatório Pierre Auger. Uma partícula mãe de energia na ordem de 10<sup>20</sup> eV, pode gerar partículas filhas que chegam na atmosfera terrestre em uma área de até 16 km<sup>2</sup>[36], permitindo triangular a direção de chegada desse chuveiro atmosférico e outras informações, como energia de chegada da partícula mãe.

Esses detectores funcionam dia e noite sem parar, pois trata-se apenas de um tanque fechado com água purificada (Figura 7.5). Já o outro método de detecção, por fluorescência, funciona apenas de noite, pois os telescópios são muito sensíveis e podem ser danificados por outros sinais indesejados.

#### pt0pt

Durante a interação dos raios cósmicos com a atmosfera, algumas das partículas geradas são partículas de luz, os fótons. Em noites de tempo aberto e sem luz da Lua, os detectores de fluorescência são ativados para observar essa luz gerada. Os dados desses telescópios ajudam a determinar a direção de chegada dos raios cósmicos e que tipo de partícula gerou o chuveiro atmosférico.



Figura 7.5: Tanque de detecção Cherenkov Fonte: Pierre Auger Observatory, disponível em: https://www.flickr.com/ photos/134252569@N07/19471252083/ in/album-72157656013297308/

## Bibliografia

Aqui estão as citações em ordem de apresentação.

- [1] S.B. "Monteiro e Emília Carvalho Leitão" Biato. «"Uma avaliação crítica acerca de método e suas noções"». Em: *"Revista de Educação Pública, Cuiabá"* 17.34 (2008), pp. 255–271 (ver p. 1).
- [2] David Velanes. «"A crítica de Gaston Bachelard ao método cartesiano: o cartesianismo como um obstáculo epistemológico?"» Em: "Revista Seara Filosófica" 14.14 (set. de 2017), pp. 1–19. URL: https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/searafilosofica/article/view/10782 (ver p. 4).
- [3] G. Bachelard. "O novo espírito científico". Saber da filosofia. Edições 70, 1990 (ver p. 4).
- [4] K.R. Popper. "A lógica da pesquisa científica". Cultrix, 2004. URL: https://books.google.com.br/ books?id=MbGLmeMU3pMC (ver p. 5).
- [5] T.S. Kuhn. "A estrutura das revoluções científicas". "Coleção Debates". Perspectiva, 1997. URL: https://books.google.com.br/books?id=NgrsSQAACAAJ (ver p. 5).
- [6] Jennifer Cartier, John Rudolph e Jim Stewart. The Nature and Structure of Scientific Models. Working Paper. Rel. téc. NCISLA, Wisconsin Center for Education Research, 2001. URL: http://files.eric. ed.gov/fulltext/ED461513.pdf (ver p. 6).
- [7] Science Learning Hub Pokapū Akoranga Pūtaiao. *Scientific modelling*. Nov. de 2018. URL: https://www.sciencelearn.org.nz/resources/575-scientific-modelling (ver p. 7).
- [8] Eite Tiesinga et al. «The 2018 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants». Em: *Rev. Mod. Phys.* 93 (2 jun. de 2021), p. 025010. DOI: 10.1103/RevModPhys.93.025010. URL: https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.93.025010 (ver p. 15).
- [9] Eric Mazur et al. Principles & practice of physics. Pearson, 2015 (ver pp. 20, 21).
- [10] R Resnick, D Halliday e J WALKER. "Fundamentos de Física Mecânica". Vol. 1. 1991 (ver p. 20).
- [11] David Halliday, Robert Resnick e Jearl Walker. *"Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas E Termodi*nâmica. Vol. 2 ." Grupo Gen-LTC, 2000 (ver p. 21).
- [12] David Halliday, Robert Resnick e Jearl Walker. «"Fundamentos de Física, vol. 4: óptica e física moderna"». Em: "Livros Técnicos e Cieníficos Editora" (2009), p. 25 (ver pp. 21, 30, 31, 35–37).
- [13] Ciência Todo Dia. "O Átomo de Bohr Explicado". Youtube. 2020. URL: https://www.youtube.com/ watch?v=\_GPrqg-NzCg (ver pp. 23, 26).
- [14] Wolfgang Bauer, Gary D Westfall e Helio Dias. "Física para universitários: óptica e física moderna". Bookman Editora, 2013 (ver pp. 23, 31, 33, 34, 36, 45).
- [15] John C Kotz e Paul M Treichel Jr. *"Química geral e reações químicas"*. Pioneira Thomson Learning, 2005 (ver p. 24).
- [16] Structure of atom: Discovery of electrons, protons and neutrons. Ago. de 2020 (ver p. 24).
- [17] Rutherford model. Ago. de 2020. URL: https://www.britannica.com/science/Rutherford-model (ver p. 24).
- [18] Henrique E Toma. *"Estrutura atômica, ligações e estereoquímica"*. Vol. 1. Editora Blucher, 2017 (ver pp. 24, 35, 36).
- [19] Ira N. Levine. *Physical Chemistry*. The McGraw-Hill Companies, 2009 (ver pp. 26, 41).
- [20] Rollie J Myers e Bruce M Mahan. "Química: um curso universitário". Editora Blucher, 1995 (ver p. 27).

- [21] NobelPrize.org. Niels Bohr Photo gallery. Jan. de 2021. URL: https://www.nobelprize.org/prizes/ physics/1922/bohr/photo-gallery/ (ver pp. 31, 50).
- [22] Fermilab. The Standard Model. Youtube. 2012. URL: https://www.youtube.com/watch?v=XYcw8nV\_ GTs (ver p. 52).
- [23] Marco Antonio" "Moreira. «"O Modelo Padrão da Física de Partículas"». Em: "Revista Brasileira de Ensino de Física" 31.1 (2009), p. 11. URL: https://doi.org/10.1590/S1806-11172009000100006 (ver p. 52).
- [24] Marco Antonio Moreira. «"Partículas e Interações"». Em: *"Física na Escola"* 5.2 (2004), p. 5. URL: http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num2/v5n1a03.pdf (ver p. 52).
- [25] Kurzgesagt In a Nutshell. "What is something?" Youtube. 2015. URL: https://www.youtube.com/ watch?v=X9otDixAtFw (ver p. 54).
- [26] Luiz C. M. da Silva, Wilma Machado Soares Santos e Penha Maria Cardoso Dias. «"A carga específica do elétron: um enfoque histórico e experimental"». Em: "*Revista Brasileira de Ensino de Física*" 33 (mar. de 2011), pp. 01–07. DOI: 10.1590/S1806-11172011000100023 (ver pp. 55, 56).
- [27] J. J Thomson. Em: The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 44.269 (1897), pp. 293–316. DOI: 10.1080/14786449708621070. URL: https://doi.org/10.1080/ 14786449708621070 (ver p. 56).
- [28] Mansoor Niaz. «The oil drop experiment: A rational reconstruction of the Millikan–Ehrenhaft controversy and its implications for chemistry textbooks». Em: *Journal of Research in Science Teaching* 37.5 (2000), pp. 480–508. DOI: https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(200005)37:5<480:: AID-TEA6>3.0.C0;2-X. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI% 291098-2736%28200005%2937%3A5%3C480%3A%3AAID-TEA6%3E3.0.C0%3B2-X (ver p. 57).
- [29] P. Atkins, L. Jones e L. Laverman. "Princípios de Química 7.ed.: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente". Bookman Editora, 2018. URL: https://books.google.com.br/books?id=%5C\_ 05yDwAAQBAJ (ver p. 58).
- [30] A. C. Fauth et al. «"Demonstração experimental da dilatação do tempo e da contração do espaço dos múons da radiação cósmica"». Em: "*Revista Brasileira de Ensino de Física*" 29.4 (2008), pp. 585–591. URL: https://doi.org/10.1590/S1806-11172007000400017 (ver p. 59).
- [31] Bernard Schutz. *A First Course in General Relativity*. 2<sup>a</sup> ed. Cambridge University Press, 2009 (ver pp. 59, 60).
- [32] Cassio Leite Vieira. "Raios Cósmicos: Energias Extremas no Universo". Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2004. URL: http://www.cbpf.br/~desafios/media/livro/Raios\_cosmicos.pdf (ver pp. 61, 75).
- [33] Cassio Leite Vieira. "César Lattes : Arrastado pela História". "Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas", 2019. URL: https://www2.cbpf.br/pt-br/livros/cesar-lattes-arrastado-pela-historia (ver p. 61).
- [34] Ana Rita Ribeiro et al. «Luz: História, Natureza e Aplicações». Em: Gazeta da Física 39 (2016), pp. 6– 13. URL: https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119 (ver pp. 61, 62).
- [35] Maria Cristina Batoni Abdalla; ilustração de Sergio Kon. "O discreto charme das partículas elementares".
  2.ed. serie. "São Paulo": Editora Livraria da Física, 2016 (ver p. 66).
- [36] Pierre Auger Observatory. A Detector Thirty Times the Size of Paris. Mai. de 2021. URL: https: //www.auger.org/index.php/cosmic-rays/detection (ver pp. 76, 77).