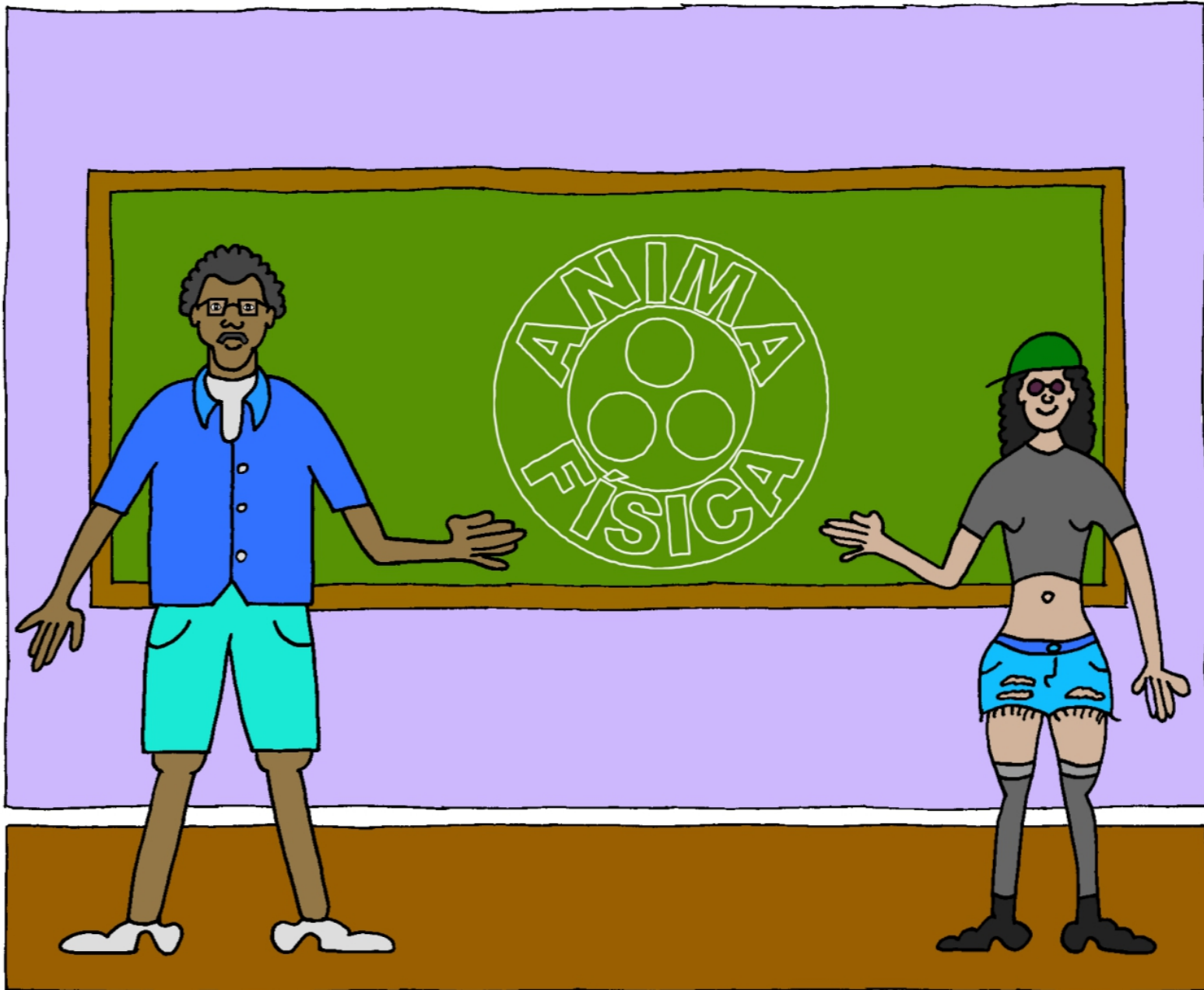


PROJETO ANIMAFÍSICA



PAGINA PARA FICHA CATALOGRÁFICA

O curioso mundo das partículas elementares

O curioso mundo das partículas elementares

Projeto AnimaFísica

Março 2026

Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Física "Gleb Wataghin"

O curioso mundo das partículas elementares

Creative Commons Licence

© ⓘ ⓘ 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/>

Prefácio

Hoje, talvez mais do que nunca, a Divulgação e a Popularização da Ciência são atividades imprescindíveis. São ações para reagir a posicionamentos anti-científicos de setores da sociedade que têm conquistado espaços importantes na organização política do mundo, inclusive no Brasil. Assistimos perplexos ao crescimento de movimentos que pregam o terraplanismo, a contestação do uso de vacinas, o uso de medicamentos sem eficácia comprovada, a desmoralização das universidades, entre tantos outros ataques ao saber científico. A Divulgação e a Popularização da Ciência, mostrando os seus métodos, conquistas e contradições, podem trazer para a população em geral o empoderamento deste corpo de conhecimentos que é, em última instância, um patrimônio comum de toda a humanidade.

Neste contexto desafiador, algumas agências de fomento à pesquisa científica têm atrelado o financiamento de projetos científicos a programas de divulgação científica. Tais programas se revestem de maior relevância quando as pesquisas científicas são financiadas com recursos públicos, uma vez que cumprem também o papel de prestar à sociedade contas do uso destes recursos. É o caso da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) que patrocinou o ANIMAFÍSICA, Projeto de Divulgação e Popularização da Ciência conduzido por uma equipe de professores, alunos e animadores, no qual se insere este e-book.

O ANIMAFÍSICA explora uma maneira criativa de promover a Divulgação e Popularização da Ciência através da produção de curta-metragens animados e material didático que aprofunda os temas abordados nas animações. Num primeiro momento, todo este material tem abordado conceitos científicos relacionados à Física das Partículas Elementares e dos Campos e pode ser acessado no site do projeto: www.animafisica.com.br. Estamos abertos e procurando parcerias para explorar outros temas da Física, bem como de outras áreas do conhecimento científico.

Sob a minha coordenação, estabeleceu-se uma parceria entre docentes, estudantes de graduação e pós-graduação do Instituto de Física Gleb Wataghin e do Laboratório de Estudos Avançados em Jornalismo, o LabJor, da UNICAMP, com o Núcleo de Cinema de Animação de Campinas visando a produção e disseminação do projeto ANIMAFÍSICA. Cabe destacar que, com seus mais de 40 anos de experiência na área de animação, o Núcleo, sob a coordenação do Sr. Maurício Squarisi e do Prof. Wilson Lazaretti, docente do Instituto de Artes da UNICAMP, é um dos mais antigos e experientes grupos dedicados à produção de animação do Brasil, com grande reconhecimento internacional. O presente e-book objetiva, principalmente, apresentar a visão atual do Modelo Atômico oferecida pelo Modelo Padrão da Física das Partículas Elementares a estudantes do final

do Ensino Fundamental II e do Ensino Médio através de uma linguagem simples e jovem. Juntamente com os curtas animados e os vídeos de apoio ao aprendizado, ele atualiza o Modelo Atômico ensinado nas escolas brasileiras que se encontra ultrapassado desde, pelo menos, a década de 1970, quando foram observados experimentalmente os primeiros quarks, constituintes dos prótons e nêutrons formadores do núcleo atômico, evidenciando as previsões do Modelo Padrão da Física das Partículas Elementares. Alguma ênfase é destinada aos “Raios Cósmicos”, um assunto pioneiro da investigação científica no Brasil que contou com a participação destacada de cientistas como Gleb Wataghin e César Lattes, talvez o nosso cientista mais conhecido, e as gerações seguintes de cientistas brasileiros.

O Projeto Animafísica é resultado de um trabalho de equipe e nunca seria realizado sem a colaboração, entrosamento e a paixão dedicada de todos os seus membros. Nossa equipe é composta por dois grandes grupos. O primeiro congrega professores e alunos da UNICAMP. O segundo é o próprio Núcleo de Animação de Campinas e seus colaboradores.

Na equipe da UNICAMP destacam-se o Prof. Orlando Peres, Dayane Machado, Diego Simões, Eduardo Sato, Eduardo Walter, Flora Arruda, Lucas Trentin, Matheus Rennó, Nicole Garcia e Willian Gabriel. Pelo lado do Núcleo de Animação de Campinas, temos profissionais em produção de animações: Maurício Squarisi, coordenador do Núcleo, Prof. Wilson A. Lazaretti, professor do Instituto de Artes da UNICAMP e Andrea Alves, jornalista responsável pela assessoria de imprensa. A toda esta equipe incrível, meus mais entusiasmados agradecimentos.

Todo o material didático produzido pelo Projeto ANIMAFÍSICA pode ser encontrado no site animafisica.com.br.

Bom proveito!

Marcelo M. Guzzo
Coordenador do Projeto ANIMAFÍSICA
Professor do Instituto de Física Gleb Wataghin - UNICAMP

Índice

Índice	v
1 Método Científico	1
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
2 Movimento Browniano: Contactando o mundo macroscópico com o microscópico	9
2.1 Introdução	9
2.2 O andar do bêbado	10
2.3 Visão macroscópica: A lei de Stokes	12
2.4 Visão microscópica: Termodinâmica	13
2.5 A conexão de dois mundos: Constante de Avogadro	14
2.6 Redefinição do número de Avogadro: Sistema internacional de unidades	15
3 Estrutura Atômica	17
3.1 Núcleo atômico de Rutherford	17
3.2 Modelo de Bohr	19
3.2.1 Introdução Histórica	19
3.2.2 Movimento dos elétrons ao redor do núcleo	19
3.2.3 O núcleo do átomo	23
3.2.4 Átomos Hidrogenoides	25
3.2.5 Níveis de Energia	25
3.2.6 Entrada e Saída de Energia	26
3.2.7 Proporções	28
3.2.8 Os postulados de Bohr	28
3.2.9 Imprecisões no Modelo de Bohr: Bohr estava errado?	29
3.3 Modelo Atual do Átomo	29
3.3.1 O Princípio da Incerteza de Heisenberg	30
3.3.2 Nuvens eletrônicas	32
3.3.3 Conclusão	33
4 Modelo Padrão de Partículas Elementares: A melhor das teorias científicas	35
5 Partículas elementares	39
5.1 O elétron (1897)	39
5.1.1 Experimento das gotas de Millikan: Determinação da carga do elétron (1911)	40
5.2 O múon	42
5.2.1 O Espaço e o Tempo alterados	44
5.2.2 A descoberta do Múon e o Méson Pi	45
5.3 O Fóton	46
5.4 Quarks e glúons	48
5.4.1 Hádrons	49
5.4.2 De volta aos quarks	50
5.5 Os Glúons (1973)	51
5.6 Bósons W e Z	52

5.7	Os neutrinos	54
5.8	Bóson de Higgs	56
6	Interações Fundamentais	59
7	Raios Cósmicos	61
7.1	Início das pesquisas em Raios Cósmicos	61
7.2	Chuveiros Atmosféricos	61
7.3	Detecção	62
	Bibliografia	65

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 faz o método científico ser 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 ser 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 e veremos alguns nesse capítulo, sobretudo, Karl Popper e Thomas Kuhn, devido às suas importantes contribuições.

Dois filósofos importantes para o surgimento do método científico moderno são 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 sim que devemos nos apoiar também em dados empíricos obtidos através dos sentidos. Ou seja, um dado conhecimento deve ter coerência lógica e experimental [1].

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:

1. nunca assumir como verdade algo que não tenha evidências;
2. dividir o problema em várias partes menores;
3. conduzir o raciocínio começando pelas partes mais simples e ir 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”.

Assim vemos surgindo o método científico como muitas vezes aprendemos na escola, baseado em algumas etapas, sendo elas: observação de um fenômeno, elaboração do problemas, formulação de hipóteses, experimentação, análise dos resultados e conclusão (figura 1.3). Porém, tivemos diversas contribuições de outros pensadores ao modelo cartesiano. Desse modo, apesar da grande importância das ideias de Bacon e Descartes para suas bases, o método científico, hoje, não é visto como essa “receita de bolo” que será descrita a seguir.

Mas o que deve ser feito em cada uma dessas etapas? A fase de observação é aquela em que definimos o que será estudado: quais aspectos nos interessam, como e por que o fenômeno ocorre, e quais são suas origens.

1.1 Introdução	1
1.2 Críticas ao método cartesi- ano	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, 1º Visconde de Alban (1561-1626).
Fonte: artista desconhecido, Wikimedia Commons



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

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: 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 o raciocínio lógico e conhecimentos prévios para tentar solucionar o problema. Para isso, utilizamos 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, qual pergunta tentaremos responder e qual é 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 terá validade como explicação para o nosso objeto de estudo.

Feito o experimento com a coleta de dados, estes são analisados de forma crítica, considerando possíveis incertezas. Assim podemos verificar a validade ou não de nossa hipótese. Se ela mostrar-se falsa, devemos descartar a hipótese e voltar a pensar em outra forma de descrever tal fenômeno ou objeto. Caso nossas hipóteses sejam validadas pelos dados, publicamos o resultado para que outros cientistas possam reproduzir o experimento e, de fato, verificar sua veracidade.

Após diversos cientistas refazerem nosso experimento, se a hipótese de fato for correta, ela passa a integrar o conhecimento teórico acerca daquele fenômeno ou objeto. Esse processo pode ser um tanto quanto demorado por diversos motivos, tais como possíveis resistências e discordâncias da comunidade científica. Com esse novo conhecimento, temos uma nova visão sobre o fenômeno estudado, permitindo-nos revisar os conhecimentos anteriores para ver se nada passou despercebido e, até mesmo, servir de ferramenta para subirmos para o próximo degrau de conhecimento, pois lembre-se: na formulação do problema, escolhemos apenas uma pequena parte para atacarmos.

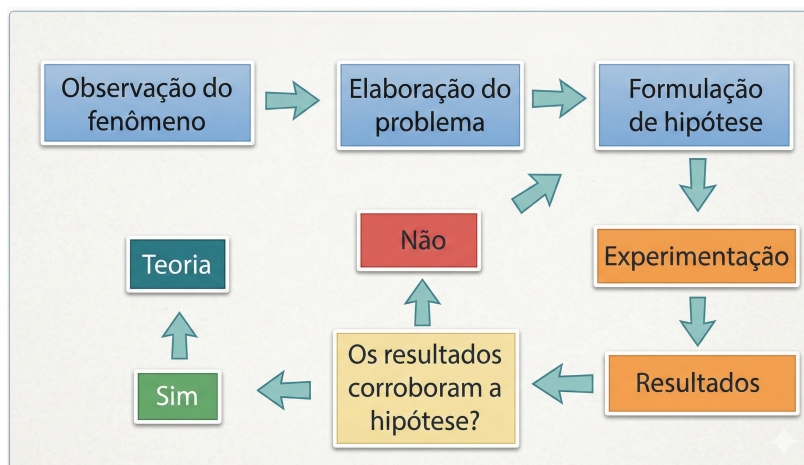


Figura 1.3: Esquema ilustrativo do método científico cartesiano.

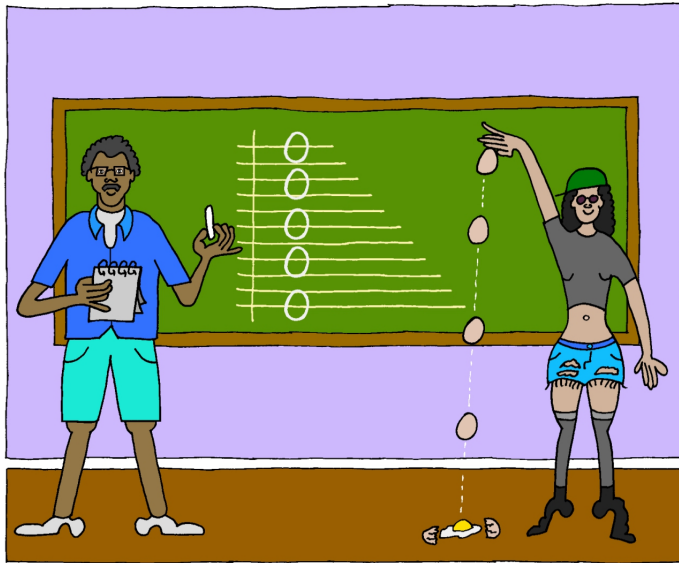


Figura 1.4: Observar um fenômeno e documentá-lo de forma rigorosa é essencial para estudá-lo.

Conhecendo o método, como sua ferramenta de autocorreção o torna tão potente? Quando enviamos os nossos resultados para serem publicados, eles serão revisados por outros cientistas, para verificar possíveis erros experimentais ou de análise. Caso seja publicado, outros cientistas irão refazer o experimento, para verificar 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, como apresentado na introdução desse capítulo pode parecer um tanto algorítmico, ou seja, uma sequência de passos que, ao seguirmos a risca, nos trará sempre 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, além de observações de outras estrelas e objetos cósmicos no universo.

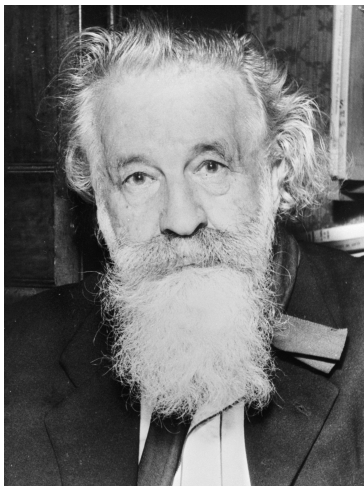


Figura 1.5: Gaston Bachelard (1884-1962).
Fonte: [Nationaal Archief](#)

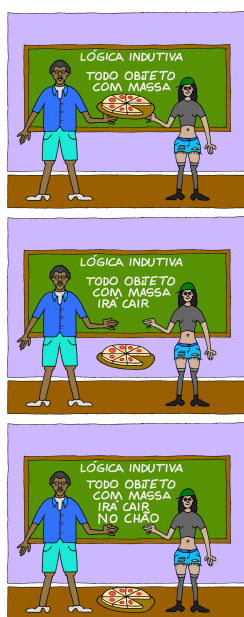


Figura 1.6: Figura esquemática da lógica indutiva, onde a partir de uma observação, propomos um enunciado singular e induzimos um enunciado universal. Exemplo: ao soltarmos um objeto de uma certa altura, vemos que ele cai no chão. Então, nossa hipótese singular é que objetos com massa caem no chão se soltados em queda livre. A partir disso, podemos induzir que todo objeto com massa irá cair no chão.

Além disso, o método cartesiano pode não ser um bom método para ser aplicado às ciências humanas, que exigem metodologias diferentes se 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 o 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, isto é, descrevem fenômenos iguais de maneiras distintas, mas de uma forma consistente e equivalente. A mecânica quântica traz a ideia de uma natureza probabilística e que existe uma incerteza natural relacionada à observação de fenômenos de nível microscópico (ver seção 3.3).

Uma das críticas feitas ao método cartesiano é a do filósofo francês Gaston Bachelard (figura 1.5). 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† [2]. Uma análise complexa do fenômeno como um todo é essencial para entendermos as relações das partes entre si e com o todo.

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 momentos e objetivos relacionados a evolução temporal do pensamento científico 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 explicá-la (figura 1.6). Porém esse método traz alguns problemas, como o problema da indução.

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 cisnes de cor branca. 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 1.7), um filósofo austríaco, foi um dos pensadores a atacar esse problema. Para resolvê-lo, ele propõe uma lógica hipotético-dedutiva e a ideia de falseabilidade (ou refutabilidade).

Falseabilidade diz-se sobre a possibilidade de elaborar experimentos que mostrem que uma hipótese é falsa. Voltando ao exemplo dos cisnes, a hipótese “todos os cisnes são brancos” é falseável, pois basta encontrar um cisne de outra cor e ela será descartada. Note que é mais fácil provar

* Reduzimos o problema em pequenos pedaços a serem estudados separadamente.

† A ideia de método indutivo será explicada mais a frente na seção 1.3. Olhar também o esquema 1.6.

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, ela deve ser descartada ou reformulada.

Então, no método hipotético-dedutivo, ao observarmos um problema, propomos uma hipótese, da qual 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 filósofo importante que pensou sobre o método científico foi Thomas Kuhn (figura 1.8), que descreve em seu livro “A estrutura das Revoluções Científicas”[‡] a construção do saber não como um acúmulo de conhecimento, mas como revoluções científicas, em que há a substituição de um paradigma científico por outro.

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].

Kuhn vai chamar de “ciência normal” a pesquisa baseada no conhecimento científico já estabelecido. A partir de uma teoria, buscam-se resolver “quebra-cabeças”, isto é, responder perguntas sem propor novos conceitos, apenas encaixando as peças da teoria atual, 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 assim surgem novos paradigmas que competem entre si para, finalmente, estabelecer-se um 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 1.9) e efeitos como a dilatação temporal. Então, após sua crise, a Mecânica Newtoniana é substituída pela Mecânica Relativística.

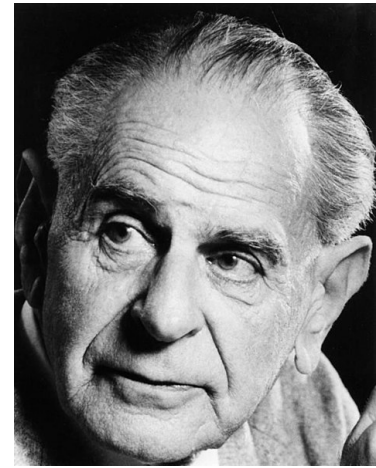


Figura 1.7: Karl Popper (1902-1994).
Fonte: LSE Library

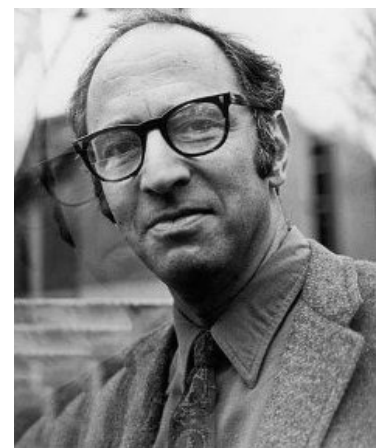


Figura 1.8: Thomas Kuhn (1922-1996).
Fonte: Bill Pierce, Wikimedia Commons

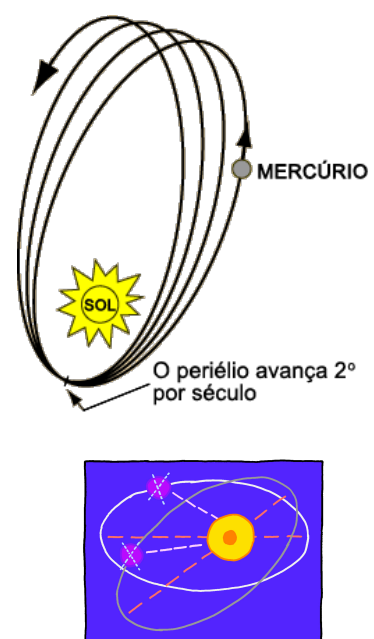


Figura 1.9: Precessão do periélio de Mercúrio: a Mecânica Newtoniana prevê que o periélio (ponto mais próximo do Sol) da órbita de um planeta é alterado com o tempo; porém havia uma diferença entre o valor esperado e o valor medido para a órbita de Mercúrio, que só foi solucionada com a Mecânica Relativística.

[‡] Em inglês “The Structure of Scientific Revolutions”.

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 pode levar a representações diversas sobre o fenômeno, através de equações matemáticas, versões do objeto de estudo em escalas diferentes e esquemas, de modo a facilitar a compreensão e comunicação do modelo. Tomemos um próton (ver seção 3.2) por exemplo. Sabemos que ele é formado por três quarks (ver seção 5.6), que interagem entre si através da interação nuclear forte. Com isso, conseguimos montar uma representação gráfica (figura 1.10) que facilita nosso entendimento e comunicação do que é um próton.



Figura 1.10: Modelo do próton.

Um bom modelo científico deve ser oferecer condições de falseamento de suas hipóteses, 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 uma região. Através dele, é possível prever a quantidade de peixes 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 nessa região, de forma sustentável, com a finalidade de evitar o consumo excessivo que pode causar a extinção dos mesmos. Em alguns casos, em que 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, os modelos estão sendo constantemente testados. Hoje, podemos ter vários modelos que tentam explicar o mesmo fenômeno e, a qualquer momento, novos dados podem surgir de modo a descartar vários deles, sobrando assim 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

Algo 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)?

Isto não é diferente para a hipótese atômica (capítulo 3), isto é, a ideia de que a matéria é constituída de pequenas estruturas 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 conectou o mundo macroscópico ao microscópico.

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

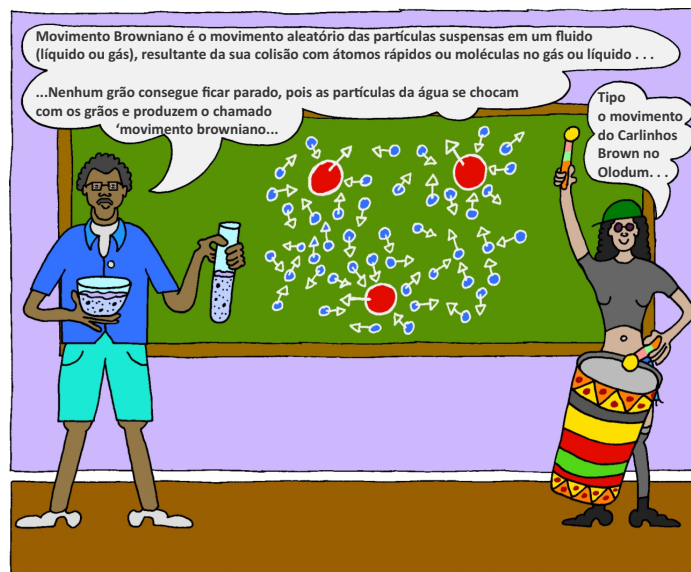
Considerando que ele estudava material biológico, seria plausível atribuir este movimento ao fato das partículas estarem “vivas”. Porém, o próprio Brown descartou esta hipótese ao observar o mesmo efeito em partículas de poeira, vindas de material inorgânico.

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 sendo causado por pequenas colisões das partículas presentes na água com o grão de pólen.

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

2.1 Introdução	9
2.2 O andar do bêbado	10
2.3 Visão macroscópica: A lei de Stokes	12
2.4 Visão microscópica: Termodinâmica	13
2.5 A conexão de dois mundos: Constante de Avogadro . .	14
2.6 Redefinição do número de Avogadro: Sistema internacional de unidades	15

Figura 2.1: O movimento aleatório é causado pelo choque dos grãos de pólen com as partículas presentes na água.



2.2 O andar do bêbado

O movimento do grão de pólen é visto como aleatório. Como descrever isto 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, isto é, as direções são equiprováveis.

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

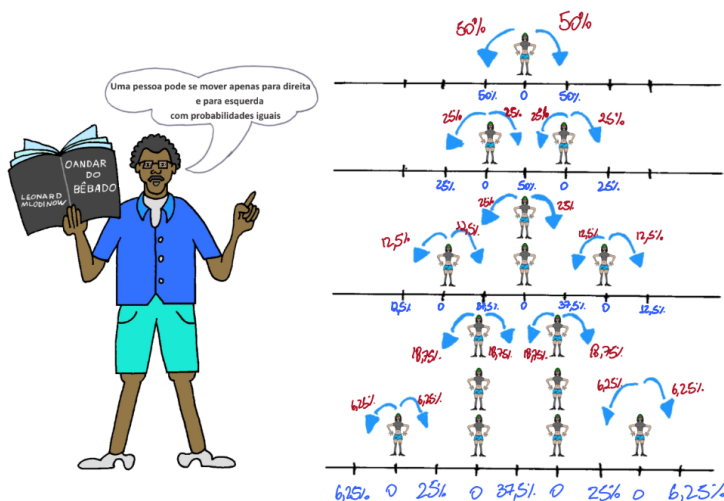


Figura 2.2: Probabilidade do bêbado estar em um lugar no próximo passo até o quarto passo.

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, esquerda-esquerda, direita-esquerda e esquerda-direita. Note que em duas das

possibilidades ele está de volta na 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 2.2 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 para dois passos à direita.

Considerando esta simetria, um fato importante surge: Se usarmos a média da posição para descrever este movimento, sempre vamos ter este valor igual a zero, independente do número de passos! Assim, a média sozinha não consegue descrever um movimento aleatório. Aqui é relevante notar que colocamos a origem do nosso sistema de coordenadas na posição inicial, de forma que consideramos valores positivos para movimentos para a direita e negativos para a esquerda.

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 a posição inicial, apesar de perdermos a noção do sentido do movimento.

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

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

Calculando o valor de $\langle x^2 \rangle$ até o passo 3, usando os valores da figura 2.2, temos:

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

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

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

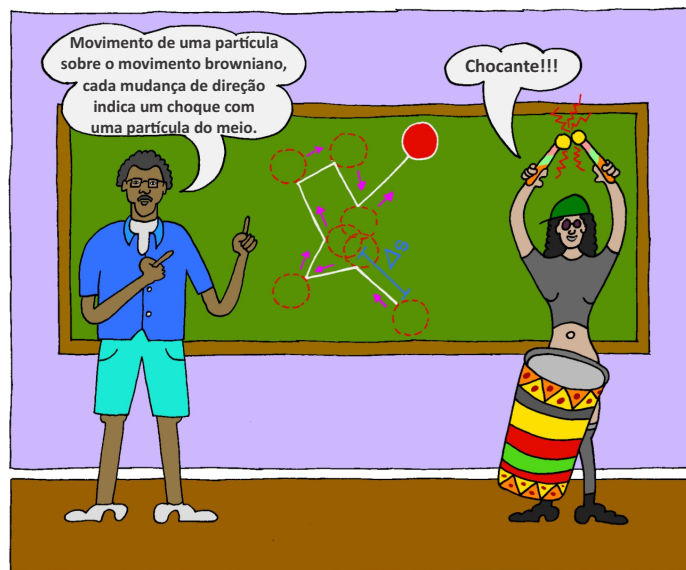
$$\langle x^2 \rangle = N. \quad (2.2)$$

Uma coisa importante a se considerar é que assumimos que o tamanho do passo do bêbado é igual a 1, em alguma unidade arbitrária. Caso o tamanho deste passo seja Δs , a fórmula acima precisa ser corrigida:

$$\langle x^2 \rangle = N(\Delta s)^2. \quad (2.3)$$

Note que este será o caso quando consideramos o movimento de uma partícula de pólen. Na realidade, os passos não terão o mesmo tamanho. Consideraremos o chamado “livre caminho médio”, que é a distância

Figura 2.3: Representação do movimento Browniano. As linhas brancas representam a trajetória da partícula. O livre caminho médio é o quanto a partícula se desloca, em média, até ser desviada devido a colisão com um átomo da substância em que está suspensa.



percorrida, em média, pela partícula antes de colidir com um átomo e mudar de direção.

Outro fato importante é que o número de passos N não é algo que possamos medir em um experimento. Para saber o seu valor, dividimos o tempo (t) em que observamos o sistema pelo tempo médio entre colisões (Δt):

$$N = \frac{t}{\Delta t}. \quad (2.4)$$

Assim:

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

em que D é o chamado *coeficiente de difusão*, sendo $D \equiv \frac{(\Delta s)^2}{2\Delta t}$. O fator 2 na definição do coeficiente é uma convenção comum que adotaremos neste livro.

2.3 Visão macroscópica: A lei de Stokes

Agora que temos uma ideia do modelo matemático 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 descrito pela chamada lei de Stokes. Esta descreve uma força de arraste atuando sobre um corpo esférico ao se mover pelo fluido. A força de arraste (F) é dada pela seguinte expressão:

$$F = 6\pi\eta rv, \quad (2.6)$$

em que r e v são, respectivamente, o raio e a velocidade da esfera; η é a chamada viscosidade dinâmica do fluido.

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

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

em que m é a massa do grão, v_0 e a são, respectivamente, a sua velocidade inicial e sua aceleração. Na segunda passagem, relacionamos a segunda lei de Newton ($F = ma$) com a expressão 2.6.

Podemos agora calcular o valor médio da equação 2.7, considerando, como na seção anterior, que Δt é o tempo médio entre colisões. Para tanto, vamos considerar que como o movimento para qualquer direção é igualmente provável, a média das velocidades iniciais é nula ($\langle v_0 \rangle = 0$). Assim:

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

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

$$\Delta t = \frac{m}{3\pi\eta r} \quad (2.9)$$

Lembrando do coeficiente de difusão D definido na seção anterior pela equação 2.5:

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

Então podemos finalmente concluir que:

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

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. A grande hipótese usada nesta descrição é que o grão de pólen suspenso em água se comporta como uma partícula de um gás ideal, sendo seu movimento aleatório 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:

$$E = \frac{1}{2} n R T, \quad (2.12)$$

em que n é o número de mols do gás, R é constante universal 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 dada por:

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

sendo N o número total de moléculas, N_A o chamado número de Avogadro, que nos 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:

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

Note que conseguimos calcular a velocidade quadrática de livre caminho médio ($\langle v_0^2 \rangle$) de duas formas distintas. Vamos compará-las:

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

Assim podemos determinar o número de Avogadro:

$$N_A = \frac{RT}{6\pi\eta r D} \quad (2.16)$$

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 conhecidos e 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 Avogadro

Para entender quão importante foi a medida do número de Avogadro 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, este 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 a massa do hidrogênio.

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

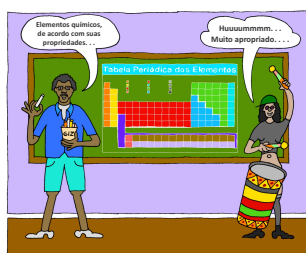


Figura 2.4: Tabela periódica dos elementos químicos.

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

Para as chamadas condições normais 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 (ou moléculas) neste 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 Avogadro 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 estes dois mundos que pareciam separados, estabelecendo a ponte entre o microscópico e o macroscópico.

2.6 Redefinição do número de Avogadro: 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 através de constantes físicas. Entre as unidades afetadas está o mol, que atualmente é definido pela constante de Avogadro.

Assim, pela definição atual, o número de Avogadro possui valor exato dado por [8]:

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

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 Avogadro 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.

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 cerca de 100 anos atrás, todo esse aparato tecnológico não estava disponível e, por exemplo, este 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 possuía uma origem muito humilde e ele era o quarto de doze filhos. Seu pai era um mecânico e agricultor e sua mãe era professora de uma escola infantil. Desde muito pequeno frequentou diversas bibliotecas na região de Spring Grove, o local em que nasceu, para conseguir aumentar o seu conhecimento através do próprio esforço. Ele tinha um sonho: sair da Nova Zelândia e ir à Universidade de Cambridge, uma das universidades 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. Esse, que surgiu na Grécia Antiga, ou seja, nos primórdios do pensamento filosófico ocidental. O homem começou a questionar a origem e composição de tudo que o cercava. Desde os elementos fundamentais até as coisas mais complexas, como as plantas, era motivo de observação dos gregos. Porém, 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 podem 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.

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 dividido”.*

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 (ver seção 5.1).

* Esta ideia não se manteve com o desenvolvimento dos conhecimentos científicos, visto que o átomo pode ser dividido através de fenômenos como decaimentos radioativos e fissões nucleares. O que chamamos hoje de partículas elementares, são partículas que aparentam ser indivisíveis e sem outras estruturas mais elementares que as formam. Caso a ciência descubra uma subestrutura, elas irão deixar de ser elementares, assim como aconteceu com os prótons e os nêutrons que falaremos adiante.

3.1 Núcleo atômico de Rutherford	17
3.2 Modelo de Bohr	19
3.2.1 Introdução Histórica	19
3.2.2 Movimento dos elétrons ao redor do núcleo	19
3.2.3 O núcleo do átomo	23
3.2.4 Átomos Hidrogenoides	25
3.2.5 Níveis de Energia	25
3.2.6 Entrada e Saída de Energia	26
3.2.7 Proporções	28
3.2.8 Os postulados de Bohr	28
3.2.9 Imprecisões no Modelo de Bohr: Bohr estava errado?	29
3.3 Modelo Atual do Átomo	29
3.3.1 O Princípio da Incerteza de Heisenberg	30
3.3.2 Nuvens eletrônicas	32
3.3.3 Conclusão	33

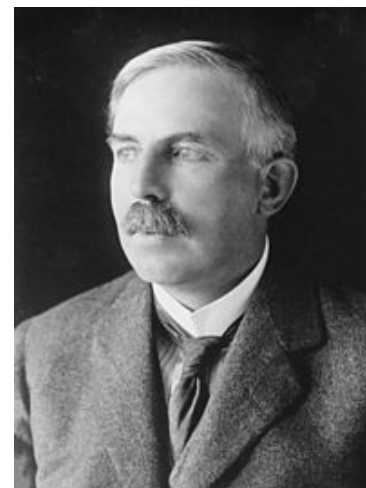


Figura 3.1: Ernest Rutherford.
Fonte: George Grantham Bain Collection (Library of Congress), Wikimedia Commons.

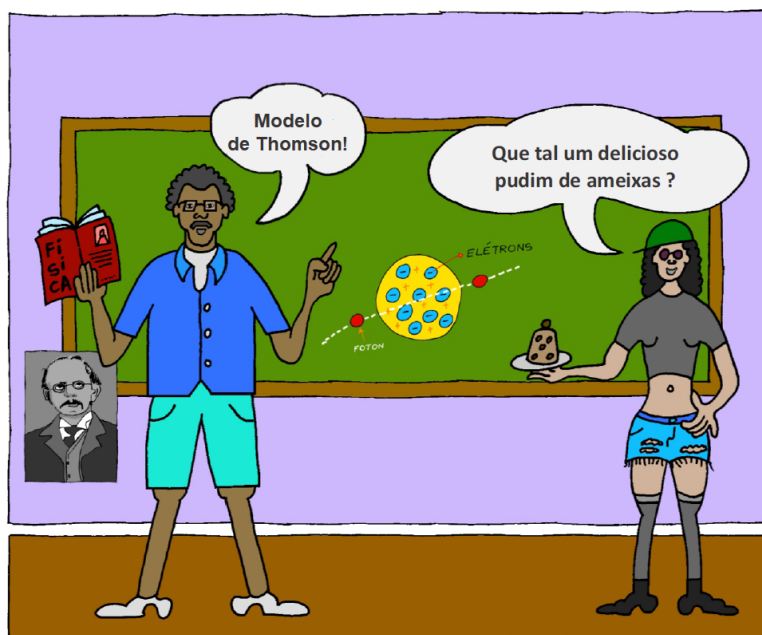


Figura 3.2: Modelo atômico de Thomson.



Figura 3.3: Hans Geiger.
Fonte: Autor desconhecido, Wikimedia Commons

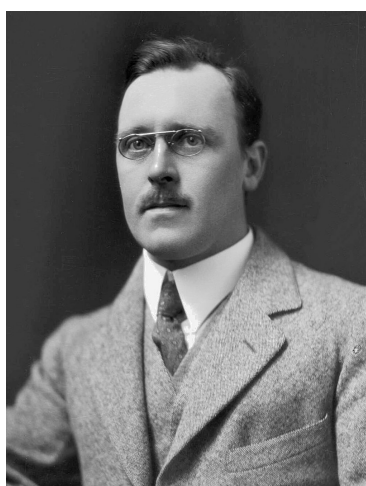


Figura 3.4: Ernest Marsden (1921).
Fonte: S P Andrew Ltd, Wikimedia Commons.

Depois desta breve contextualização é possível desenvolver as ideias por trás da descoberta de Rutherford. Ele colocou o modelo de Thomson à prova através de um experimento que causou uma revolução na maneira como os físicos entendiam a matéria e o átomo.

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 (partícula composta de dois nêutrons e dois prótons, isto é, um núcleo de um átomo de hélio que é emitido em algumas reações nucleares conhecidas como decaimentos 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 experimento consistiu em bombardear uma fina folha de ouro com partículas alfa, 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 dos 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, algumas poucas tinham pequenos ângulos de deflexão em relação a direção inicial do feixe e um número pequeno de partículas voltava 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 (fig. 3.5). 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 (ver capítulo 5)) orbitando ao seu redor, muito análogo a um sistema planetário orbitando uma estrela.

Realizando o mesmo experimento, porém com elementos mais leves que o ouro (por exemplo: nitrogênio), Rutherford observou que quando

ocorria colisão frontal, defletindo-as 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 (o núcleo do hidrogênio) como um constituinte do núcleo atômico.

Experimentos análogos ao de Geiger e Marsden são feitos até hoje nos aceleradores de partículas, mas atualmente temos a opção de colidirmos um feixe de partículas com partículas em movimento, isto é, outro feixe de partículas, para analisar os produtos da colisão, sendo a base para os atuais colisores de partículas.

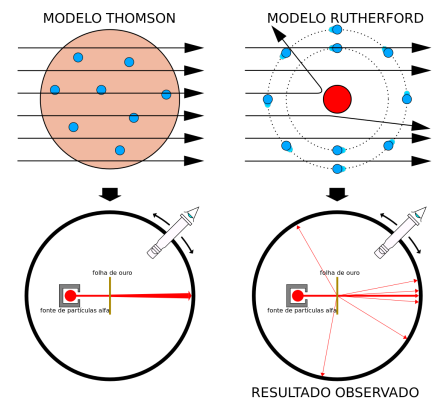
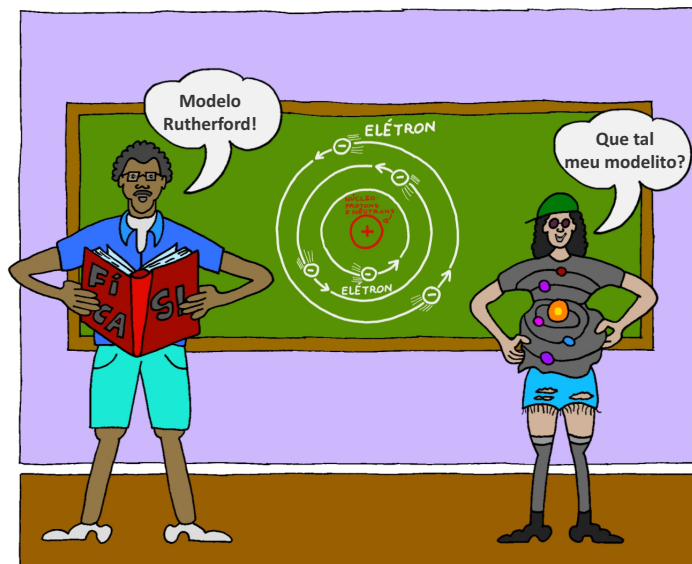


Figura 3.5: Segundo o Modelo de Thomson um feixe de partículas alfa ao ser colimado em direção a folha de ouro passaria reto sem nenhuma deflexão. O que foi observado experimentalmente e que serviu de base para a formulação do Modelo Atômico de Rutherford, foi que algumas partículas alfa eram defletidas em grandes ângulos, como se colidissem em pequenos núcleos sólidos.

Fonte: Kurzon, Wikimedia Commons.

Figura 3.6: Modelo atômico de Rutherford.

3.2 Modelo de Bohr

3.2.1 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 o que é este modelo, como ele revolucionou a Ciência do Século XX e quais são suas imprecisões que o torna incompleto.

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.

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, foi-se percebendo que a Física Clássica não era suficiente para estudar alguns fenômenos mais complexos - como fenômenos em escalas muito grande, a exemplo dos estudados pela *Astrofísica/Cosmologia*, e os fenômenos do mundo microscópico, como os estudados pela *Física de Partículas*.



Figura 3.7: Niels Bohr, físico.
Fonte: George Grantham Bain, Wikimedia Commons.

3.2.2 Movimento dos elétrons ao redor do núcleo

O modelo atômico de Bohr também é conhecido como Modelo Planetário do Átomo, 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 mostrado na figura 3.8.

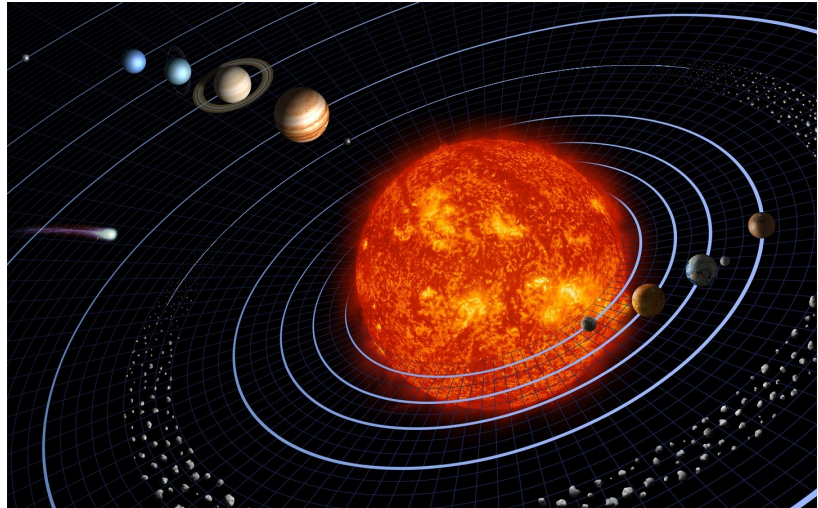


Figura 3.8: Imagem ilustrativa do sistema solar.
Fonte: Harman Smith and Laura Generosa, Wikimédia Commons.

Um aspecto interessante é 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 a se mover 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.

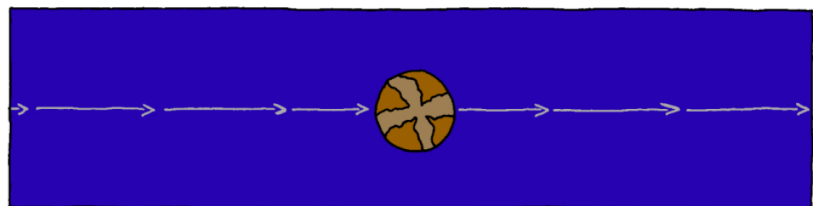


Figura 3.9: Planeta continua se movendo quando não há nenhuma força para impedi-lo.

A força que mantém o planeta em órbita é a força de atração gravitacional do Sol. Ela atua como a força resultante centrípeta, mudando assim a direção da velocidade do planeta. Não fosse por ela, o planeta escaparia em linha reta. 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].

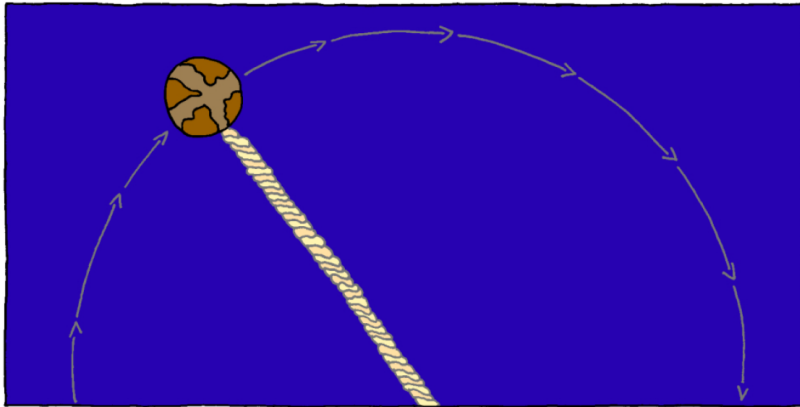


Figura 3.10: A direção da velocidade do planeta muda por conta da força exercida pelo Sol. Nesta figura, usamos uma analogia como se o planeta estivesse amarrado por uma corda. A tensão da corda faz o papel da força gravitacional.

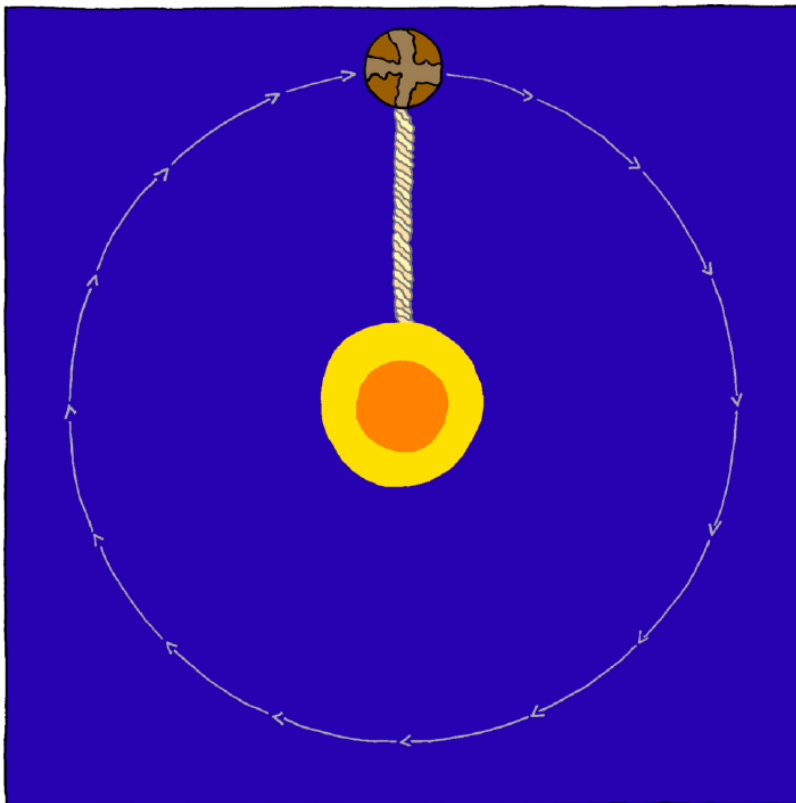


Figura 3.11: Planeta fica em órbita. Novamente estamos usando uma analogia com a tensão de uma corda em um movimento circular.

Analogamente, no modelo de Bohr, há um **núcleo Atômico** e, ao redor dele, pequenas partículas chamadas de **elétrons** ficam se movimentando em órbitas circulares [12], como na figura 3.12.

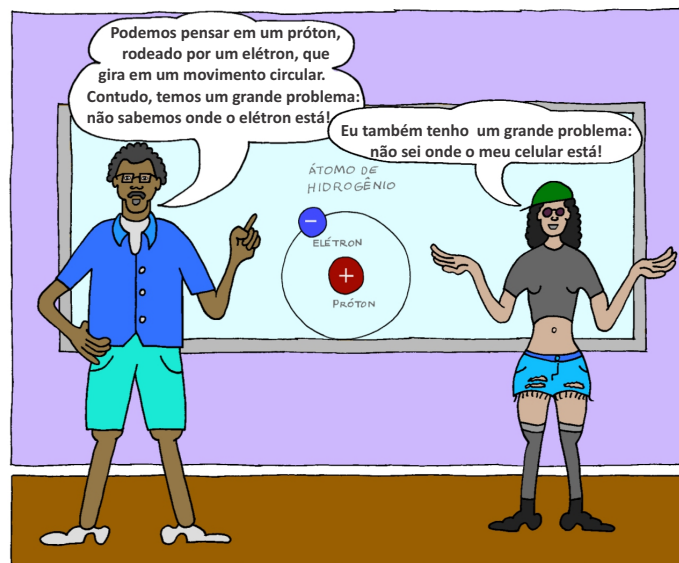


Figura 3.12: Imagem ilustrativa do modelo de Bohr, onde vemos um átomo de hidrogênio. Podemos pensar nele como um próton no centro rodeado por um elétron que gira em um movimento circular.

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 poderiam se manter estáveis nestas órbitas. Explicarei 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.

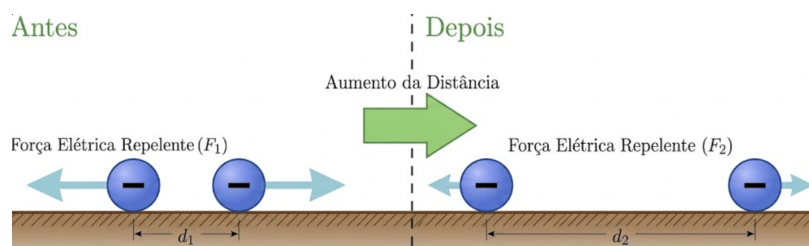


Figura 3.13: Representação do afastamento de dois objetos de cargas iguais pela ação da Força Elétrica.

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

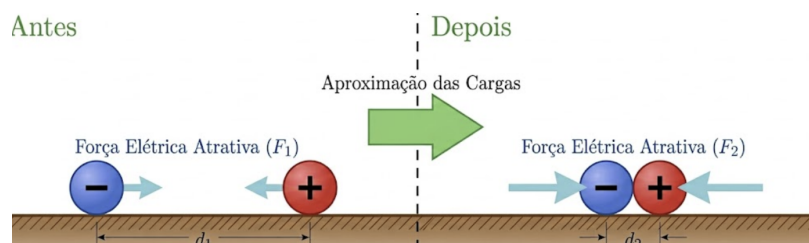


Figura 3.14: Representação da aproximação de dois objetos de cargas opostas pela ação da Força Elétrica.

Desta forma, se os elétrons estivessem parados no átomo, 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 figura 3.15:

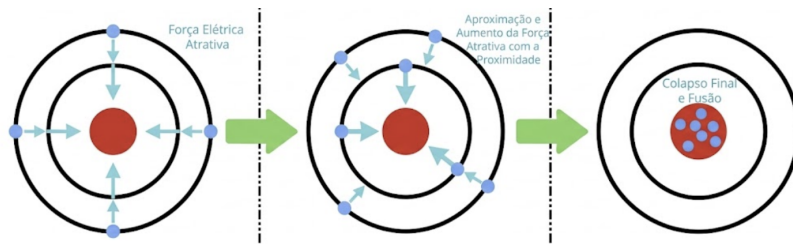


Figura 3.15: O que aconteceria se os elétrons estivessem parados ao redor do núcleo.

No outro caso, se os elétrons estivessem em movimento, existe 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 tem carga elétrica e está alterando a direção da sua velocidade, ele irá perder energia e, por consequência, diminuir sua velocidade aos poucos se aproximando do núcleo até se chocar com ele (ver figura 3.16). [13, 14]

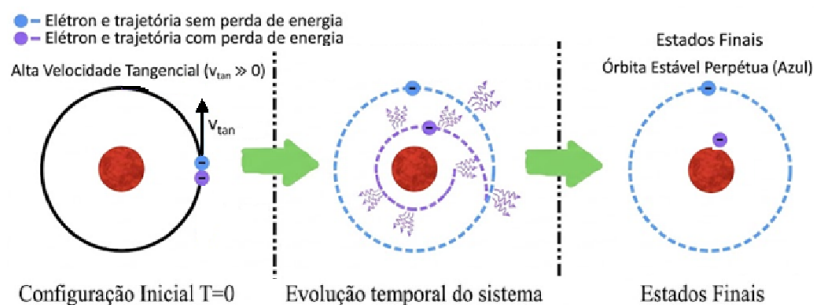


Figura 3.16: Um elétron clássico perderia energia devido a emissão de radiação ao ser acelerado. Porém, Bohr postula que existem órbitas estáveis onde isto não acontece e o elétron pode manter trajetórias elípticas.

A solução de Bohr para esse problema foi bem ousada. Bohr 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)[†]. Este é 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. Bohr propôs que, em órbitas específicas ao redor do núcleo, os elétrons não obedecem à previsão clássica de que cargas aceleradas devem irradiar energia. Nessas órbitas o elétron mantém sua energia constante. Este foi um postulado um tanto quanto misterioso na época. Apenas uma década depois, a ideia de dualidade onda-partícula, proposta por Louis de Broglie, traria uma imagem intuitiva para este postulado [15] e veremos sobre em 3.3 do Modelo Atual do Átomo.

3.2.3 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 na seção 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

[†] 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 nesta seção.

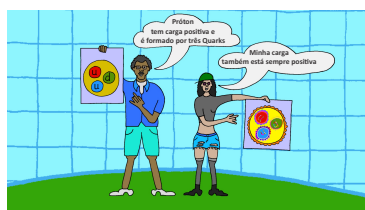


Figura 3.17: Um próton é formado por três quarks e tem carga positiva.

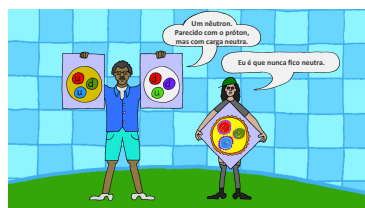


Figura 3.18: Nêutrons são parecidos com prótons e também são formados por três quarks, porém tem carga elétrica nula.

Figura 3.19: Imagem ilustrativa dos prótons e nêutrons. Note que apesar dos neutrons não terem carga elétrica eles sentem uma força de repulsão efetiva que pode ser entendida com produto do princípio de exclusão de Pauli que nos diz que duas partículas não podem ter os mesmos números quânticos (que no átomo implica em dois nêutrons não poderem ocupar o mesmo espaço em um órbita.)

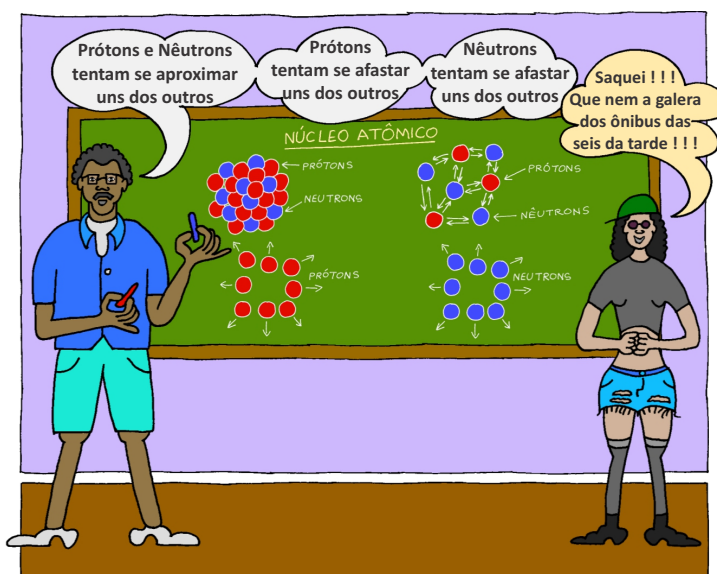
subatômicas (dentro do átomo), que hoje são chamadas de prótons e nêutrons.

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 mais fundamentais chamados de *Quarks*. Nós falaremos mais deles no capítulo 5 sobre 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].

Outro aspecto importante é 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 encontram-se um ao lado do outro formando o núcleo, como na figura 3.19.



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[§].

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.

E uma pergunta muito justa que pode ser feita 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. Realmente a força elétrica tende a afastar os prótons uns dos outros, contudo, dentro do núcleo do átomo há também uma

[‡] Existem isótopos de hidrogênio, que possuem nêutrons em seu núcleo, como o deutério que possui um nêutron em seu núcleo.

[§] A palavra próton e a expressão núcleo de hidrogênio são equivalentes.

outra força; uma força mais forte que puxa um próton para perto do outro e essa força se chama *Força Nuclear Forte*, como será melhor explicado no capítulo 4 sobre o **Modelo Padrão** da Física de Partículas.

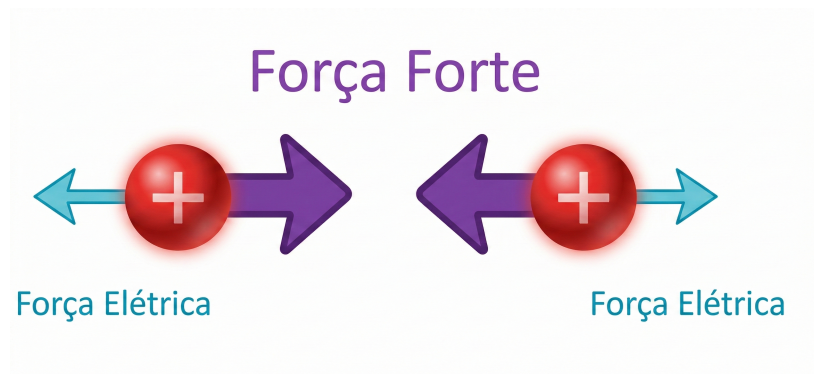


Figura 3.20: Mesmo com a repulsão entre prótons causada pela força elétrica, o núcleo do átomo se mantém coeso devido a outra interação, a força forte.

3.2.4 Átomos Hidrogenóides

O átomo mais simples da natureza é o 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 hidrogenóides.

Os átomos hidrogenóides são formados apenas por um elétron e um núcleo, que pode ter mais de um próton e também pode conter nêutrons [19]. Considerando o núcleo como um corpo, os problemas envolvendo átomos hidrogenóides são conhecidos como *problemas de dois corpos*.

As conquistas que Bohr obteve para seu modelo foram principalmente para átomos hidrogenóides, 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 seção 3.3 do “Modelo Atual do Átomo” iremos estender a teoria para átomos com mais elétrons.



Figura 3.21: Max Planck, físico.
Fonte: Nobel foundation, Wikimedia Commons.

3.2.5 Níveis de Energia

Um dos principais pilares da Mecânica Quântica foi proposto por um cientista chamado Max Planck (figura 3.21) e tratava a energia de uma forma quantizada, isto é, Planck pensava na energia como um conjunto de pequenos pacotes chamados de *quanta*, que é o plural de *quantum*. Mais posteriormente, Einstein (figura 3.22) utilizou da ideia da energia em pacotes para explicar um fenômeno chamado de efeito fotoelétrico.

O modelo de Rutherford não conseguia explicar como os elétrons se distribuíam no átomo e a qual distância eles estavam do núcleo [13]. Contudo, Bohr conseguiu resolver esse problema utilizando a ideia da energia em pacotes e dizendo que os elétrons estavam em camadas fixas[¶] e que cada uma dessas camadas conseguia segurar um número específico de elétrons.

Observe o desenho a seguir (fig. 3.23):

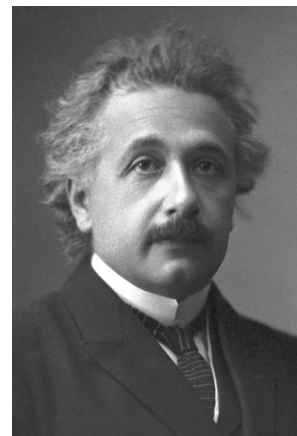


Figura 3.22: Einstein, físico.
Fonte: Nobel foundation, Wikimedia Commons.

[¶] Também chamadas de quantizadas ou de discretas.

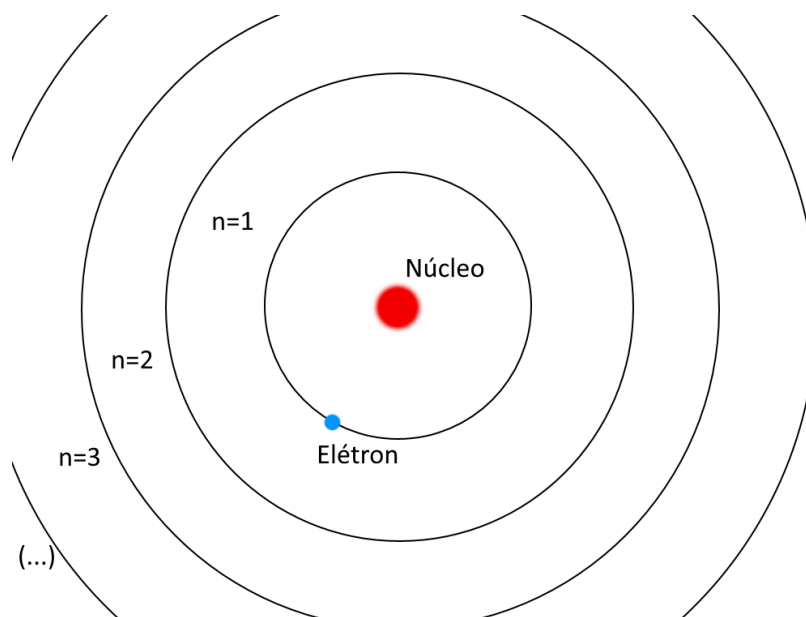


Figura 3.23: Imagem didática contendo o núcleo (vermelho), os elétrons (azul) e as camadas (preto).

Podemos ver que cada camada tem um número^{||}, n , representando-a. Este número n é chamado de **número quântico principal**^{**}. 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.

3.2.6 Entrada e Saída de Energia

Um fenômeno muito conhecido na época de Bohr era a luz emitida pelo átomo de hidrogênio (figura 3.25). Um dos principais cientistas que estudavam esse fenômeno foi um pesquisador chamado Johannes Rydberg (figura 3.24), que percebeu juntamente a outros cientistas os comprimentos de onda emitidos no espectro do átomo são distribuídos em valores específicos bem definidos e inferiu experimentalmente uma equação que relaciona o comprimento de onda emitido, λ , com um par de números n_1 e n_2 , que pode ser 1,2,3,..., desde que $n_1 < n_2$ e uma constante, R_y , chamada de constante de Rydberg [20]

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \quad (3.1)$$

Em especial, quando $n_1 = 2$ e $n_2 = n$, temos a série de Balmer, bastante entendida pois descreve a emissão no espectro visível, que era um conhecimento consolidado devido principalmente a astronomia:

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right). \quad (3.2)$$

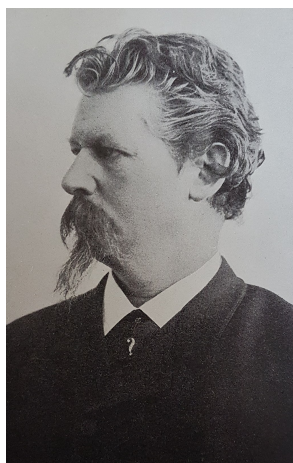


Figura 3.24: Johannes Rydberg, físico.
Fonte: Svenska konstnärer, Wikimedia Commons

^{||} É comum alguns autores utilizarem as letras do alfabeto começando pela letra K (para $n = 1$) até a letra Q (para $n = 7$).

^{**} O termo “principal” é de fato utilizado, pois veremos que existem outros número quânticos além do n .

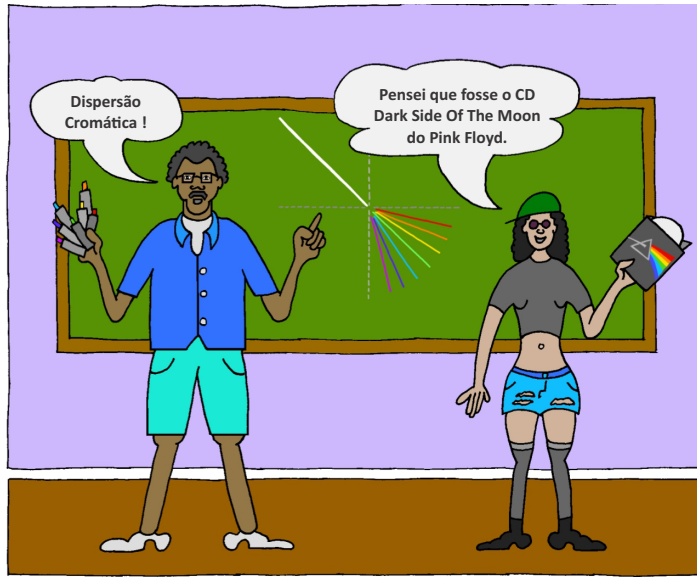


Figura 3.25: Dispersão cromática. Uma luz branca incidindo em um prisma. Como a interação da luz com diferentes meios depende do comprimento de onda, as componentes da luz branca são dispersadas, gerando uma espécie de arco-íris.

Uma das principais conquistas do modelo de Bohr é que com a ideia de elétrons em camadas, Bohr conseguiu prever precisamente os valores de comprimento de onda da luz emitidos pelo átomo de hidrogênio descritos pela equação de Rydberg 3.3. Isto é, Bohr conseguiu deduzir de forma teórica as relações experimentais observadas por diversos físicos e sumarizadas por Rydberg.

Assim, Bohr chegou a equação

$$\frac{1}{\lambda} = R_y Z^2 \left(\frac{1}{(n_{\text{final}})^2} - \frac{1}{(n_{\text{inicial}})^2} \right). \quad (3.3)$$

em que Z é o número de prótons no átomo, n_{inicial} é o número quântico principal relativo a camada de onde o elétron parte e n_{final} é o número quântico principal relativo a camada de onde o elétron chega. Desta forma, se dá um significado físico aos valores n_1 e n_2 descritos anteriormente na equação 3.1

Além disso, Bohr chegou a equação abaixo que dá a energia de cada camada de átomos com diferentes números atômicos Z (lembrando que estamos falando de átomos hidrogenóides):

$$E = -R_y \frac{Z^2}{n^2}. \quad (3.4)$$

Agora que já entendemos o formalismo matemático, vamos entender de forma qualitativa como funciona a absorção e emissão de energia do átomo. É interessante notar que essa teoria de entrada e saída foi proposta por Bohr e é válida para átomos hidrogenóides até hoje.

Agora, para não ficar 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 muitas 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 3.26:

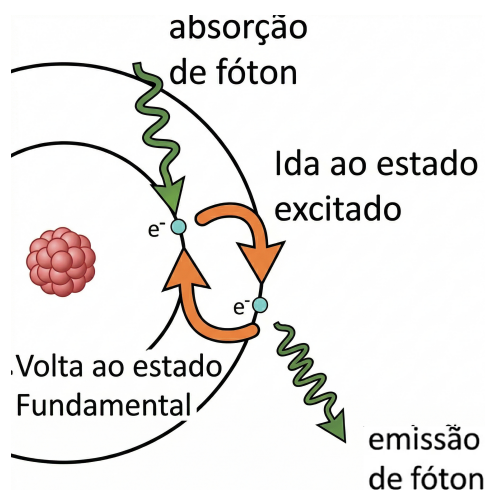


Figura 3.26: Ida para o estado excitado e volta para o estado fundamental.

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 aquele previsto pela equação (3.3).

3.2.7 Proporções



Figura 3.27: Veja nosso vídeo sobre medidas e escalas.

As imagens que apresentamos nessa seção são muito boas para compreendermos melhor as camadas do átomo de Bohr, contudo elas carregam imprecisão... As **proporções**! Como você pode ver no nosso vídeo sobre escalas (figura 3.27), os elementos do átomo têm um tamanho bem particular! Podemos fazer a seguinte comparação: Se um átomo fosse um campo de futebol (figura 3.28), 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!

3.2.8 Os postulados de Bohr

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

1. Os elétrons estão em níveis de energia específicos. Expressando de maneira matemática, Bohr diz que o módulo do momento angular, L , do elétron é dada em função do número quântico, n , e de uma constante $\hbar^{\dagger\dagger}$ 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].

^{††} $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, em que h é chamada de constante de Planck.



Figura 3.28: Campo de futebol.

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

3.2.9 Imprecisões no Modelo de Bohr: Bohr estava errado?

Com o passar do tempo o modelo de Bohr mostrou-se incompleto. A equação (3.4) obtida por Bohr para a energia das camadas do átomo de hidrogênio ($E = -R_y \frac{1}{n^2}$) está correta, contudo as hipóteses que Bohr utilizou para obter a equação de forma teórica mostraram-se equivocadas a partir de 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.

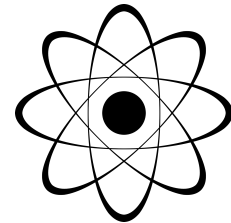


Figura 3.29: Representação incompleta do átomo como conhecemos hoje, mas muito importante para a História da Atômica e para os estudos atuais.

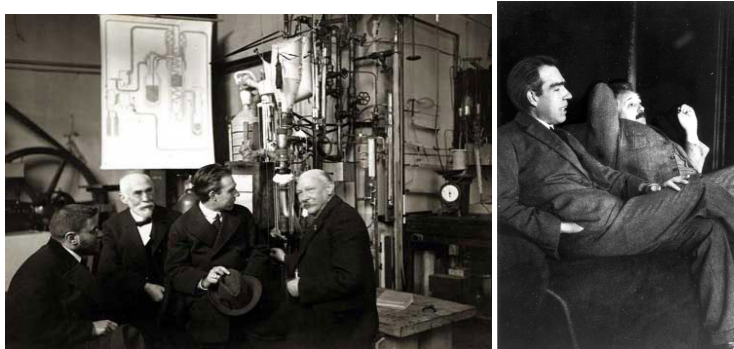


Figura 3.30: Primeira foto: Ehrenfest, Lorentz e Bohr no laboratório de criogenia de Leiden. Segunda foto: Bohr e Einstein na casa de Paul Ehrenfest [21].

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 nesta revolução. Neste início de seção iremos falar dos cientistas e de alguns dos principais princípios que levaram ao modelo atual do átomo.



Figura 3.31: Veja nosso vídeo e nosso podcast sobre o modelo atual do átomo.



Figura 3.32: Louis de Broglie, físico.
Fonte: Nobel foundation, Wikimedia Commons.

Dualidade Onda Partícula

Por volta de 1924, o cientista francês Louis de Broglie (figura 3.32, [prêmio nobel](#) em 1929) publicou seu trabalho em que ele explica sobre a dualidade onda-partícula.

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 nada simples nem intuitiva e ela revolucionou toda a teoria atômica, pois agora podemos interpretar as partículas que formam o átomo como ondas, o que abre um mar de novas possibilidades para a Física, como por exemplo, fenômenos de difração e interferência.

A equação de De Broglie é dada por:

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad (3.5)$$

isto é, o comprimento de onda da partícula (λ) é igual à divisão de uma constante h (conhecida como constante de Planck) pelo produto da massa pela velocidade da partícula[‡].

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.

3.3.1 O Princípio da Incerteza de Heisenberg

A incerteza na Física Clássica

A incerteza é algo que acompanha a física desde seus primórdios. Todo resultado experimental é limitado pelos instrumentos de medição utilizados (que não podem fazer medidas com precisão absoluta) e pelo número de vezes que repetimos o experimento (pois podem existir variações que fogem as variáveis controladas pelo experimento). Toda medida é assim acompanhada de um "erro", isto é, uma faixa de valores onde mais provavelmente está o valor real da grandeza estudada.

Este conceito é fundamental para encarar a física como uma ciência que descreve o mundo real. Vamos tentar entender como isso funciona.

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

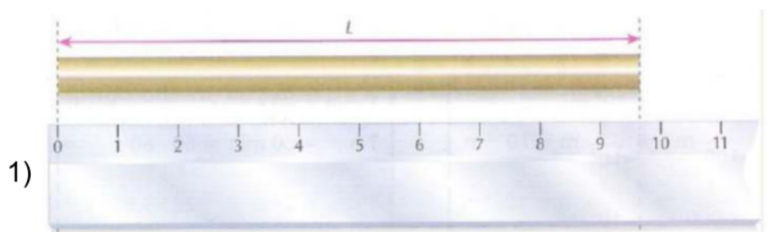


Figura 3.33: Medição de um objeto utilizando uma régua graduada em centímetros.

[‡] Na verdade, a equação mais completa escreve o momento linear, p , da partícula e não necessariamente a massa vezes a velocidade. Contudo essa diferença só é importante quando se leva em conta a Teoria da Relatividade de Einstein. Não entraremos em detalhes pois foge aos nossos objetivos.

Bem, se nós estamos utilizando uma régua como a da figura 3.33, nós temos confiança de que a medida da barra está entre 9 cm e 10 cm. Além disso, nós podemos 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 Δx é o valor da incerteza.

Porém, não somente o instrumento interfere na medição. Podemos realizar a medição diversas vezes e perceberemos que em muitos experimentos este valor terá variações. Assim, calculamos a média e o desvio padrão destes valores para uma descrição melhor da grandeza em estudo.

O erro total da medida é uma combinação entre o desvio padrão e o erro instrumental. Podemos diminuir este erro fazendo um número maior de medidas e também utilizando um instrumento mais preciso.

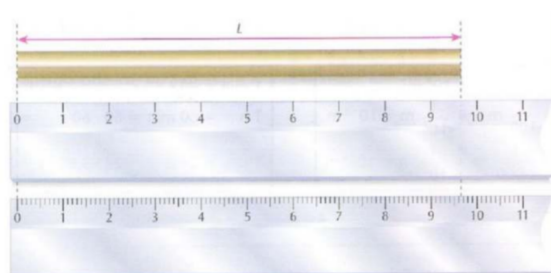


Figura 3.34: Comparação de uma régua graduada em centímetro e outra graduada em décimos de centímetro.

Por exemplo, na figura 3.34, temos um instrumento capaz de medir décimos de centímetro, de forma que em uma medida obtemos o valor ($L = 9,65 \pm 0,05$) 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, e da teoria ondulatória sabemos que algumas incertezas estão relacionadas de forma que quanto mais temos informação 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 3.35, [prêmio nobel](#) de 1932), chamado de Princípio da Incerteza de Heisenberg [14].

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 tempo. Quanto maior a precisão^{¶¶} na medição da velocidade menor a precisão na medição da posição da partícula e vice versa [14].

^{§§} Mais precisamente, o momento linear, que é *normalmente* igual ao produto massa $\times$ velocidade. O momento linear pode ser dado por outras equações quando levamos em conta a Teoria da Relatividade de Einstein.

^{¶¶} Isto é, quanto menor a incerteza.



Figura 3.35: Werner Heisenberg, físico. Fonte: Nobel Foundation, Wikimedia Commons.

Além disso, o Princípio da Incerteza estabelece o análogo para a medição da energia e do tempo do objeto. Não podemos ter precisão absoluta 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 ΔE a precisão na Energia, Δt a precisão no tempo (não confundir a notação com intervalo de tempo, aqui Δt indica a erro, isto é, a imprecisão na medida de tempo), Δx a precisão na posição e de Δp_x a precisão no momento linear (quando não considerarmos a Teoria da Relatividade de Einstein^{***}, o momento é dado pelo produto massa $\times$ velocidade), podemos escrever o Princípio da Incerteza de maneira matemática, como Heisenberg fez:

$$\begin{aligned}\Delta x \cdot \Delta p_x &\geq \frac{1}{2}\hbar \\ \Delta E \cdot \Delta t &\geq \frac{1}{2}\hbar,\end{aligned}\tag{3.6}$$

Note nas equações estamos usando a notação p_x , que indica a projeção do momento angular na direção x . Lembramos que o momento linear é um vetor que em um espaço tridimensional tem três componentes. A relação de incerteza sempre relaciona a precisão de medidas no espaço com a precisão na projeção do momento na direção em que esta medida de espaço foi feita.

o que é basicamente equivalente a definição que fizemos agora pouco usando palavras em língua portuguesa. Não se preocupe com o $\frac{1}{2}\hbar$, isso é apenas o número $3,291 \cdot 10^{-16}$ em unidades de elétron-volts $\times$ segundo – uma unidade utilizada na Física Quântica – e apenas 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⁺⁺⁺.

3.3.2 Nuvens eletrônicas

Dado o princípio de incerteza de Heisenberg, percebemos que não podemos considerar que cada elétron esteja exatamente em uma órbita atômica específica. Elétrons se comportam como onda e portanto não são objetos localizados como é o caso de uma partícula pontual. Considerando interpretações mais modernas, como a proposta por Schrodinger, toda partícula é representada por uma onda de probabilidade, isto é, a região do espaço ocupada pela onda representa a probabilidade de detectar esta partícula ao fazer uma medida.

No caso dos elétrons, estas regiões de probabilidade ao redor do átomo são chamadas de nuvens eletrônicas. Os formatos das nuvens eletrônicas depende do número de elétrons que compõe o átomo e podem ser descritas resolvendo a equação de onda de Schrodinger. Esta é uma das interpretações mais modernas do átomo, mas a matemática necessária para trabalhar a teoria é bastante avançada e foge dos objetivos deste livro. Caso o leitor tenha interesse em conhecer melhor este modelo, sugerimos os seguintes livros de introdução à Física Moderna [12, 14].

^{***} Não considerar a Teoria da Relatividade é totalmente normal e aceitável para partículas que tem uma velocidade suficientemente menor que a velocidade da luz.

⁺⁺⁺ Seu valor é dado por $\frac{h}{2\pi}$, em que h é a Constante de Planck. $h = 4,136 \cdot 10^{-15}$ elétron-volts segundos, $\hbar = 6,582 \cdot 10^{-16}$ elétron-volts segundos.

3.3.3 Conclusão

Por fim, nós conseguimos ver os principais pontos do estudo dos átomos. É importante ressaltar que esse estudo continua a evoluir até hoje cada vez buscando resolver problemas 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)

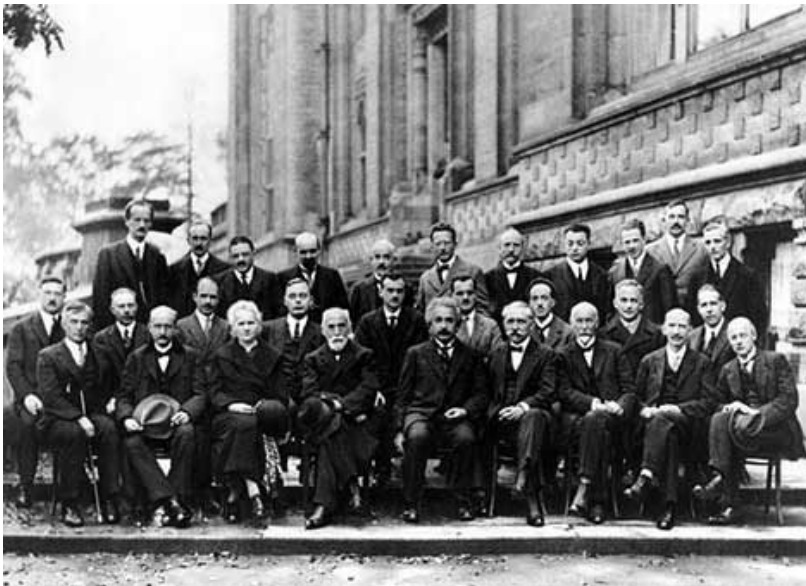


Figura 3.36: Quinta conferência de Solvay sobre Elétrons e Fótons. Alguns dos participantes dessa conferência (e também presentes na foto) são Schrödinger, Pauli, Heisenberg, Dirac, Compton, de Broglie, Max Born, Bohr, Planck, Marie Curie, Lorentz e Einstein [21].

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. Atualmente, o Modelo Padrão de Partículas Elementares é nossa melhor teoria para descrever a matéria em seus objetos mais básicos. Através dele nós fomos capazes de descrever boa parte dos fenômenos na escala de partículas subatômicas e até menos fenômenos macroscópicos como a evolução das estrelas!



Figura 4.1: Via Láctea vista do deserto do Atacama. Fonte: ESO/A. Fitzsimmons

Mas o que é o Modelo Padrão das Partículas Elementares e como ele consegue explicar tanto do universo? Bom, para responder isso, 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? Bom, imagine que você quer escrever um poema. Olhando os estilos você decide que quer escrever um soneto, que é um estilo de escrita que foi 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: 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. Entre várias outras características, mas se você não for escrever um soneto e sim um poema épico, será trocada a estrutura base do texto. Essa é a ideia por trás de um modelo - é uma base bem estruturada que vai ser o ponto de partida de qualquer estudo em determinada área.

Voltando ao Modelo Padrão, agora vamos entender quais são as características desse modelo que o fazem explicar as partículas elementares e suas interações tão bem. O objetivo do modelo é explicar as coisas mais primordiais do nosso universo, as Partículas Elementares. Essas

partículas compõem tudo que existe* no universo e não são compostas de nada além delas mesmas. Então, o primeiro passo que esse modelo toma é agrupar 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 mostrado na figura 4.2. Entre esses grupos, as partículas se dividem assim:

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

- Quarks - up, down, charm, strange, top e bottom e suas antipartículas, 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 desempenhada pelos quarks.

- Léptons - elétron, múon, tau, neutrino eletrônico, neutrino muônico, neutrino tauônico e suas antipartículas, totalizando 12 léptons.

E o grupo dos bósons, composto por:

- bósons de calibre (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. Em especial, devido as variações de carga de cor, existem 8 tipos diferentes de glúons. Desta forma temos 12 bósons vetoriais.

- 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 carregados.

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 resumindo, temos que a "carga" é o nome que damos para as características da partícula que se referem as 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 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].

* Ainda é uma incerteza se e quais são as partículas elementares que compõem a Matéria Escura e a Energia Escura. Então quando digo que elas compõem tudo que existe, estou falando apenas da matéria comum, aquela que você vai ver no seu dia a dia.

[†] 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.

Modelo Padrão das Partículas Elementares

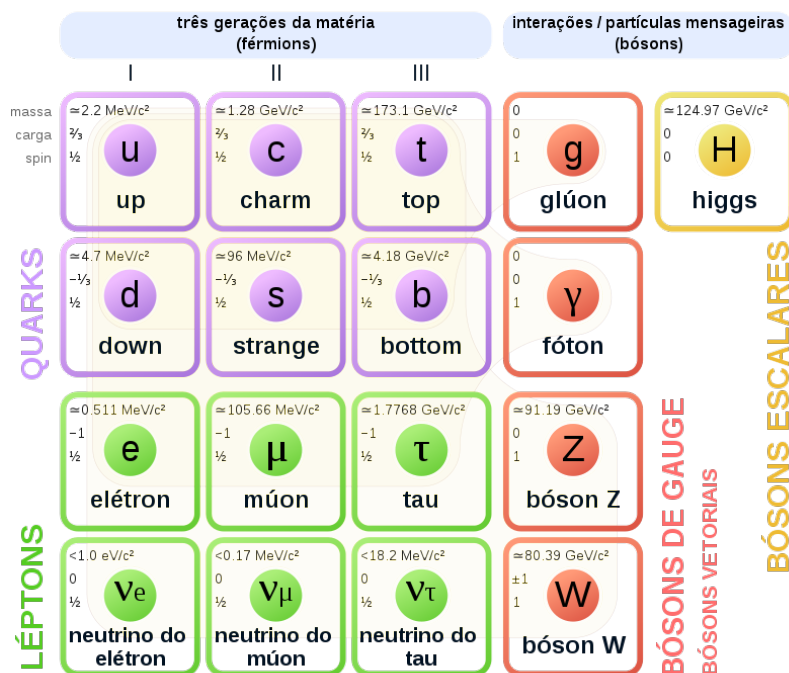


Figura 4.2: Modelo Padrão de Partículas Elementares.

Fonte: Traduzido de MissMJ/Wikimedia Commons

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. O mesmo com o ar, que é composto de moléculas de nitrogênio, oxigênio, dentre outras. Todas estas moléculas 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 quatro interações fundamentais: a eletromagnética, a força nuclear fraca, a nuclear forte e a gravitacional[‡]. Assim, entende-se que cada uma dessas interações é o resultado da troca de bósons específicos entre corpos. Mas explicaremos isso melhor no próximo capítulo.

[‡] 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.

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. Ele forma a camada externa dos átomos e responde 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, através de experimentos, o comportamento dos raios catódicos na presença de forças elétricas e magnéticas.

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).

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. E foi isso que Thomson fez em seu experimento. Garantindo as condições necessárias, ele conseguiu observar uma deflexão (desvio) dos raios para uma das placas. Aplicando um campo elétrico ao feixe, observou-se sua deflexão em direção à placa positiva (ver aparato experimento, figura 5.3). Esse resultado revelou que os raios catódicos eram constituídos por partículas de carga negativa, confirmando sua natureza corpuscular e não ondulatória. Thomson mediu o deslocamento produzido para diferentes valores das forças elétricas e magnéticas e calculou a razão carga/massa das partículas que compunham os raios catódicos. 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

5.1	O elétron (1897)	39
5.1.1	Experimento das gotas de Millikan: Determinação da carga do elétron (1911) . .	40
5.2	O múon	42
5.2.1	O Espaço e o Tempo alterados	44
5.2.2	A descoberta do Múon e o Méson Pi	45
5.3	O Fóton	46
5.4	Quarks e glúons	48
5.4.1	Hádrons	49
5.4.2	De volta aos quarks	50
5.5	Os Glúons (1973)	51
5.6	Bósons W e Z	52
5.7	Os neutrinos	54
5.8	Bóson de Higgs	56

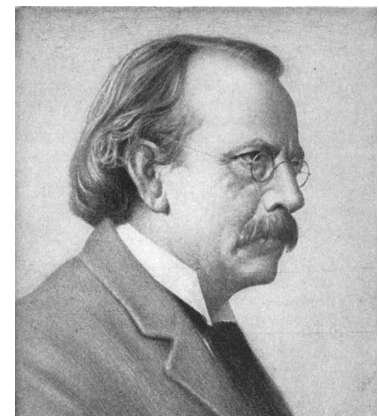


Figura 5.1: Joseph John Thomson (1856-1940). Fonte: Benjamin Crowell, Wikimedia Commons.

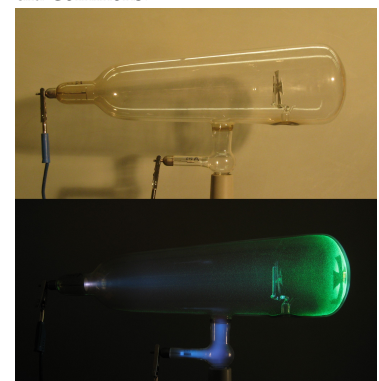


Figura 5.2: Tubo de Crookes através do qual os raios catódicos foram descobertos. Fonte: D-Kuru, Wikimedia Commons.

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

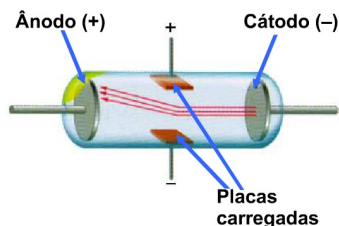


Figura 5.3: Esquema de um tubo de raios catódicos.

permaneciam constantes independentemente do material catódico de onde se originavam. Então o experimento de Thomson caminhava para as seguintes conclusões:

- ▶ O raio catódico é composto por partículas carregadas negativamente.
- ▶ A massa de cada partícula era 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. Este nome havia sido proposto muito antes por George Stoney para a unidade de eletricidade ganha ou perdida quando os átomos se tornam eletricamente carregados. Uma década depois da realização do experimento essa partícula fundamental tornou-se aceita e foi chamada de elétron [26].

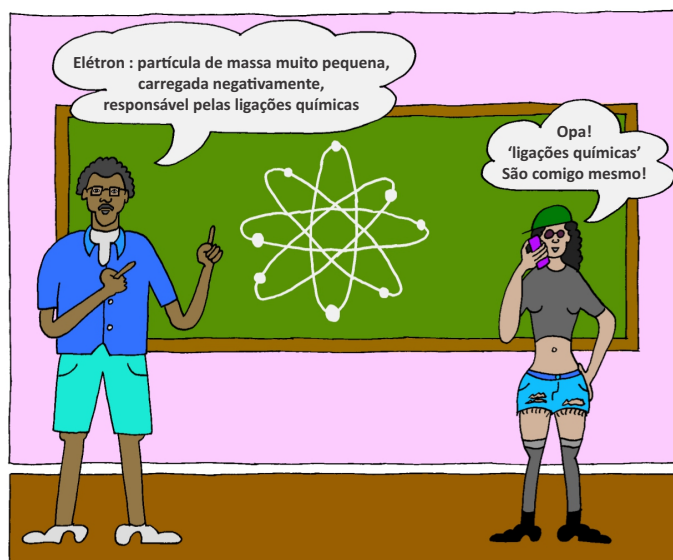


Figura 5.4: O elétron foi a primeira partícula elementar descoberta.

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

Após o experimento de Thomson, não se conhecia o valor da carga dessas partículas negativamente carregadas que chamamos de elétron. Foi só com o experimento de Millikan que foi possível determinar de fato o valor da carga elétrica do elétron. O que se conhecia era apenas a razão entre a carga e a massa do elétron:

$$\frac{e}{m} = 0,8 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}, \quad (5.1)$$

onde e e m são respectivamente a carga e a massa do elétron.

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

O engenhoso cientista capaz de determinar com precisão a carga elétrica do elétron foi Robert Andrews Millikan (figura 5.5) com seu famoso experimento das "gotas de óleo". Para realizar essa medição, Millikan utilizou o aparato representado na figura 5.6, seguindo uma sequência lógica de eventos:

- ▶ **Atomização:** Com um borrifador (atomizador), Millikan inseria microgotículas de óleo em uma câmara fechada.
- ▶ **Ionização:** Utilizando uma fonte de raios X, ele ionizava o ar dentro da câmara. Esse processo consistia em "arrancar" elétrons das moléculas de ar, que acabavam aderindo às gotículas de óleo, conferindo-lhes uma carga elétrica negativa.
- ▶ **Ação da Gravidade:** As gotas inicialmente desciam através de um pequeno orifício devido à força gravitacional (F_g).
- ▶ **Aplicação do Campo Elétrico:** Millikan ligava uma fonte de alta tensão conectada a duas placas metálicas, gerando um campo elétrico uniforme. Como as gotas estavam carregadas negativamente, elas sofriam a ação de uma força elétrica (F_c) voltada para cima, em oposição à gravidade. **Equilíbrio de Forças:** Ao observar as gotas pelo microscópio, Millikan ajustava a voltagem até que uma gota ficasse em repouso ou subisse com velocidade constante. Nesse estado, a gota estava sob a influência de três forças principais: a força elétrica (F_c), a força gravitacional (F_g) e a força de atrito viscoso com o ar (F_d). (ver figura 5.8)



Figura 5.5: Robert Andrews Millikan (1858-1953).

Fonte: Clark Millikan, Wikimedia Commons.

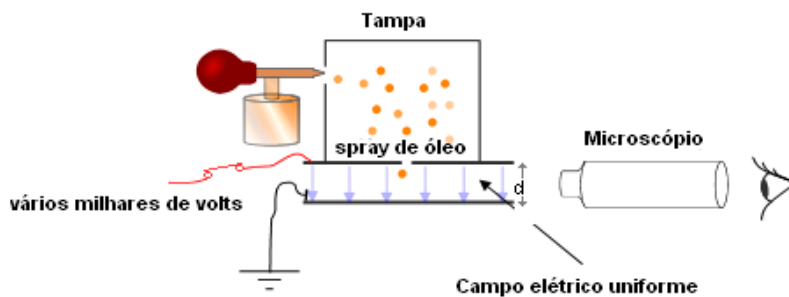


Figura 5.6: Representação do aparato experimental de Millikan.

Fonte: KIWANGA, Christopher Amelye, Wikimedia Commons.



Figura 5.7: Aparato experimental de Millikan.

Fonte: Autor desconhecido, Wikimedia Commons.

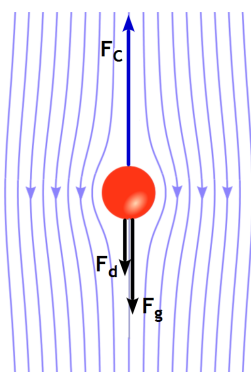


Figura 5.8: Representação das forças atuando sobre a gotícula de óleo.

Fonte: Antoni Salvà, Wikimedia Commons.

Ao atingir o equilíbrio ou uma velocidade constante, Millikan conseguia utilizar as equações do movimento e da viscosidade para calcular a carga total presente em cada gota. Após observar centenas de gotas, ele notou algo extraordinário: os valores de carga obtidos não eram aleatórios, mas sempre múltiplos inteiros de um valor mínimo fundamental. Isso provou que a carga elétrica é quantizada. Dividindo as cargas totais pelo menor valor encontrado, Millikan determinou a carga elementar (e) e, utilizando a razão carga/massa de Thomson (ver equação 5.1), pôde finalmente calcular a massa do elétron [28]:

- ▶ $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- ▶ massa do elétron, $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

É interessante notar que a carga do elétron é, na verdade, chamada de carga elementar (e) e é considerada como a unidade fundamental de carga elétrica. Seu valor é dado por $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19}$. Posteriormente descobrimos que algumas partículas, os quarks, podem ter carga fracionária, porém elas nunca são observadas sozinhas na natureza.

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 elétrica, 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, o que permite agrupar pares de elétrons com spin em direções diferentes no mesmo orbital, respeitando o Princípio de Exclusão de Pauli, que diz que elétrons não podem ter todos os números quânticos iguais, isto é, não podem ter todas as grandezas que os definem com o mesmo valor. 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 dos léptons e é representado pela letra grega μ . Os Léptons são férmions, conforme apresentado no capítulo 4, que não interagem através da força nuclear forte. Os léptons eletricamente carregados, como o múon, elétron e tau, possuem o mesmo valor de carga elétrica, a carga elementar e . Diferem apenas em sua massa e seu tempo de vida médio de decaimento.

O múon foi descoberto simultaneamente por dois grupos diferentes. Esta descoberta foi publicada em 1937. Um dos grupos era formado pelo nobel de física Carl D. Anderson (figura 5.10) e Seth Neddermeyer, enquanto



Figura 5.9: múon: um elétron mais gordinho.

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 Capítulo 7.

Nos anos que se seguiram, e com grande participação de pesquisas brasileiras, propriedades do múon passam a ser descobertas e compreendidas. Porém, uma pergunta ainda precisava ser respondida: a chegada de múons originados de raios cósmicos na superfície terrestre.

Para abordar essa questão, deve-se antes entender o que são os chamados chuviros atmosféricos. Imagine uma partícula cósmica de alta energia proveniente do espaço. Ao entrar na parte mais alta da atmosfera terrestre colide com outros átomos e partículas que já se encontravam na atmosfera do planeta. Após estas colisões, originam-se novos núcleos e novas partículas. Desta forma, a interação continua como em um efeito dominó até chegar a superfície da Terra. Este fenômeno é chamado de chuva atmosférica. Mais sobre raios cósmicos será apresentado no Capítulo 7.

O múon possui um tempo médio de vida de decaimento de aproximadamente $2,2 \times 10^{-6}$ s. Ou seja, por ser instável, acaba decaindo espontaneamente em outras partículas: um elétron, um neutrino e um anti-neutrino. Analisando os raios cósmicos é possível inferir a velocidade com que os múons se propagam, aproximadamente $2,92 \times 10^8$ m/s. Assim, é possível calcular o tempo de propagação necessário para um múon chegar a superfície da Terra.

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} \quad (5.2)$$

usando a velocidade do múon e considerando uma trajetória de 15 km, têm-se que:

$$\Delta t = \frac{15 \times 10^3 \text{ m}}{2,92 \times 10^8 \text{ m/s}} \approx 50,55 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (5.3)$$

Como notado na equação 5.3, o tempo que a partícula levaria para chegar à superfície terrestre ao nível do mar é maior que o tempo médio de vida dela. Utilizando o conceito de decaimento dado pela lei estatística

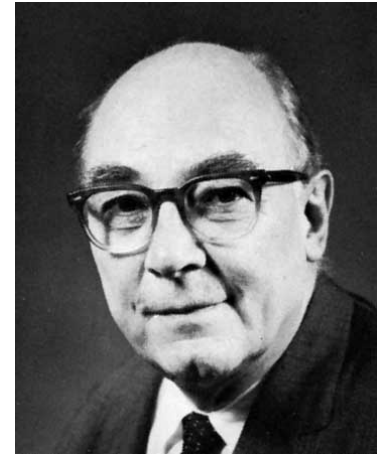


Figura 5.10: Carl David Anderson (1905-1991).

da radioatividade, a conclusão seria que a quantidade de múons que deveriam chegar é muito menor do que a que realmente chega e foi detectada experimentalmente. Nota-se assim que a mecânica clássica não é capaz de explicar o fenômeno da quantidade de múons que chegam à superfície terrestre. Para explicá-lo precisaremos adotar uma visão relativística do fenômeno [30].

5.2.1 O Espaço e o Tempo alterados

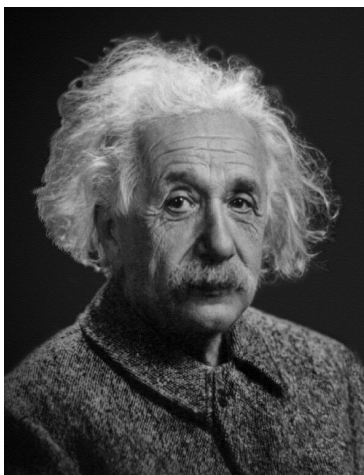


Figura 5.11: Albert Einstein (1879-1955).

A explicação para a quantidade de múons encontradas ao nível do mar é dada pela famosa Teoria da Relatividade Restrita, proposta pelo físico alemão Albert Einstein (figura 5.11) em 1905. A proposição de Einstein define que: (i) a velocidade da luz é constante para qualquer referencial; e (ii) as leis da física são as mesmas independente do referencial inercial. Objetos, usados como referencial, serão do tipo inercial, caso a força resultante a que estão submetidos seja igual a zero; portanto, o referencial inercial deverá estar em movimento retilíneo e uniforme. Uma das consequências é que o tempo e o espaço não são invariantes [31].

Desta forma, objetos com velocidades altíssimas passariam a observar uma mudança nas distâncias que medem em relação a um observador em repouso de forma que quanto mais próxima à velocidade da luz, mais evidente se torna o fenômeno. Este fenômeno é conhecido como contração espacial.

Para entender como o múon sobrevive à viagem, precisamos analisar o fenômeno sob dois pontos de vista (referenciais) diferentes:

O ponto de vista do Observador na Terra: Para nós, que estamos parados no laboratório, os múons se movem a velocidades altíssimas ($0,998c$). Nessa velocidade, ocorre o fenômeno da dilatação temporal: o tempo para o múon passa mais devagar em relação ao nosso relógio. Assim, enquanto para o múon se passaram apenas 2,2 microssegundos (seu tempo de vida médio), para nós na Terra esse tempo foi "esticado", permitindo que a partícula percorra os 15 km de atmosfera antes de decair.

O ponto de vista do Múon: Se pudéssemos viajar junto com o múon, o tempo passaria normalmente para nós. No entanto, veríamos a Terra se aproximando em uma velocidade incrível. Nesse referencial, ocorre a contração espacial: a distância de 15 km da atmosfera é encurtada drasticamente para apenas alguns metros. Com uma distância tão menor a percorrer, o múon consegue atingir a superfície dentro de seu curto tempo de vida natural. Para calcular exatamente quanto o espaço e o tempo se deformam, utilizamos o fator de Lorentz (γ), presente nas equações fundamentais da relatividade:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (5.4)$$

Onde: v : é a velocidade da partícula (no caso, $0,998c$). c : é a velocidade da luz no vácuo. x' e t' : representam as coordenadas de espaço e tempo transformadas entre os referenciais. Dessa forma, a relatividade de Einstein mostra que espaço e tempo não são fixos, mas se moldam para que a velocidade da luz seja sempre constante, permitindo que partículas instáveis como o múon nos revelem segredos do cosmos aqui mesmo na superfície terrestre.

5.2.2 A descoberta do Múon e o Méson Pi

Ao ser descoberto e antes de entender completamente sua natureza, Hideki Yukawa (1907-1981) considerava o múon como a possível partícula responsável por manter o núcleo do átomo estável.

A proposta de Yukawa era de que deveria existir algo que mantivesse os núcleos atômicos unidos, mesmo com os prótons se repelindo por terem a mesma carga elétrica. A ideia era a de que existisse uma partícula mediadora responsável pelo fenômeno, chamada de méson que, em grego, significa "meio". Este nome vem da previsão que sua massa teria um valor intermediário entre a massa do próton e a do elétron. Apesar de não serem partículas elementares, os mésons são de extrema importância para a construção do Modelo Padrão. O estudo das propriedades do múon, mostrou que ele não poderia ser essa partícula apesar da esperança de alguns físicos da época que ele cumprisse o papel de méson de Yukawa.

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 proposta por 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, figura 5.12), detectou, em 1947, o Méson Pi, também chamado de pión (π) [32].

Lattes foi um físico brasileiro, graduado pela Universidade de São Paulo (USP) que, além de ser coautor na descoberta do Méson Pi, também foi capaz de gerá-los artificialmente, com a ajuda de Eugene Gardner (1901-1986), em um acelerador de partículas. 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].

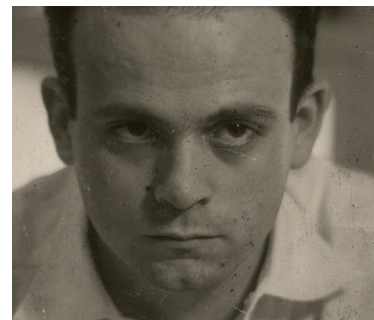


Figura 5.12: César Lattes (1924-2005).

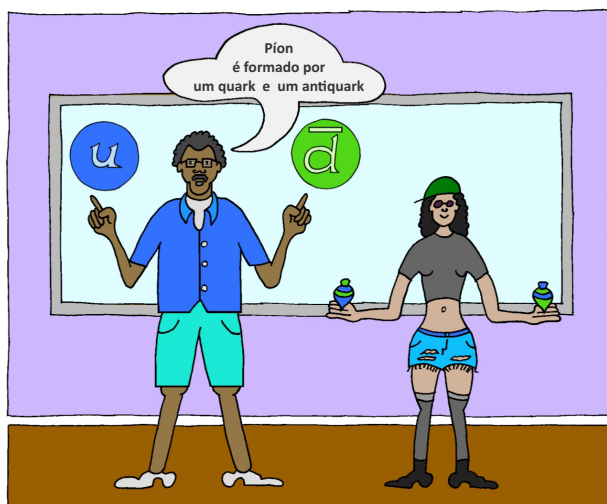


Figura 5.13: Píon formado por um quark e um antiquark.

5.3 O Fóton



Figura 5.14: Fóton é a partícula da luz: não possui carga nem massa.

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), sendo esta teoria 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 a mesma era formada por um espectro multicolorido (Figura 5.15).

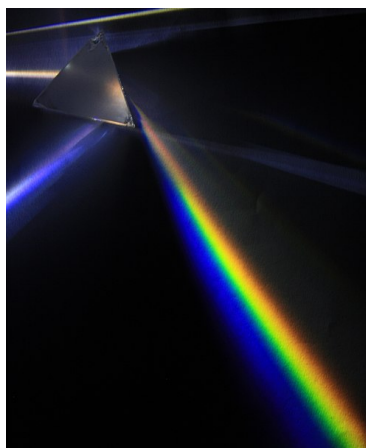


Figura 5.15: A luz branca do Sol, decomposta por um prisma, gera um espectro multicolorido da luz visível. Mesmo efeito que gera o arco-íris.

Fonte: D-Kuru/Wikimedia Commons.

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 Huygens (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. Este éter seria invisível, não teria massa e preencheria todo o universo [34].

A teoria ondulatória de Huygens não é bem como a que temos hoje, mas era capaz de explicar diversos efeitos óticos como a redução da velocidade da luz num meio mais denso, a polarização e também os fenômenos anteriormente descritos pela visão corpuscular como refração e reflexão [34].

No início do século XIX, experimentos feitos por Thomas Young (1773-1829) e Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) demonstraram efeitos que não podiam ser explicados pela teoria corpuscular da luz, como, por exemplo, os efeitos de interferência e difração. Young realizou um experimento conhecido como "dupla fenda". Nele, fez a luz passar por duas fendas estreitas e próximas entre si. Como resultado, observou-se um padrão de interferência num anteparo distante das fendas. Esse fenômeno,

mostrado na Figura 5.16 ao lado, pôde ser explicado pela superposição de ondas luminosas. Nela há aumento (interferência construtiva) e diminuição (interferência destrutiva) alternada da intensidade luminosa. Contrariando assim o comportamento esperado pela teoria corpuscular da luz. Fresnel, por sua vez, mostrou a propagação retilínea da luz em meios homogêneos e efeitos de difração. [34].

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 sendo descartada.

O desenvolvimento do eletromagnetismo culmina, na segunda metade do século XIX, nas equações de Maxwell que mostram a existência de ondas transversais que, no vácuo, propagam-se com velocidade constante igual à velocidade da luz c . A óptica passa então a ser um braço da teoria eletromagnética. Novos tipos de onda eletromagnética, com diferentes comprimentos de onda (frequência), são descobertos, além das ondas eletromagnéticas visíveis. (Figura 5.17).

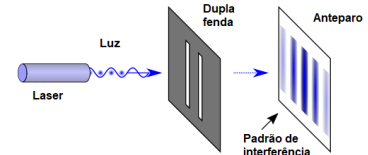


Figura 5.16: Padrão de interferência formado pelo experimento de dupla fenda.

Fonte: Adaptado de NekoJaNekoJa/Wikimedia Commons.

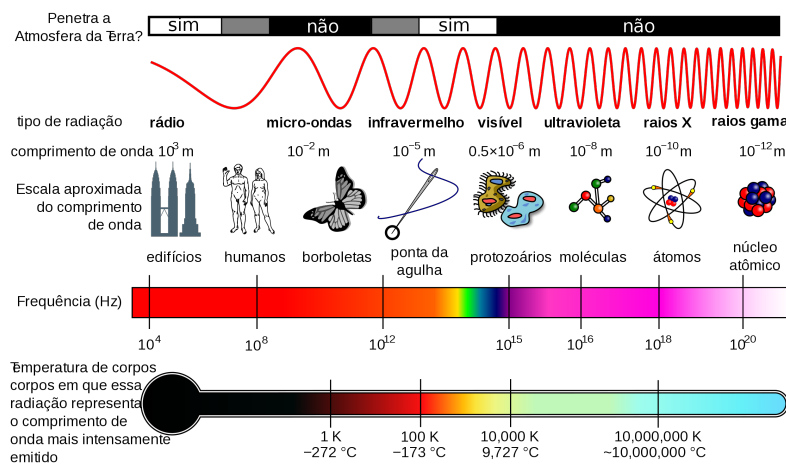


Figura 5.17: Espectro eletromagnético.

Fonte: Khemi/Wikimedia Commons

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

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

No final do século XIX e início do século XX, um dos grandes problemas da física era a chamada *catástrofe do ultravioleta*. Não havia uma teoria 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[‡]. Porém, ao absorver essa luz, ele aumenta sua temperatura e todo

[†] Radiação é o mesmo que ondas eletromagnéticas, como já comentado no Capítulo 3.

[‡] De fato, nenhum objeto real absorve toda a radiação que incide sobre ele.

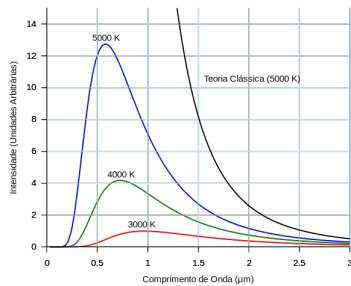


Figura 5.18: Previsão teórica para emissão de radiação de um corpo negro a diferentes temperaturas. A linha preta mostra a previsão da teoria clássica que prevê uma emissão muito grande para baixos comprimentos de onda que não é observada experimentalmente (catastrofe do ultravioleta). As curvas coloridas mostram a previsão considerando a hipótese quântica, percebe-se que as curvas se comportam bem, isto é, não apresentam uma divergência para o infinito.

Fonte: Darth Kule/Wikimedia Commons

corpo com temperatura acima de 0 K emite radiação com diversas(os) frequências (comprimentos de onda), o que chamamos de espectro de corpo negro (Figura 5.18).

O espectro de emissão de radiação de um corpo negro já era bem conhecido. Porém, a teoria que explicava sua emissão funcionava bem apenas para elevados comprimentos de onda. Já para baixos comprimentos de onda, a quantidade de radiação emitida prevista divergia, isto é, a teoria previa um valor infinito na intensidade de emissão da radiação. Isto pode ser visto pela curva preta, representando a Teoria Clássica, e a comparando com as curvas vermelha, verde e azul na Figura 5.18.

Para resolver este 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 ν poderia ter qualquer energia. Planck propõe que uma onda eletromagnética de frequência ν pode ter apenas energias 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 energia, chamados de fótons. que carregam energia (E) proporcional à sua frequência (ν): $E = h\nu$.

Além disso, um elétron só poderia ser emitido de uma placa metálica - faíscas arrancadas - se recebesse de um único fóton energia maior ou igual à sua energia de ligação no metal.

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.

Einstein, ao explicar o efeito fotoelétrico em 1905, propôs que a luz pode se comportar como partícula (fóton), sem descartar sua natureza ondulatória evidenciada em fenômenos como a interferência. Sua contribuição foi fundamental para o surgimento do conceito de dualidade onda-partícula, que mais tarde seria formalizado na mecânica quântica e na teoria quântica de campos.

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

A partir dos nêutrons, elétrons e das descobertas de tantas outras partículas até a década de 1950, como os pósitros, múons, fótons e píons, os avanços científicos e tecnológicos 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 e George Zweig em 1964.

É importante fazermos uma reflexão sobre o que já discutimos no Capítulo 1. Muitas vezes pensa-se que teorias físicas são elaboradas para apenas 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

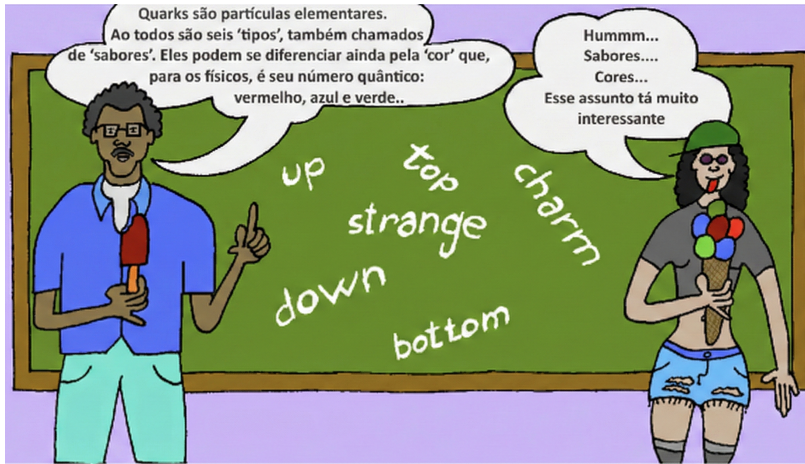


Figura 5.19: Quarks são partículas elementares e atualmente conhecemos seis tipos: up, down, charm, strange, top e bottom.

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 somente em 1956.

Yukawa propôs o pión (méson π) em 1935 e sua evidência experimental foi obtida apenas em 1947.

Dentre os mais recentes, 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.

5.4.1 Hádrons

Como mencionado anteriormente, na década de 1950 ocorreu um enorme avanço na física de partículas: muitas partículas foram detectadas e identificadas. Contudo, muitas dessas partículas 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, elas são bastante instáveis e decaem em outras partículas.

As partículas que são formadas por quarks são chamadas de hádrons. Do grego, hádron significa massivo, robusto, forte. Eles são classificados em duas categorias: 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 5.5. Assim, prótons e nêutrons são exemplos de hádrons. E como são compostos por três quarks, são exemplos de bárions.

Outro exemplo de hádron é o pión, 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 pions, com suas respectivas cargas elétricas, massas e tempos de vida.



Figura 5.20: Os antiquarks são as antipartículas dos quarks.

Tabela 5.1: Tabela de píons com algumas de suas respectivas características.

Nome	símbolo	carga elétrica	Massa (MeV/c ²)	Tempo de Vida (s)
píon	π^+	+1	139,6	$2,6 \times 10^{-8}$
píon	π^-	-1	139,6	$2,6 \times 10^{-8}$
píon	π^0	0	135,0	$0,9 \times 10^{-16}$

5.4.2 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 ou são férmions ou são bósons. Os férmions são partículas que possuem spin semi-inteiro; por outro lado, 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 pelos quarks que são férmions de spin igual a $1/2$. Então surge uma questão que vai nos revelar uma característica fundamental dos quarks. Partículas, como por exemplo a Δ^{++} , que é 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 (mesmo que tenhamos um par com spin $+1/2$ e $-1/2$, não haveria outra possibilidade para o terceiro quark) e estão no mesmo estado quântico, que é a própria partícula Δ^{++} .

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 Δ^{++} pode existir respeitando o Princípio de Exclusão de Pauli se os seus três quarks up possuírem cores diferentes entre si.

Assim como temos as cores, também temos as anticolors, e a analogia pode ser justamente criada através das cores primárias (Figura 5.21). Sendo o amarelo, ciano e magenta as anticolors. O branco pode ser entendido

como cor neutra, que com a combinação de cores dos quarks geram a cor neutra.

Analogamente, um méson é formado de um quark e um anti-quark, e precisa necessariamente ter carga de cor total nula (isto é, ser branco). Para tanto, temos combinações como vermelho e ciano, azul e amarelo e verde e magenta, como podemos perceber pelo diagrama da figura 5.21.

5.5 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 chamadas de *glúons*.

A força entre os quarks tem sua origem no *número quântico*. A cor é uma espécie de carga que origina a força forte, da mesma forma que a carga elétrica é fonte da interação eletromagnética. Apesar de o número quântico cor ter sido proposto para resolver questões associadas aos férmions do Princípio de Exclusão de Pauli, como mencionamos na seção anterior, a razão mais profunda da necessidade desse novo número quântico é de fato explicar a existência da força forte entre os quarks.

Os glúons são as partículas que fazem a mediação da força forte. Da teoria Cromodinâmica Quântica (QCD)[§], que é a teoria que estuda as 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 em inglês *glue*, que significa cola em português. Essa ideia de cola mantém os quarks unidos e não permite que eles sejam detectados isolados na natureza.

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.

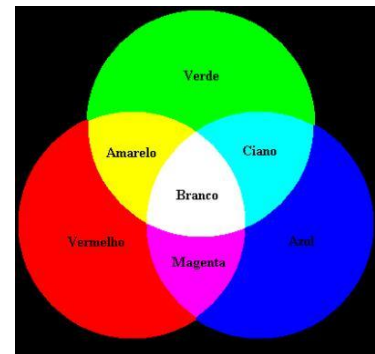


Figura 5.21: Cores primárias, suas anticolors e suas respectivas combinações para se atingir a cor branca (neutra).

Nucleons: partículas que compõem o núcleo atômico, isto é, os prótons e nêutrons.

[§] Sigla do inglês Quantum Chromodynamics (QCD).

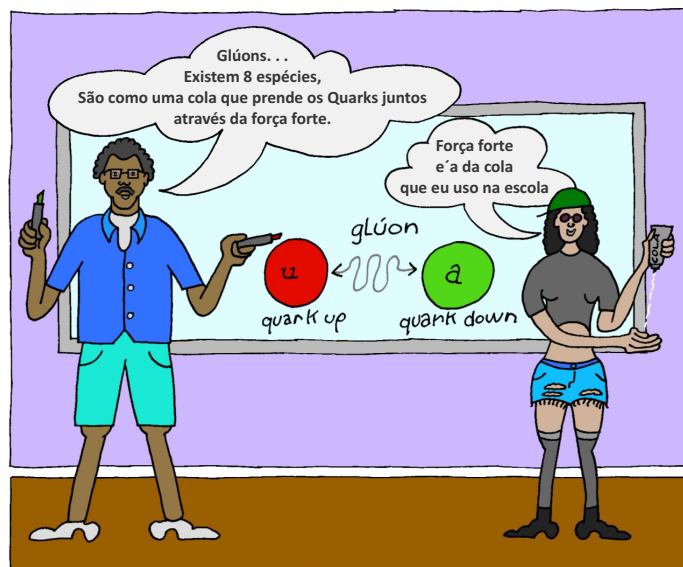


Figura 5.22: Existem 8 espécies (ou tipos) de glúons. São como uma cola que prende os quarks através da força forte.

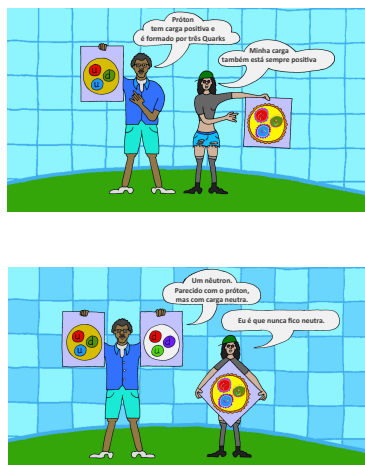


Figura 5.23: Representação de um próton. Não existe uma forma de enxergarmos um próton, então a criatividade é o limite. Ele tem carga positiva e é formado por três quarks de valência: (uud). Já o nêutron é parecido com o próton mas com carga elétrica neutra e formado por três quarks também: (udd).

5.6 Bósons W e Z

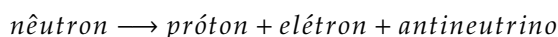
Até agora vimos que o fóton é a partícula mediadora da força eletromagnética e os glúons são as partículas mediadoras da força forte. Os fótons conseguem explicar as interações do eletromagnetismo: é através da troca de fótons entre as partículas carregadas que a força eletromagnética é sentida, gerando 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. A força nuclear fraca é a responsável pelos processos nucleares de decaimento radioativo, como o decaimento β , 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 início do século XX um dos tipos de radiação que os cientistas estavam estudando era a radiação β . 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.

Pauli 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 β . 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 eletrônico.



(5.5)

ou, equivalentemente:

$$n \longrightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

(5.6)

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 núcleons entre si, deveria haver outra força capaz de converter um nêutron em um próton juntamente com a emissão de um elétron e de um antineutrino. Mais tarde essa força foi nomeada de *força nuclear fraca*, em contraposição à força nuclear forte.

Vimos que temos seis sabores diferentes de quarks, que são conhecidos como: up, down, charm, strange, bottom 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 sabor dos quarks e dos 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.

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 suas 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 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.

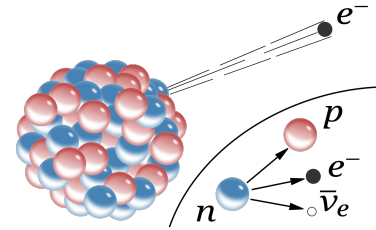


Figura 5.24: Decaimento Beta.
Fonte: Inductiveload, Wikimedia Commons.

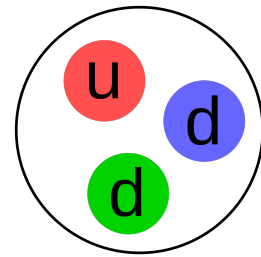


Figura 5.25: O nêutron é formado um quark up e dois quarks down.

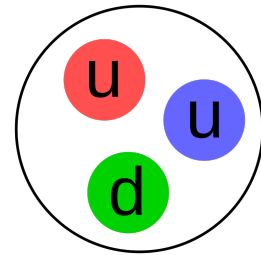


Figura 5.26: O próton é formado por dois quarks up e um quark down.

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

Tabela 5.2: Tabela dos Bósons de Gauge.

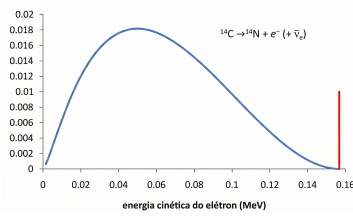


Figura 5.27: Energia esperada do elétron emitido no decaimento beta (vermelho) e o espectro de energia observado para o elétron (azul).



Figura 5.28: James Chadwick (1891-1974).



Figura 5.29: Enrico Fermi (1901-1954).

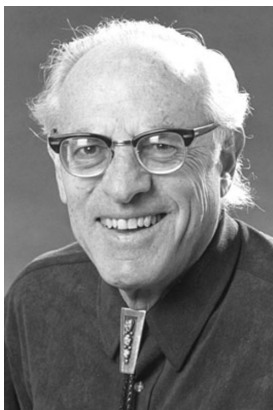


Figura 5.30: Frederick Reines (1918-1998).

5.7 Os neutrinos

Para completarmos o conjunto das partículas elementares previsto pelo Modelo Padrão da Física de Partículas, não podemos nos esquecer dos neutrinos! Os neutrinos são partículas que 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,

$$X_Z^A \rightarrow Y_{Z+1}^A + e^-, \quad (5.7)$$

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 referencial em repouso do núcleo original que irá decair,

$$E_e = \frac{1}{2m_x} (m_x^2 - m_Y^2 - m_e^2) c^2. \quad (5.8)$$

Entretanto, enquanto estudava o decaimento beta, James Chadwick (figura 5.28) 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 sugestão estética: a existência de uma outra partícula leve, neutra e fracamente interagente com a matéria sendo emitida no decaimento beta, juntamente com o elétron. Enrico Fermi (figura 5.29) 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 (figura 5.30).

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, John Bahcall calculou pela primeira vez o fluxo esperado de neutrinos provindos do Sol usando este modelo. Entretanto, 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 que será explorada nos próximos parágrafos.

Atualmente sabemos que existem três tipos (também conhecidos como *sabores*) de neutrino, um para cada lépton: neutrino eletrônico (ν_e), neutrino muônico (ν_μ) e neutrino tauônico (ν_τ). E pasmem: um neutrino

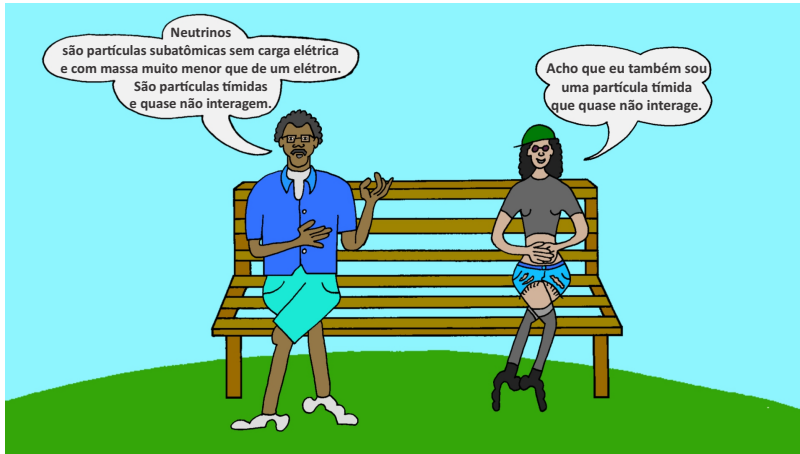


Figura 5.31: Neutrinos são partículas subatômicas sem carga elétrica e com massa muito menor que a de um elétron, é uma partícula tímida e quase não interage

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 2001, 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, confirmando assim a previsão teórica do Modelo Solar Padrão. 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, 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, sendo difíceis de serem detectadas. Vamos quantificar um pouco esta afirmação. O fluxo de neutrinos solares na Terra (ϕ) é de

$$\phi = 60 \times 10^9 \text{ } \nu \text{ /s /cm}^2. \quad (5.9)$$

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 desperta 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. A 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 com o que se chama 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 e 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 tipo de experimento abrirá o caminho para a compreensão do misterioso sumiço da antimatéria ao longo da história do universo.

Vamos encerrar esta seção 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!

5.8 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 fazem parte do grande colisor de hádrons (LHC [¶]).

A partícula de Higgs é fundamental para gerar a massa das partículas elementares.. Nosso entendimento teórico atual nos diz que para cada partícula elementar existe um campo associado. As partículas que detectamos são excitações destes campos fundamentais. O campo de Higgs, associado à partícula de Higgs, ao atingir seu valor esperado do vácuo gera a massa dos quarks e férmions ao interagir com eles. Quanto mais forte esta 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 o desenvolvimento de novas tecnologias para aumentar a energia dos aceleradores de partículas.

Mesmo com um acelerador tão potente como o LHC, que produz bilhões de colisões próton-próton por segundo, o bóson de Higgs é criado muito

[¶] Do inglês Large Hadron Collider.

raramente - apenas cerca de uma vez em cada bilhão de colisões. Além disso, ele decai instantaneamente, e apenas uma fração minúscula desses decaimentos resulta em um evento passível de ser identificado claramente no detector. Em 2012, após anos de coleta de dados, os experimentos ATLAS e CMS haviam acumulado, cada um, algumas centenas desses eventos candidatos ao Higgs. Foi o rigoroso tratamento estatístico, com forte auxílio de computação científica, que mostrou um excesso de eventos incontestável sobre as previsões, marcando assim a descoberta deste bóson fundamental.

O nome da partícula é uma homenagem ao físico Peter Higgs (figura 5.32), um dos físicos que descobriu o mecanismo que gera o valor esperado no vácuo do campo de Higgs, gerando consequentemente as massas das partículas. Este mecanismo ficou conhecido como quebra espontânea de simetria (ou mecanismo de Higgs), que possui implicações muito importantes.

Para que a teoria das interações eletromagnética e fraca funcionasse matematicamente, os físicos perceberam que, em energias extremamente altas, as partículas fundamentais (como quarks e léptons) precisavam ser descritas como se não tivessem massa. No entanto, no universo frio e de baixa energia em que vivemos, sabemos que essas partículas têm massa.

A solução para este aparente paradoxo veio com o mecanismo de Higgs (ou quebra espontânea de simetria eletrofraca). A ideia se fundamenta no campo de Higgs, que permeia todo o espaço. Em sua configuração de menor energia atual (valor esperado do vácuo), esse campo interage com as partículas, conferindo-lhes massa. Quanto mais intensa a interação, maior a massa da partícula.

Este mecanismo está diretamente ligado a um dos capítulos mais importantes da história cósmica: a transição de fase eletrofraca. Nos primórdios do universo, logo após o Big Bang, a temperatura e a energia eram tão altas que o campo de Higgs encontrava-se em um estado diferente do que o encontramos hoje. Nesse estado, ele não conferia massa às partículas. Além disso, as forças eletromagnética e fraca se manifestavam como uma única força unificada: a força eletrofraca.

Conforme o universo se expandiu e esfriou, ele cruzou um limiar crítico de temperatura. Foi então que o campo de Higgs atingiu seu estado de energia mínima atual (valor esperado do vácuo). Isto gerou duas consequências muito importantes: (i) as partículas fundamentais, ao interagir com o campo de Higgs adquiriram massa; (ii) a força eletrofraca, antes única, separou-se nas duas forças distintas que observamos hoje: a força eletromagnética e a força nuclear fraca.

Portanto, o bóson de Higgs, detectado no LHC, é muito mais que apenas 'a partícula da massa'. Ele é a evidência palpável deste campo e uma relíquia direta do momento em que as forças fundamentais e as propriedades da matéria adquiriram a forma que conhecemos.

Em 2013, Peter Higgs e François Englert (figura 5.33) ganharam o prêmio Nobel de Física por terem proposto este modelo, que se confirmou após a detecção do Bóson de Higgs.



Figura 5.32: Peter Higgs (1929-2024).

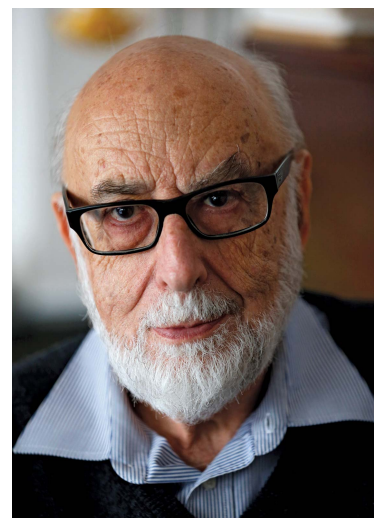


Figura 5.33: François Englert (1932-).

Como conversamos no capítulo do Modelo Padrão, as interações fundamentais são um dos pilares mais importantes que temos neste modelo. Esse capítulo será dedicado para 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 nuclear forte e a nuclear 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 a 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 funcionam essas interações.

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 conhecê-las melhor e identificar suas partículas mediadoras*. Já sabemos que existem quatro interações fundamentais: a eletromagnética (mediada pelo fóton), a força fraca (mediada pelos bósons Z^0 , W^+ e W^-), a força forte (mediada pelos glúons) e a força gravitacional. É importante destacar que ainda não existe uma teoria quântica da gravitação bem consolidada. Por isso, não temos uma partícula mediadora confirmada para a gravidade. Porém, caso seja descoberta, provavelmente será chamada de gráviton.

A interação eletromagnética é a responsável por quase todas as interações que vemos no dia a dia. Digamos que seu carro não está ligando e você chama seus amigos para te ajudarem a empurrar, quando vocês empurram a ideia que dá 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, nós 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.

* Se quiser entender melhor o funcionamento do Modelo Padrão, recomenda-se ler o Capítulo 4 *Modelo Padrão de Partículas Elementares: A melhor das teorias científicas*.

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 nós 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 eletrônico. Os decaimentos promovidos pela interação fraca têm por característica a emissão de neutrinos, que são 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.

Chamamos de raios cósmicos o fluxo incessante de partículas energéticas que bombardeiam a Terra vindas do espaço. Apesar do nome, não são raios: são fragmentos reais de matéria, ejetados de explosões estelares como supernovas ou de outros eventos cataclísmicos que ocorrem em nossa galáxia e fora dela. Cerca de 90% são prótons; 9%, núcleos de hélio; e o restante inclui núcleos pesados, como ferro, elétrons, antiprótons e pósitrons.

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, que buscavam comprovar sua real presença e possíveis efeitos.

Até então, acreditava-se que a radiação ionizante presente na atmosfera vinha de elementos do 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 estando a uma certa distância do solo. Porém, não conseguiu concluir que o efeito observado possuía relação com as interações originárias de elementos de fora da Terra.

Nos anos que se seguiram, diversos experimentos foram realizados para encontrar uma explicação da elevada radiação mesmo longe do solo. O físico Victor Hess decidiu realizar vários experimentos, em diversos horários e locais, utilizando-se de um balão de ar quente. Desta forma comprovou que a radiação não tinha origem em 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, estas partículas vindas do espaço colidiam com outras que já estavam presentes aqui em nossa atmosfera, dando origem, através de interações eletromagnéticas e nucleares, a novas partículas energéticas, que se chocavam com outras e davam origem assim aos chamados chuueiros atmosféricos (Figura 7.2).

Após esta descoberta, houve uma divisão de estudo dos raios cósmicos em dois campos. Um que utiliza a energia dessas partículas vindo do espaço para entender como a matéria se comporta; e o outro para entender qual a origem destes raios cósmicos.

Raios cósmicos podem ser usados de modo bem parecido como os grandes colisores de partículas. Neles, partículas são aceleradas até velocidades próximas à da luz e colidem com outras para que possamos investigar distâncias muito pequenas, onde as partículas elementares e suas interações são relevantes. Devido a alta energia que alguns raios

7.1 Início das pesquisas em Raios Cósmicos	61
7.2 Chuveiros Atmosféricos . .	61
7.3 Detecção	62



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 chuueiros atmosféricos. Fonte: Pierre Auger Observatory, disponível em: <https://www.flickr.com/photos/134252569@N07/21978580568/in/album-72157659225375559/>

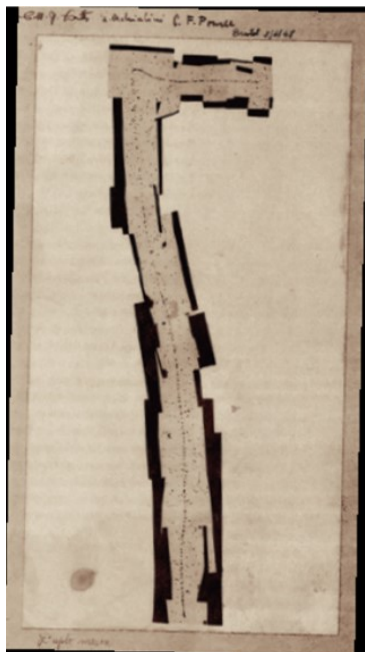


Figura 7.3: Decaimento Méson-Pi em Múon. (Assinado por: César Lattes, Cecil Powell e Giuseppe Occhialini)

cósmicos possuem, ao se chocarem com partículas no topo da nossa atmosfera, teríamos efeitos similares ao colisor de partículas ou até mesmo novos. A vantagem dos raios cósmicos é que podem ser muito mais energéticos e assim gerar resultados que ainda não conseguimos observar em aceleradores aqui na terra.

Apesar desta vantagem, os raios cósmicos tendem a ser imprevisíveis. Além disso, quanto maior a ordem de grandeza da energia, menor a sua incidência aqui na Terra. Com o avanço da tecnologia de aceleradores de partículas, parte da comunidade científica interessada em entender fenômenos de altas energias passou a ter uma preferência por este tipo de experimento.

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 a outra frente de pesquisa, sobre a origem dos raios cósmicos, e apesar de diversas teorias, ainda não se sabe ao certo a origem destas 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, onde 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 estas detecções, tanto no espaço como na superfície terrestre.

Como mencionado anteriormente, os raios cósmicos interagem com as partículas logo que elas chegam à atmosfera, sendo difícil estudá-las 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[35].



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

Os detectores de superfície são grandes tanques contendo água purificada e fotomultiplicadoras e funcionam pelo efeito Cherenkov [35]. 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 este efeito de *efeito Cherenkov*. Dessa forma, quando um raio cósmico, numa velocidade maior que a da luz na água, atravessa o tanque, um sinal luminoso é emitido, coletado e amplificado pelas fotomultiplicadoras. E assim se faz a análise dos dados coletados pelo experimento.

Como cada chuva atmosférica 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

com energia da ordem de 10^{20} eV pode gerar partículas filhas que chegam na atmosfera terrestre em uma área de até 16 km^2 [35], permitindo triangular a direção de chegada desse chuva atmosférico e obter outras informações, como energia de chegada da partícula mãe.

Estes 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 prejudicados por outros sinais indesejados.

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 chuva atmosférico.



Figura 7.5: Tanque de detecção Cherenkov.

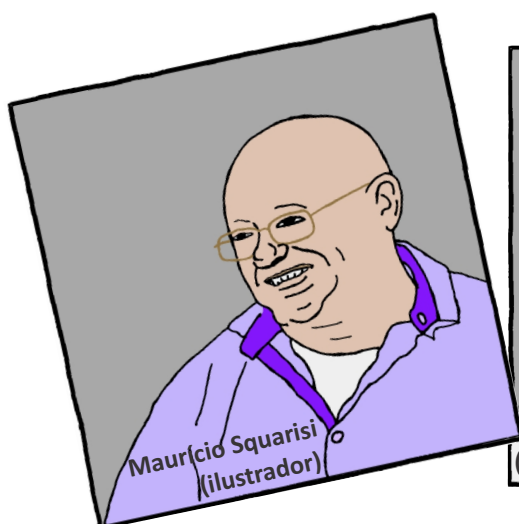
Fonte: Pierre Auger Observatory, disponível em: <https://www.flickr.com/photos/134252569@N07/19471252083/in/album-72157656013297308/>

Bibliografia

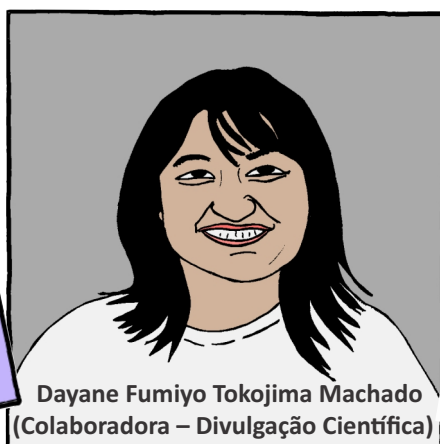
Aqui estão as citações em ordem de apresentação.

- [1] Monteiro, S. e Biato, E. C. L. "Uma avaliação crítica acerca de método e suas noções". Em: *Revista de Educação Pública, Cuiabá* 17.34 (2008), pp. 255–271.
- [2] Velanes, D. ""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. ISSN: 2177-8698. URL: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/searafilosofica/article/view/10782>.
- [3] Bachelard, G. *O novo espírito científico*. Saber da filosofia. Edições 70, 1990. ISBN: 9789724409153.
- [4] Popper, K. *A lógica da pesquisa científica*. Cultrix, 2004. ISBN: 9788531602368. URL: <https://books.google.com.br/books?id=MbGLmeMU3pMC>.
- [5] Kuhn, T. *A estrutura das revoluções científicas*. Coleção Debates. Perspectiva, 1997. ISBN: 9788527301114. URL: <https://books.google.com.br/books?id=NgrsSQAACAAJ>.
- [6] Cartier, J., Rudolph, J. e Stewart, J. *The Nature and Structure of Scientific Models. Working Paper*. Rel. técn. NCISLA, Wisconsin Center for Education Research, 2001. URL: <http://files.eric.ed.gov/fulltext/ED461513.pdf>.
- [7] Pūtaiao, S. L. H. P. A. *Scientific modelling*. Nov. de 2018. URL: <https://www.sciencelearn.org.nz/resources/575-scientific-modelling>.
- [8] Tiesinga, E. 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>.
- [9] Mazur, E. et al. *Principles & practice of physics*. Pearson, 2015.
- [10] Resnick, R., Halliday, D. e WALKER, J. *Fundamentos de Física Mecânica*. Vol. 1. 1991.
- [11] Halliday, D., Resnick, R. e Walker, J. *Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas E Termodinâmica*. Vol. 2. "Grupo Gen-LTC, 2000.
- [12] Halliday, D., Resnick, R. e Walker, J. "Fundamentos de Física, vol. 4: óptica e física moderna". Em: *"Livros Técnicos e Científicos Editora"* (2009), p. 25.
- [13] Ciência Todo Dia. *O Átomo de Bohr Explicado*. Youtube. 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=_GPrqg-NzCg.
- [14] Bauer, W., Westfall, G. D. e Dias, H. *Física para universitários: óptica e física moderna*. Bookman Editora, 2013.
- [15] Kotz, J. C. e Treichel Jr, P. M. *Química geral e reações químicas*. Pioneira Thomson Learning, 2005.
- [16] *Structure of atom: Discovery of electrons, protons and neutrons*. Ago. de 2020. URL: <http://padakshep.org/otp/subjects/chemistry/physical-chemistry/discovery-of-electrons-protons-and-neutrons/>.
- [17] Britannica.com. *Rutherford model*. Ago. de 2020. URL: <https://www.britannica.com/science/Rutherford-model>.
- [18] Toma, H. E. *Estrutura atômica, ligações e estereoquímica*. Vol. 1. Editora Blucher, 2017.
- [19] Levine, I. N. *Physical Chemistry*. The McGraw-Hill Companies, 2009.
- [20] Myers, R. J. e Mahan, B. M. *Química: um curso universitário*. Editora Blucher, 1995.
- [21] NobelPrize.org. *Niels Bohr – Photo gallery*. Jan. de 2021. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1922/bohr/photo-gallery/>.
- [22] Fermilab. *The Standard Model*. Youtube. 2012. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=XYcw8nV-GTs>.
- [23] Moreira, M. A. "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>.

- [24] Moreira, M. A. ““Partículas e Interações””. Em: *“Física na Escola”* 5.2 (2004), p. 5. URL: <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol5/Num2/v5n1a03.pdf>.
- [25] Kurzgesagt – In a Nutshell. *What is something?* Youtube. 2015. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=X9otDixAtFw>.
- [26] Silva, L. C. M. d., Santos, W. M. S. e Dias, P. M. C. “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](https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000100023).
- [27] Thomson, J. J. Em: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 44.269 (1897), pp. 293–316. doi: [10.1080/14786449708621070](https://doi.org/10.1080/14786449708621070). eprint: <https://doi.org/10.1080/14786449708621070>. URL: <https://doi.org/10.1080/14786449708621070>.
- [28] Niaz, M. “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.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(200005)37:5<480::AID-TEA6>3.0.CO;2-X). eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/%28SICI%291098-2736%28200005%2937%3A5%3C480%3A%3AAID-TEA6%3E3.0.CO%3B2-X>. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/%28SICI%291098-2736%28200005%2937%3A5%3C480%3A%3AAID-TEA6%3E3.0.CO%3B2-X>.
- [29] Atkins, P., Jones, L. e Laverman, L. *Princípios de Química - 7.ed.: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente*. Bookman Editora, 2018. ISBN: 9788582604625. URL: https://books.google.com.br/books?id=%5C_05yDwAAQBAJ.
- [30] Fauth, A. C. 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>.
- [31] Schutz, B. *A First Course in General Relativity*. 2ª ed. Cambridge University Press, 2009. doi: [10.1017/CB09780511984181](https://doi.org/10.1017/CB09780511984181).
- [32] Vieira, C. L. *Raios Cósmicos: Energias Extremas no Universo*. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2004. URL: http://www.cbpf.br/~desafios/media/livro/Raios_cosmicos.pdf.
- [33] Vieira, C. L. *César Lattes : Arrastado pela História*. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, 2019. URL: <https://www2.cbpf.br/pt-br/livros/cesar-lattes-arrastado-pela-historia>.
- [34] Ribeiro, A. R. et al. “Luz: História, Natureza e Aplicações”. Em: *Gazeta da Física* 39 (2016), pp. 6–13. URL: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/119>.
- [35] Pierre Auger Observatory. *A Detector Thirty Times the Size of Paris*. Mai. de 2021. URL: <https://www.auger.org/index.php/cosmic-rays/detection>.



Maurício Squarisi
(ilustrador)

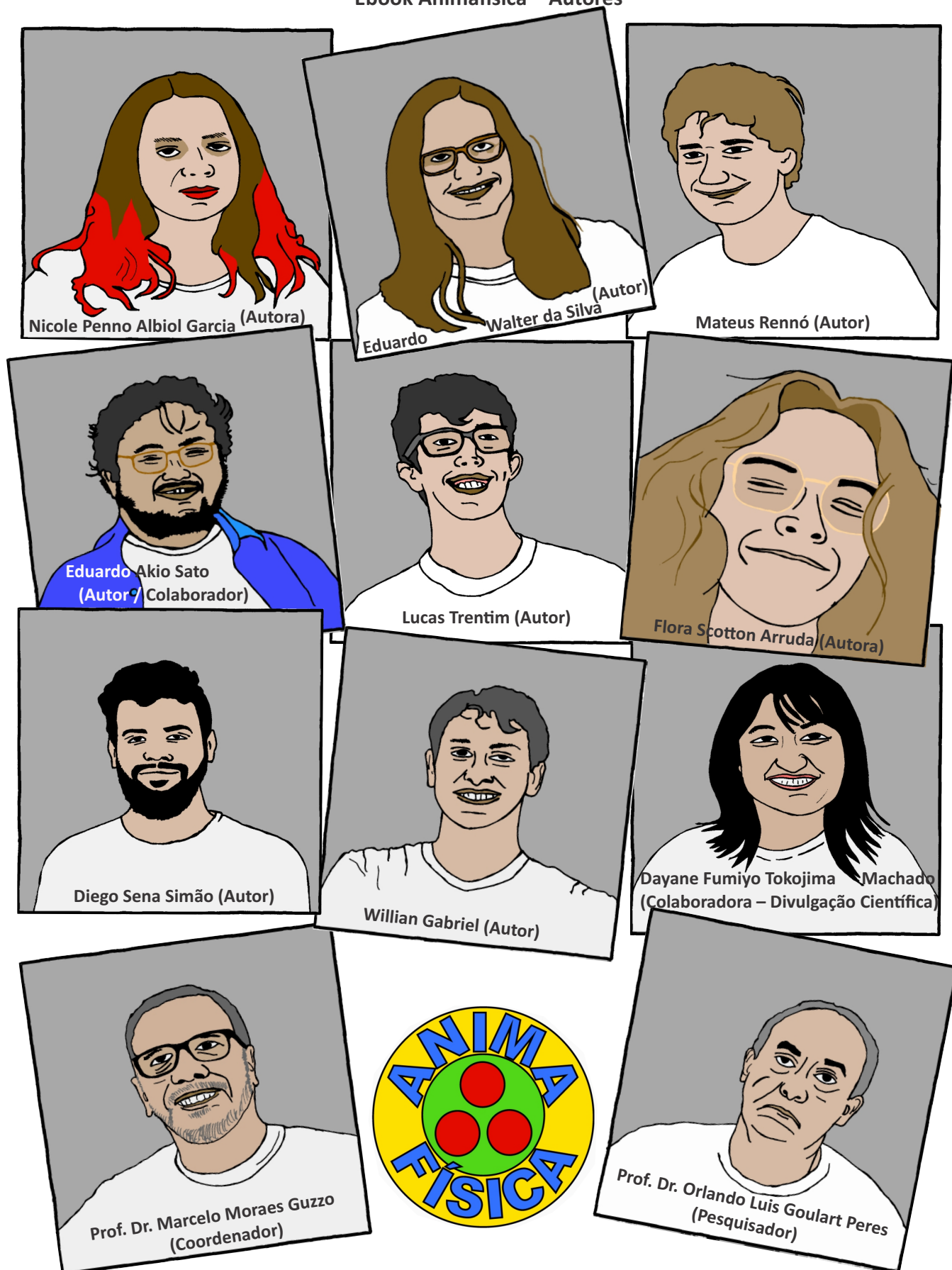


Dayane Fumiyo Tokojima Machado
(Colaboradora – Divulgação Científica)



Andréa Alves
(Revisora)

Ebook Animafísica – Autores



Este ebook faz parte do projeto Animafísica, uma iniciativa de divulgação científica ligada ao Projeto Temático ‘Desafios para o Século XXI em Física e Astrofísica de Neutrinos’, do Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW), da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Apoio: FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), GEFAN (Grupo de Estudos em Física e Astrofísica de Neutrinos) e DRCC (Departamento de Raios Cósmicos e Cronologia IFGW).

Animações e Ilustrações: Mauricio Squarisi - Núcleo de Cinema de Animação de Campinas
Revisão e Divulgação: Andréa Alves – A2N Comunicação