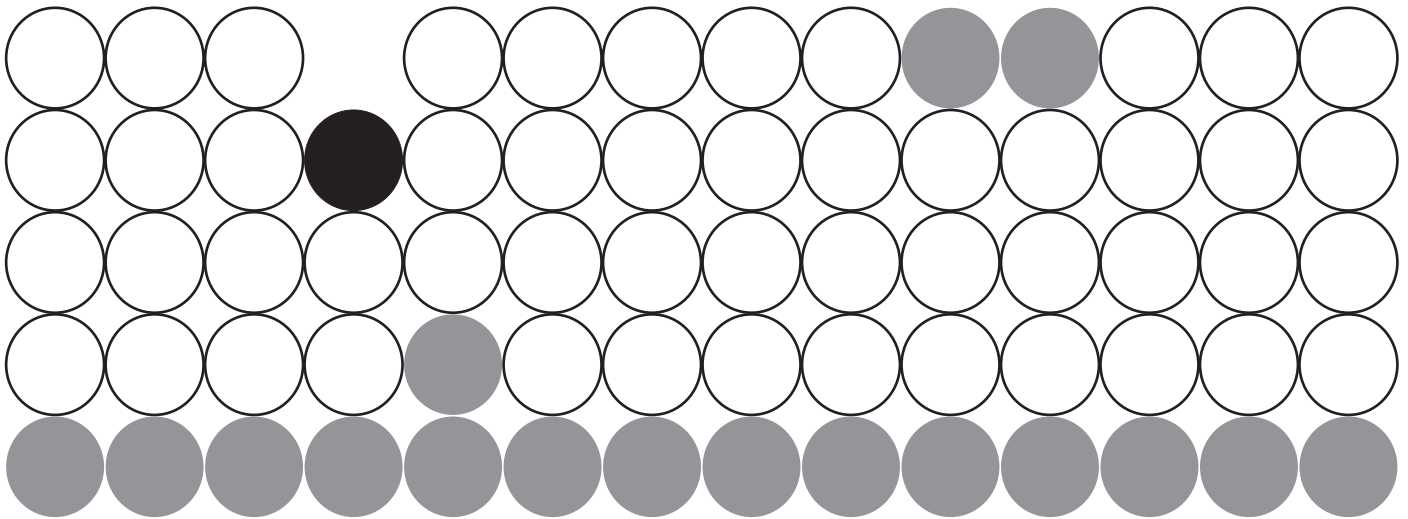


# TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

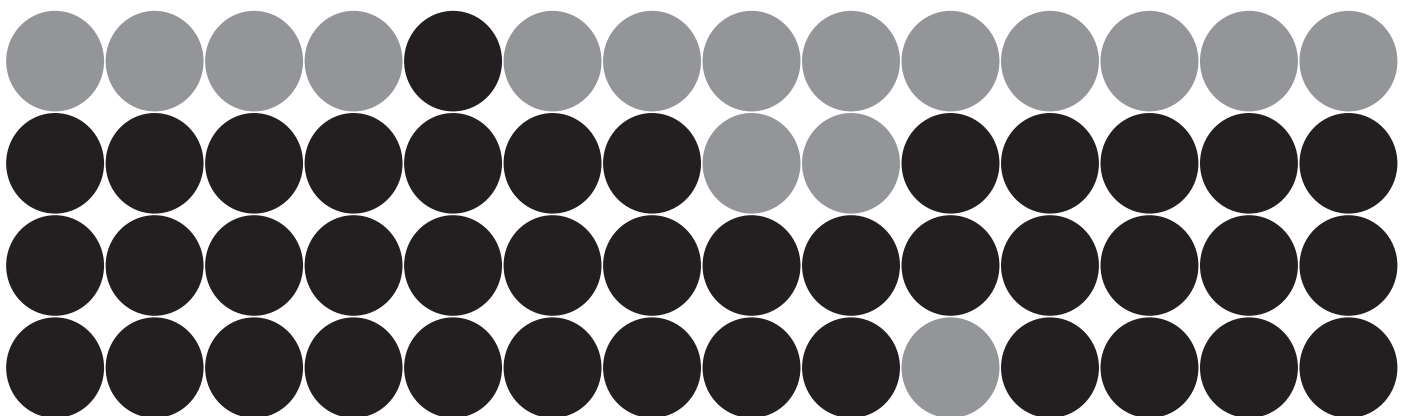
v. 22 n.6 2011

ISSN 1807-2763



Do átomo grego ao Modelo Padrão: os indivisíveis de hoje.

Lisiane Araujo Pinheiro  
Sayonara Salvador Cabral da Costa  
Marco Antonio Moreira



Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Textos de Apoio ao Professor de Física, v.22 n.6, 2012.  
Instituto de Física – UFRGS  
Programa de Pós – Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Editores: Marco Antonio Moreira  
Eliane Angela Veit

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Setor de Processamento Técnico  
Biblioteca Professora Ruth de Souza Schneider  
Instituto de Física/UFRGS

P654a Pinheiro, Lisiane Araújo

Do átomo grego ao Modelo Padrão : os indivisíveis de hoje  
/ Lisiane Araújo Pinheiro, Sayonara Salvador Cabral da Costa,  
Marco Antonio Moreira – Porto Alegre: UFRGS, Instituto de  
Física, 2011.

107 p.; il. (Textos de apoio ao professor de física / Marco  
Antonio Moreira, Eliane Angela Veit, ISSN 1807-2763; v. 22 , n.  
6)

1. Ensino de Física 2. Partículas elementares 3. História da  
ciência 4. Modelo padrão I. Costa, Sayonara Salvador Cabral  
da II. Moreira, Marco Antonio III. Título IV. Série.

PACS: 01.40.E

Impressão: Waldomiro da Silva Olivo  
Intercalação: João Batista C. da Silva

TEXTO DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

Do átomo grego ao Modelo Padrão: os indivisíveis de hoje.

Lisiane Araujo Pinheiro  
Sayonara Salvador Cabral da Costa  
Marco Antonio Moreira

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
UFRGS



## Sumário

1. Introdução.....	5
2. A contribuição dos gregos sobre a estrutura da matéria .....	6
2.1. As primeiras ideias gregas sobre a constituição da matéria .....	6
2.2. O Atomismo .....	9
2.3. A influência das ideias gregas sobre o constituinte básico da matéria em outras culturas .....	10
2.4. Condução das ideias gregas até a Idade Média .....	11
2.5. A alquimia .....	12
2.6. Uma análise epistemológica das ideias gregas sobre o constituinte básico da matéria .....	12
3. Séculos XVII e XVIII .....	13
3.1. A Revolução Científica.....	13
3.2. Uma Nova Ciência .....	16
3.3 A origem do conceito de carga elétrica.....	17
3.4. Bernoulli, a Teoria Cinética dos Gases e o átomo .....	18
3.5. Os primeiros passos da Espectroscopia para a teoria atômica .....	19
3.6. Os diferentes caminhos para a teoria atômica: a Eletricidade .....	19
3.7. Os diferentes caminhos para a teoria atômica: a Química.....	20
3.8. E no final do século XVIII.....	20
4. Século XIX.....	20
4.1. Uma nova observação .....	21
4.2. A teoria atômica de Dalton.....	21
4.3. Modificações na Tabela Periódica de Lavoisier .....	23
4.4. Contribuições da Espectroscopia: uma nova proposta .....	24
4.5. Contribuições da Eletricidade: uma nova proposta .....	24
4.6. A origem do conceito de campo na Física .....	25
4.7. Um modelo atômico preliminar .....	25
4.8. Contribuições da Biologia .....	25
4.9. Uma nova contribuição da Eletricidade.....	26
4.10. Uma nova contribuição da Teoria Cinética dos Gases .....	26
4.11. A Espectroscopia e as partículas subatômicas.....	27
4.12. O tubo de Geissler .....	28
4.13. A Teoria Cinética dos Gases e o conceito de átomo .....	28
4.14. O conceito de molécula.....	29
4.15. A retomada dos experimentos com o tubo de Geissler.....	29
4.16. A unificação proposta por Maxwell.....	29
4.17. A consolidação da Teoria Cinética dos Gases.....	30
4.18. Mais uma tentativa .....	30
4.19. A Tabela Periódica de Mendeleev .....	31
4.20. Novamente os tubos de Geissler .....	32
4.21. Mais um passo na direção da quantização .....	32
4.22. Os raios canais .....	33
4.23. Retomada dos trabalhos de Balmer.....	33
4.24. Os raios X .....	33
4.25. Novamente os raios catódicos .....	35
4.26. As primeiras observações sobre a Radioatividade .....	35
4.27. Ainda sobre a Espectroscopia .....	36
4.28. O elétron .....	37

4.29. A Radioatividade .....	40
4.30. Os raios alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ) .....	41
4.31. Mais uma confirmação sobre a existência dos elétrons .....	41
4.32. E no final do século XIX .....	42
5. Século XX .....	43
5.1. Ainda sobre as radiações .....	43
5.2. A transmutação radioativa .....	44
5.3. O nascimento da Física Quântica .....	44
5.4. O modelo atômico de Thomson .....	45
5.5. O modelo atômico de Nagaoka .....	48
5.6. A participação, mesmo que indireta, de Einstein .....	49
5.7. O cálculo da carga elétrica do elétron .....	51
5.8. O modelo atômico de Rutherford .....	51
5.9. O modelo atômico de Bohr .....	53
5.10. O modelo atômico de Sommerfeld .....	57
5.11. Consequências do modelo de Sommerfeld .....	58
5.12. O próton .....	58
5.13. O efeito Compton .....	59
5.14. O nêutron .....	59
5.15. O pósitron .....	61
5.16. O neutrino .....	63
5.17. Os nucleons e a força forte .....	65
5.18. As partículas estranhas e a estranheza .....	67
5.19. Classificando as partículas .....	68
5.20. Ainda a busca pelos neutrinos .....	68
5.21. Completando a classificação .....	69
5.22. E Dirac tinha razão .....	69
5.23. Uma nova proposta sobre a Interação Fraca .....	70
5.24. Mais neutrinos, a Interação Fraca e a unificação .....	71
5.25. Os quarks .....	72
5.26. Mais um lépton .....	76
5.27. Mais quarks .....	76
5.28. A confirmação dos bósons .....	77
5.29. E no final do século XX .....	77
6. Século XXI .....	81
6.1. Mais um lépton .....	81
6.2. O Modelo Padrão .....	82
6.2.1. As partículas fundamentais .....	82
6.2.2. As interações fundamentais .....	83
6.3. O futuro .....	85
6.3.1. O bóson de Higgs .....	85
6.3.2. O Modelo Padrão Supersimétrico (SSMs) ou Supersimetria .....	86
6.3.3. A Teoria das Cordas ou Supercordas .....	86
6.3.4. A matéria escura .....	87
6.3.5. A energia escura .....	88
6.3.6. A antimatéria .....	88
7. Considerações finais .....	89
8. Sobre a elaboração e utilização do texto “Do átomo grego ao modelo padrão: os indivisíveis de hoje” .....	90
8.1 Os referenciais teóricos envolvidos .....	91

8.2 Sugestões de atividades .....	91
8.2.1 O Discreto charme das partículas elementares: o organizador prévio. ....	92
8.2.2 Elaboração de uma “linha do tempo” a partir de uma análise crítica do texto “Do átomo grego ao modelo padrão: os indivisíveis de hoje” .....	92
8.2.3 Elaboração de mapas conceituais sobre partículas elementares.....	94
8.2.4 Considerações finais .....	95
Bibliografia.....	96
Apêndices.....	102
Apêndice 1: Questionário sobre Partículas Elementares e Interações Fundamentais	102
Apêndice 2: Questionário sobre o filme “O discreto charme das partículas elementares”. .....	105
Apêndice 3: Roteiro de discussão sobre a primeira parte do texto “Do átomo grego ao modelo padrão: os indivisíveis de hoje.” .....	106
Apêndice 4: Construção de um mapa conceitual .....	107





## Introdução

A busca pelo constituinte básico da matéria confunde-se com a História da humanidade, desde os sacerdotes da antiguidade, que consideravam a matéria obra de um poder mágico e sobrenatural, até os gregos, que racionalizaram o conhecimento e apresentaram uma das propostas mais conhecidas sobre este tema, a do *átomo* (do grego, a-negação, tomos-partes), que foi incorporada à ciência e persistiu durante vinte séculos.

Apenas no início do século XIX esta teoria foi retomada por Dalton que a reavaliou sob bases experimentais quantificadas, fomentando novas ideias e novas possibilidades de experimentos. A capacidade experimental do homem aumentou, suas teorias sobre a constituição da matéria mudaram, até os dias atuais em que a teoria considerada mais adequada para explicar a constituição da matéria é a teoria do *Modelo Padrão das partículas elementares*, que será discutida mais adiante.

A história do desenvolvimento científico e sua análise, feita por filósofos e epistemólogos, ensinam-nos que a teoria do *Modelo Padrão* não pode ser considerada como definitiva, mas como um modelo aperfeiçoado e condizente com o conhecimento compartilhado hoje por cientistas teóricos e experimentais.

A evolução dos modelos concebidos para explicar a estrutura da matéria vem ao encontro do pensamento do filósofo francês Gaston Bachelard<sup>1</sup> (1884-1962) sobre o conhecimento científico não ser estático, pelo contrário, estar em permanente questionamento, o que explica seu desenvolvimento a partir de revisão e aperfeiçoamento de teorias, gerando novas concepções de mundo.

Bachelard era licenciado em Matemática, trabalhou como professor de Ciências e Filosofia em nível médio. Em 1927 passou a atuar como professor de História e Filosofia da Ciência, em nível superior, na Universidade de Dijon e posteriormente na Universidade de Sorbonne [1].

Bachelard viveu em um período de grandes mudanças na Física: percebiam-se limitações na Mecânica Newtoniana e no Eletromagnetismo e presenciava-se o nascimento de Teoria da Relatividade e da Mecânica Quântica [1].

Conforme citado por Melo [1], Bachelard propõe que o pensamento científico estaria organizado em três grandes etapas históricas:

- Período pré-científico: desse período fazem parte a Antiguidade Clássica, os séculos XVI, XVII e o início do século XVIII.
- Período científico: esse período compreende os séculos XVIII, XIX e o início do século XX.
- A era do novo espírito científico: que teve seu início no ano de 1905, com a Teoria da Relatividade, proposta por Einstein. Esse trabalho representa a ruptura com paradigmas até então intocáveis. Compreende a pesquisa científica contemporânea.

Nesse sentido, o modelo atual ainda guarda resquícios dos primeiros modelos gregos datados do século VI a.C., aproximadamente, e de outros modelos que se sucederam e tiveram contribuições importantes. Além disso, o *Modelo Padrão* também não é considerado definitivo, pois mudanças estão acontecendo com ele; ainda que ele responda a muitas questões, não responde a todas suscitadas no presente momento. Um exemplo é a explicação para a interação gravitacional: o *gráviton*, partícula responsável por esta interação ainda é uma ideia, não foi detectada. Por outro lado, um novo modelo, chamado de *Supersimetria* está sendo elaborado, com base no *Modelo Padrão*.

---

<sup>1</sup> Gaston Bachelard é autor de obras sobre filosofia das ciências, como Epistemologia, A Filosofia do Não, entre tantas.

Este eterno movimento da ciência no sentido de valer-se de modelos que dêem conta de mais fenômenos conhecidos representa mudança, evolução; o conhecimento científico evolui, devido a novos experimentos, a novas ideias, sem esquecermos do que já foi feito.

Nesse texto, são apresentadas as concepções, do ponto de vista cronológico, que conduziram ao modelo de partícula elementar que é hoje compartilhado entre os cientistas, a do *Modelo Padrão*. Ao longo do texto são feitos comentários, considerados pertinentes pelos autores, comentários esses que se diferenciam no texto ao serem grafados em itálico. Esta análise histórica da evolução do conceito de partícula elementar também conta com comentários baseados na epistemologia bachelariana, na qual destacamos os períodos de rupturas e descontinuidades na história do conhecimento humano, assim como a importância da retificação do erro para o progresso da ciência. Também serão abordadas questões referentes à superação de obstáculos epistemológicos e a importância da recorrência histórica, ou seja, a análise de fatos do passado com um olhar contemporâneo dentre outros tópicos abordados por Bachelard. Essas análises conduzem a um conceito importante nesta epistemologia, o da transitoriedade da verdade, além da importância que Bachelard destacou em sua obra sobre o ensino de ciências, em particular, a Física.

O objetivo deste texto é subsidiar e motivar professores de Física a introduzirem em suas aulas tópicos de Física Contemporânea, em especial Partículas Elementares e Interações Fundamentais. O texto se propõe a fazer uma exposição baseada na história da ciência ao mesmo tempo que faz uma análise baseada na epistemologia de Bachelard. A proposta também contempla a participação das demais ciências na evolução do conhecimento científico, ressaltando que essa é resultado de uma construção humana. Desta forma pretende-se proporcionar uma visão mais crítica do desenvolvimento da ciência, contribuindo para desmistificar crenças equivocadas sobre a ciência, em geral.

## **2. A contribuição dos gregos sobre a estrutura da matéria**

### **2.1. As primeiras ideias gregas sobre a constituição da matéria**

Os gregos foram os primeiros filósofos da natureza que formaram ideias e criaram interpretações que podiam manter-se por si mesmas, sem invocar qualquer divindade para apoiar fraquezas ou obscurantismo em suas explicações [2]. Também foram os primeiros a registrar sua curiosidade sobre a constituição da matéria. O filósofo Tales de Mileto (624-547 a.C.) buscou explicar a natureza do mundo físico, tendo como questão motivadora em seus estudos: “*podem todas as coisas ser vistas como uma simples realidade, aparecendo em diferentes formas?*” [3, p. 2].

*Analizando essa pergunta nos dias atuais, podemos dizer que ela demonstra, além da curiosidade, algumas concepções dos filósofos gregos sobre a constituição da matéria. Por exemplo, a simplicidade, que era uma das características esperadas para o constituinte básico da matéria, pois, imaginavam que tudo poderia reduzir-se a um único princípio.*

Por meio de uma análise racional da natureza, Tales procurou compreendê-la, deduzindo teorias a partir da observação e da experiência [2]. Seus estudos levaram-no a propor a *água* como constituinte básico da matéria. A escolha da água pode ter duas origens: uma delas, a sua importância para a vida de todos os seres vivos; a

outra, uma perspectiva da criação do mundo difundida na Índia e na Babilônia<sup>2</sup> [4]. Provavelmente esta última ideia tenha sido incorporada à cultura grega por meio de textos provenientes da Babilônia, pois, além do grande comércio, também existia um intenso intercâmbio cultural entre os povos do Mediterrâneo [2].

*A escolha pela água reflete os ideais de Tales, dentre os quais está que o constituinte básico da matéria seria um elemento passível de observação, que fizesse parte do mundo dos sentidos e que estivesse presente em todos os corpos. O tipo de análise feito por Tales, observado sob um olhar atual, indica que, para o homem grego, não bastavam apenas as explicações místicas; ele ansiava por explicações racionais. A procura pela racionalização do conhecimento talvez tenha sido o maior legado de Tales.*

Na busca por explicações sobre a constituição básica da matéria, o filósofo Anaximandro de Mileto (610-547 a.C.), discípulo de Tales, propôs o *apeiron* (do grego - indefinido). Segundo ele, o *apeiron* não seria uma substância material, e faria parte de uma realidade imperceptível aos sentidos. Esta substância deveria ser eterna, indestrutível e infinita. Também deveria ser dotada de um movimento eterno, que lhe permitiria gerar diferentes formas e corpos, numa eterna dança de criação e destruição. Essa dança seria protagonizada por opostos, como o frio e o calor, por exemplo, que buscavam o equilíbrio. Assim como Tales, Anaximandro também usou a perspectiva difundida na Índia e na Babilônia sobre a criação do mundo, segundo a qual a substância fundamental da matéria poderia dividir-se, o que geraria duas substâncias contrárias [4].

*Apesar de Anaximandro ser discípulo de Tales, sua contribuição sobre a constituição da matéria foi completamente diferente da do mestre. Tales propôs um elemento material e perceptível aos sentidos, enquanto Anaximandro propôs uma substância eterna, que não fazia parte do mundo perceptível aos homens. Analisando essa proposta nos dias atuais, ela sugere uma nova concepção sobre o constituinte fundamental da matéria; pois admite que exista um mundo em que o homem não tem acesso pelos sentidos, esses, tão importantes para Tales.*

O filósofo Anaxímenes de Mileto (585-525 a.C.), possível discípulo de Anaximandro, propôs como possível constituinte básico da matéria uma substância composta de minúsculas partículas, capazes de estar em todos os lugares. Ele usou a palavra *ar* para designar esta substância, pois a comparava com o ar, que está presente em todos os lugares [2]. A observação de processos de rarefação e condensação também o levou a esta conclusão [2, p. 71]. Esses processos foram importantes na sua proposta filosófica (*Filosofia dos Contrários*) porque seriam responsáveis pelo movimento.

*Anaxímenes assume as ideias de Anaximandro quando propõe que o componente básico da matéria poderia ser uma substância imperceptível aos sentidos humanos. A originalidade de sua ideia está na proposta de que esta substância seria composta por minúsculas partículas inacessíveis aos sentidos, o que justificaria a concepção, já comentada anteriormente, de que poderia existir uma realidade além daquela que os sentidos poderiam perceber.*

Na filosofia de Parmênides de Eléia (515-450 a.C.), a natureza era representada pela estagnação. O *Ser* preencheria todo o Universo, e seria imutável e estável; já o *Não-Ser* seria mutável e representaria o movimento [2]. Parmênides interpretava o *Ser* como a matéria presente no Universo, e o *Não-Ser* como o vácuo.

---

<sup>2</sup> Na Índia, difundiu-se uma proposta para explicar a criação do mundo que se baseava na *água* como elemento gerador dos demais. Assim, se propunha que essa substância poderia dividir-se em duas substâncias contrárias. A origem dessa ideia pode ser justificada pela necessidade de se explicar que a toda qualidade se opõe um contrário [4, p. 2].

*Aqui se percebe o maior dos ideais gregos, defendido fortemente pela escola pitagórica - o da perfeição. Parmênides interpretou o Universo como imutável, por ser perfeito, logo não necessita de mudanças. Também podemos perceber, como comentado anteriormente, a importância das ideias difundidas na Índia e Babilônia, sobre a criação do mundo, pois já se discutia a importância da relação entre os opostos.*

A influência da escola pitagórica, fundada por Pitágoras de Samos (570-480 a.C.), pode ser encontrada mesmo entre filósofos que não fizeram parte diretamente de sua escola. Pitágoras ficou conhecido por seus trabalhos matemáticos, que sofreram grandes influências da Babilônia. Sua maior contribuição para a filosofia grega foi o seu amor pela beleza e pela simetria, duas qualidades exaltadas pelos filósofos que deram contribuições sobre a constituição da matéria. Apesar de tentar racionalizar seus estudos, esses estavam impregnados de misticismo [2].

O filósofo Heráclito de Éfeso (540-475 a.C.) apresentou o Universo (ou a natureza) por meio de duas forças opostas que procuravam o equilíbrio por meio do movimento eterno [2].

*Parmênides e Heráclito apresentam-se com posições totalmente antagônicas; enquanto Parmênides acreditava na imutabilidade, Heráclito propõe que o Universo está em eterno movimento.*

O filósofo Melisso de Samos (490-450 a.C.), cerca de um século depois, divide com Anaximandro a opinião de que o constituinte básico da matéria não faria parte do mundo dos sentidos.

Uma ideia um pouco diferente das demais foi apresentada por Anaxágoras de Clazômena (500-428 a.C.). Para este filósofo, a matéria seria composta de pequenas partes, as *sementes*, que continham porções extremamente pequenas de tudo aquilo que existe no mundo visível. Elas seriam infinitamente divisíveis e, quando organizadas de diferentes formas, explicariam a grande diversidade de matéria que encontramos [4].

*Até aquele momento, a maioria dos filósofos parecia aceitar a ideia de que apenas um elemento seria responsável pela existência de tudo que existe no Universo. Talvez a concepção mais diferenciada fosse a das “sementes” de Anaxágoras, pois apesar dessa ideia ser muito próxima das ideias anteriores, ele sugere que as sementes são compostas por pequenas porções de tudo o que existe no mundo. É difícil imaginar o que Anaxágoras quis dizer com isso, mas esta pluralidade proposta para o que estava dentro das “sementes” abriu caminho para a filosofia de Empédocles de Agrigento (492-432 a.C.).*

Esse foi o filósofo que fez uma proposta diferente para explicar a origem da matéria. Segundo Empédocles, não existia um, mas quatro elementos responsáveis por formar toda a matéria: a *água*, o *ar*, a *terra* e o *fogo*. Esses elementos seriam unidos por meio do *amor* e separados pelo *ódio*, que eram os representantes da *Filosofia dos Contrários* de Anaxímenes.

*Analisando a proposta de Empédocles, verifica-se sua ruptura com a ideia de que a matéria seria formada por um único elemento. Também verifica-se que a proposta do eterno movimento para estabelecer o equilíbrio é novamente adotada.*

*Na visão grega que perdurou, a partir de Tales, aproximadamente por dois séculos, as ideias mais polêmicas foram as que admitiam interpretações antagônicas: a existência de uma realidade imperceptível os sentidos em oposição a um mundo formado apenas por elementos capazes de serem identificados; o movimento perpétuo do Universo versus o repouso, a unidade e a pluralidade do componente básico da matéria, por exemplo. Este impasse entre as teorias existentes levou ao atomismo.*

## 2.2. O Atomismo

O atomismo surgiu da impossibilidade do mundo ser explicado com as teorias disponíveis. Possivelmente, as teorias de Parmênides e Heráclito tenham sido as grandes motivadoras para a elaboração dessa teoria, pois se buscava uma alternativa entre as propostas anteriores [2].

O filósofo Leucipo de Abdera (500-450 a.C.) propôs que o constituinte básico da matéria seria formado por partículas minúsculas e indivisíveis, as quais denominou *átomos* (do grego, a-negação, tomos-partes). Em sua teoria, Leucipo apresentou o mundo composto apenas por *átomos* e pelo vazio. Os *átomos* formavam as substâncias, infinitas em número e forma, e seriam extremamente pequenos e por isso não poderiam ser divididos. O *átomo* seria a menor quantidade de matéria existente na natureza. Um *átomo* era imutável, mas um conjunto de *átomos*, arranjado de maneiras diferentes poderiam formar várias formas de matéria [4].

Pouco se sabe sobre a história de Leucipo, o que ensinou ou quais foram as fontes de suas ideias; todas as informações disponíveis foram relatadas por seu discípulo, o filósofo Demócrito de Abdera (470-380 a.C.). É provável que Leucipo tenha estudado as ideias de seus antecessores e, com estas propostas, elaborado o conceito de *átomo*. Para formular esse conceito, Leucipo aceitou a existência do vazio, também admitiu que o mundo era dotado de um eterno movimento e postulou a existência dos *átomos* como participantes deste movimento. Um século depois, o filósofo Epicuro de Samos (341-270 a.C.) também foi um defensor do atomismo (Caruso e Oguri, 2006).

Nessa teoria, o *átomo* e o vazio coexistiam pacificamente, pois ambos eram as causas de tudo o que existe. A interpretação dada ao vazio era a de que ele serviria como sustentação para o movimento dos *átomos*. Esse movimento foi justificado como proveniente das colisões entre os *átomos*, contudo as causas destas colisões não foram explicadas [4].

*Assim, Leucipo apresentou o mundo formado por matéria e o vazio, onde podemos encontrar o movimento, nos diversos arranjos possíveis para um conjunto de átomos, e a imutabilidade de um único átomo. Analisando essa proposta nos dias atuais, podemos dizer que Leucipo elaborou uma explicação que agregou as duas visões difundidas, anteriormente, por Parmênides e Heráclito.*

Apesar de explicações incompletas, a teoria atômica reuniu adeptos mesmo sem uma comprovação, pois a ciência grega da antiguidade não exigia a comprovação experimental, uma vez que os gregos acreditavam que a experiência era um momento particular, finito e imperfeito, já as ideias, eram eternas e perfeitas. Por este motivo, a sociedade grega aceitava as ideias postuladas por seus filósofos sem exigir sua comprovação.

Demócrito e Epicuro postularam a existência de propriedades para os *átomos*. Defendiam a indivisibilidade do *átomo* proposta por Leucipo, mas a justificavam de maneira diversa. Para Demócrito, o *átomo* era indivisível porque não continha um vazio intrínseco; já para Epicuro, a indivisibilidade era devido à dureza do *átomo*. O tamanho e o formato seriam, para Demócrito, as propriedades capazes de diferenciá-los; também acreditava que existiria um número infinito de formas para o *átomo*. Para Epicuro, o peso seria a característica capaz de diferenciar os *átomos* [4].

Apesar de, aparentemente, o atomismo responder a muitas perguntas, contudo, os *átomos* não ocuparam um lugar permanente no desenvolvimento da ciência grega [2].

*Atualmente, analisando a teoria atômica, podemos perceber a influência de teorias antecessoras; por exemplo, a teoria atômica incorpora a concepção de*

*Anaximandro de que o constituinte básico da matéria é inacessível aos sentidos. As ideias de Parmênides também podem ser reconhecidas através do antagonismo representado pelos átomos e pelo vazio. Também é possível reconhecer as ideias de Anaxágoras na elaboração do conceito de átomo, pois ele propôs as sementes como constituinte básico da matéria; essas estão muito próximas da concepção atual de átomo; assim como a proposta de indivisibilidade presente na teoria de Leucipo que ainda se mantém para o conceito de partícula elementar. E a capacidade dos átomos de se reorganizarem conduz à ideia de Empédocles dos quatro elementos se organizando de formas diferentes para formar novos elementos. Assim, percebe-se, como já foi dito anteriormente, que a construção das teorias para explicar a constituição da matéria pelos gregos antigos, não exclui as propostas anteriores e serão reeditadas, de certa forma, na concepção atual de partícula elementar. As novas teorias são baseadas ou parcialmente baseadas nas suas antecessoras.*

### **2.3. A influência das ideias gregas sobre o constituinte básico da matéria em outras culturas**

Os povos da antiguidade eram hábeis construtores; antes mesmo de surgirem as primeiras civilizações urbanas, já conheciam um grande número de técnicas, instrumentos e habilidades. Apesar desses conhecimentos, não há registros de interesse ou novas ideias destes povos em compreender a constituição da matéria; os que tentaram responder a essa pergunta basearam-se nas ideias gregas [2]. Os chineses, por exemplo, adotaram uma teoria que usava cinco elementos básicos para tentar explicar a constituição da matéria. Segundo os moístas<sup>3</sup>, os cinco elementos que formavam toda a matéria eram: a *água*, o *metal*, a *madeira*, o *fogo* e a *terra* [2, p. 24]. Esses elementos não foram considerados como simples substâncias, mas eram interpretados como “*princípios ativos*”; nesse sentido, por exemplo, a *água* era caracterizada por molhar e pelo movimento descendente, o *fogo* foi associado com o aquecer e pelo movimento ascendente, a *madeira* e o *metal* poderiam ser moldados por meio da escultura e pela fundição, respectivamente. E a *terra* era caracterizada pela produção de vegetação. Esses elementos, juntamente com as forças fundamentais, *Yin* e *Yang*<sup>4</sup>, poderiam apresentar uma multiplicidade de associações no mundo natural [2, p. 25]. Os moístas divulgaram estas ideias, aproximadamente, no século IV a.C., contudo elas não tiveram grande aceitação. No século I a.C., o Budismo trouxe para a China as ideias gregas sobre a existência dos átomos, mas o interesse chinês estava voltado para as relações entre as forças *Yin* e *Yang* [2, p. 26].

Posteriormente, os indianos conheceram as ideias gregas e as adotaram como base para suas teorias sobre a constituição da matéria. Na teoria atômica indiana, elaborada, aproximadamente, no final do século XI, a matéria era composta por quatro elementos, a *terra*, a *água*, o *ar* e o *fogo*, e uma *quinta essência celeste*. Segundo essa teoria, cada um dos elementos tinha sua própria classe de átomos, que eram indivisíveis e indestrutíveis. Átomos diferentes não podiam entrar na combinação, mas átomos semelhantes, sim, contanto que estivessem na presença de um terceiro. Dois átomos podiam causar um “*efeito*”, um *dyad*, enquanto três desses efeitos podiam produzir um efeito de outra natureza, um *triad*. Assim, a causa produzia um efeito, mas era imediatamente absorvida pelo efeito que fizera surgir, o qual, por sua vez, assumia a função de causa, e assim a sequência continuava. O modo pelo qual os primeiros

---

<sup>3</sup> Os moístas constituíam uma escola de pensadores chineses, seguidores de Mo Ti (século V a. C.), que tentaram elaborar uma lógica fundamental científica [2, p. 22].

<sup>4</sup> Filosofia chinesa que explica o Universo por meio da interação entre duas forças complementares: o *Yin* representa o princípio passivo e o *Yang* o princípio ativo.

efeitos *dyads* geravam um *triad* dava origem, como se pensava, a diferentes qualidades de uma substância [2, p. 77]. Essa organização dava início a um processo cíclico, onde a causa tornava-se um efeito, e esse passava a ser a causa.

A teoria atômica indiana mostrou-se mais complexa do que as teorias desenvolvidas no ocidente, até aquele momento. A atenção dada para as relações de causa e efeito atraiu a atenção dos pensadores indianos até o século XVIII.

*Segundo Bueno [5], analisar a cultura oriental, tendo como parâmetro a cultura ocidental, não é uma tarefa fácil. Conceitos que são importantes na cultura ocidental podem simplesmente não ter significado na oriental. A tentativa de aproximar as duas culturas pode ter o efeito inverso por esse motivo. Para podermos compreender a cultura do oriente devemos lembrar que ela tem uma origem muito diferente da nossa. A maioria dos valores e concepções orientais tem uma origem universalista, que prioriza o espírito humano. E essa diferença cultural pode ser vista na forma como os orientais explicavam a origem da matéria; sua interpretação é muito diferente da ocidental. Suas idéias envolvem aspectos, que nem foram imaginados no ocidente.*

## **2.4. Condução das ideias gregas até a Idade Média**

Como foi dito anteriormente, os ensinamentos de Pitágoras influenciaram muito a filosofia grega; um exemplo marcante dessa influência foi protagonizado pelo filósofo Platão de Atenas (427-347 a.C.), que adotou uma visão geométrica para o mundo. Platão associou os poliedros regulares da Geometria, estudados pelos pitagóricos, aos quatro elementos da filosofia de Empédocles (seção 2.1). Essas associações não foram aleatórias; Platão relacionava o poliedro com as características do elemento. Por exemplo, o *fogo*, por ser um elemento penetrante, foi relacionado ao tetraedro, que tem pontas mais penetrantes. Nesta filosofia, os elementos eram mutáveis, pois poderiam ser rearranjados de forma a se modificarem [4].

*Como comentário, podemos dizer que essa interpretação resgatou a ideia de movimento eterno, proposto por seus antecessores, pois sugere que os elementos poderiam se converter uns nos outros. Esse conceito foi muito importante para o desenvolvimento da Alquimia e está presente hoje na chamada Física de Partículas<sup>5</sup>, como veremos mais adiante. Na filosofia de Platão também se revive a ideia de que os elementos que formavam a matéria deveriam ser visíveis e deveriam estar presentes na natureza.*

*As ideias dos filósofos gregos apresentadas demonstraram um ponto em comum: a busca pela simetria da natureza. Segundo esses pensadores a natureza deveria apresentar padrões de regularidade. Por exemplo, partindo da proposta de Leucipo, a natureza apresentaria uma proporção harmoniosa entre átomos e o vazio, de forma que ambos coexistiriam em harmonia. Assim como os elementos básicos de Empédocles, em proporções exatas e harmoniosas, formariam toda a matéria. Ao longo do desenvolvimento científico vamos perceber o quanto essa ideia foi importante para a elaboração da teoria mais aceita atualmente sobre as partículas elementares.*

Contudo, a influência de Aristóteles de Estagira (384-323 a.C.) provocou um abandono das antigas ideias gregas sobre o atomismo, em especial, a teoria atômica proposta por Leucipo: foi contrário a muitas das posições aceitas no estudo da constituição da matéria, por exemplo, não admitindo a existência do vácuo, considerando de extrema importância o uso dos sentidos como fonte de conhecimento e negando o valor dos opostos.

*Estas ideias justificam porque ele não admitiu a existência dos átomos propostos por Leucipo.*

---

<sup>5</sup> Também conhecida como Física de Altas Energias.

Segundo Aristóteles, no mundo existiriam quatro “qualidades”, que se subdividiriam em *ativas*, representadas pelo *quente* e pelo *frio*, e *passivas*, representadas pelo *seco* e *úmido*. Quando uma qualidade *passiva* se combinava com uma *ativa*, a matéria primordial era gerada. Na filosofia aristotélica, a matéria primordial era representada pelos quatro elementos de Empédocles (*água, ar, fogo e terra*). Essas transformações representavam o movimento, já preconizado em teorias anteriores [4].

As ideias de Aristóteles chegaram até São Tomas de Aquino que as conciliou com os dogmas da Igreja Católica e as divulgou por todo o mundo Cristão durante a Idade Média. Elas fizeram parte do corpo de conhecimentos questionado por muitos filósofos que foram condenados pela Inquisição. As ideias gregas sobre a constituição da matéria só ressurgiram com o início do Renascimento<sup>6</sup>, quando foi redescoberto o poeta grego Lucrecio (98-55 a.C.) e seu poema *De Rerum Natura (Sobre a Natureza das Coisas)*. Os Livros I e II desse poema falam sobre o atomismo e sua relação com a natureza, e procuram explicar que toda a matéria pode ser reduzida a átomos e vazio [4, p. 16], retornando as concepções da teoria atômica.

## **2.5. A alquimia**

Enquanto as questões referentes à Física foram submetidas às ideias de Aristóteles, as questões referentes à Química foram representadas pela Alquimia. A Alquimia era um conjunto de práticas, técnicas e conhecimentos sobre a natureza que tinham como objetivo sua compreensão. Ela já era praticada desde a antiguidade, mas foi na Idade Média que seus olharem se voltaram para a constituição da matéria. A inspiração destes alquimistas veio das ideias difundidas pelos alquimistas árabes e também das ideias de Empédocles (seção 2.1). Segundo a alquimia árabe, os elementos do Universo deveriam encontrar-se em princípios ou qualidades das substâncias e não nas substâncias em si. Segundo esta interpretação, o enxofre (S) era o princípio da combustão (fogo), o sal tinha a propriedade da calcinação<sup>7</sup> (terra), entre outras relações [6, p. 75].

*A Alquimia foi a precursora da Química Moderna, que juntamente com a Física apresentou evidências importantes sobre a existência dos constituintes fundamentais da matéria.*

## **2.6. Uma análise epistemológica das ideias gregas sobre o constituinte básico da matéria**

*Por meio da análise das ideias dos primeiros filósofos gregos, percebe-se a evolução, sem o abandono das propostas anteriores; nenhuma foi completamente esquecida, mas foram sendo aperfeiçoadas. O que nos leva a uma reflexão baseada nas ideias de Bachelard e da sua “filosofia do não”. Segundo Bachelard, o desenvolvimento científico ocorre por meio de constantes rupturas e reconciliações. A diversidade das ideias sobre a constituição da matéria apresentadas pelos gregos antigos representa as constantes rupturas relatadas por Bachelard; já as reconciliações podem ser identificadas quando uma proposta agrega componentes de sua antecessora ou concorrente. Por exemplo, Anaximandro propõe o “apeiron” como constituinte básico da matéria; seu discípulo, Anaxímenes propõe uma substância que ele chama de “ar”. Anaxímenes rompe com a proposta de Anaximandro quando propõe outra substância como constituinte básico da matéria; no entanto, não discorda que a*

<sup>6</sup> Conjunto de transformações culturais, políticas, sociais e econômicas ocorridas na Europa ocidental a partir do século XII.

<sup>7</sup> Aquecimento de um composto em que se provoca a decomposição sem oxidação.



*matéria deveria ser formada por uma substância inacessível aos sentidos humano, promovendo a reconciliação da nova proposta com a anterior.*

*O atomismo também pode ser citado como exemplo de rupturas e reconciliações propostas na teoria de Bachelard. Pois ele surgiu, como foi dito anteriormente, da impossibilidade das teorias existente em explicar adequadamente o que era o constituinte básico da matéria; rompendo assim com as propostas anteriores. No entanto, reconcilia-se com as mesmas no momento em que agrega a sua estrutura teórica ideias das antecessoras, promovendo assim o desenvolvimento científico [7]. É importante ressaltar que a “filosofia do não” de Bachelard não promove a negação do conhecimento anterior, pelo contrário, ela promove uma reconciliação entre o conhecimento anterior e a nova proposta.*

*Bachelard também destaca que, na ciência, não existem princípios intocáveis, pois suas verdades não são totais e acabadas. Essa observação é importante para a evolução da ciência, pois não existe “a teoria correta”, existe a mais adequada para o momento histórico e social de uma sociedade [7]. Daí a importância de conhecermos a história e a filosofia da ciência.*

### **3. Séculos XVII e XVIII**

#### **3.1. A Revolução Científica**

A revolução científica, que ocorreu entre os séculos XV e XVI, alterou significativamente o olhar do homem sobre a natureza. Ela introduziu muitas mudanças em todos os campos da ciência, como as técnicas de investigação, os objetivos e o papel da ciência para a sociedade. Essas mudanças foram estimuladas pelo Humanismo<sup>8</sup> e por uma releitura dos filósofos gregos da antiguidade que estimularam a curiosidade do homem sobre a natureza. A disseminação do papel e da imprensa também foram fatores importantes para a divulgação dessas idéias na Europa [2].

As grandes mudanças iniciadas com a Revolução Científica espalharam-se pelas diversas áreas do conhecimento e romperam os últimos vestígios do universo aristotélico. A fabricação de instrumentos científicos cresceu, tornando-os cada vez mais precisos para investigar o mundo de forma rigorosa. A matemática tornou-se uma ferramenta essencial para a ciência [2].

Na Física, uma mudança significativa ocorrida durante este período, foi derivada do trabalho do astrônomo e matemático polonês Nicolau Copérnico (1473-1543). Quando o homem olhou para o céu pelos olhos de Copérnico, mudou seu olhar sobre o universo, abandonou o geocentrismo<sup>9</sup> e adotou o heliocentrismo<sup>10</sup>. O heliocentrismo mudou a imagem que o homem tinha de si mesmo, o que provocou uma mudança generalizada no mundo renascentista, inclusive na ciência. Essas mudanças podem ser notadas nos trabalhos dos astrônomos Tycho Brahe, Johannes Kepler e de Galileu Galilei.

Tycho Brahe (1546-1601), astrônomo dinamarquês, mostrou através de suas observações astronômicas que o céu não era imutável como previa Aristóteles; suas conclusões foram baseadas em observações de corpos como uma supernova, em 1572, e um cometa, em 1577 [8]. Segundo Brahe, tanto a supernova quanto o cometa estavam no céu, que segundo o dogma aristotélico era imutável<sup>11</sup>. As observações de Brahe, então, contradiziam a hegemonia aristotélica predominante até o momento.

---

<sup>8</sup> Doutrina que tem por objetivo o desenvolvimento das qualidades do homem.

<sup>9</sup> Modelo cosmológico no qual a Terra está posicionada no centro do universo.

<sup>10</sup> Modelo cosmológico no qual o Sol está posicionado no centro do universo.

<sup>11</sup> Segundo Aristóteles, o céu era composto por duas partes, a primeira, mais próxima da Terra, era chamada de alta atmosfera, estendendo-se, aproximadamente, até a Lua, e na qual, poderiam ocorrer mudanças; a segunda parte era chamada de céu, estendo-

O astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), discípulo de Brahe, também encontrou falhas no universo aristotélico. Analisando as observações feitas por Brahe, Kepler concluiu que Marte orbitava em torno do Sol com velocidade variável e descrevendo uma órbita elíptica. E não só Marte tinha esse comportamento, todos os planetas apresentavam este movimento [8].

*Devido a estas observações, a tradição aristotélica foi cedendo lugar a revisões de suas concepções e ao desenvolvimento de novas ideias.*

Em 1600, o físico inglês William Gilbert (1544-1603) apresentou sua obra *De Magnete, Magneticisque Corporibus et de Magno Tellure (Sobre os Ímãs, os Corpos Magnéticos e o Grande Ímã Terrestre)*. Neste trabalho ele compilou os fatos importantes sobre Eletricidade e Magnetismo conhecidos até aquele momento. O tardio surgimento da Eletricidade se deu porque até então se conhecia muito pouco sobre esse assunto. Apenas em 1550, o matemático italiano Girolamo Cardano (1501-1576) distinguiu os fenômenos elétricos dos magnéticos [9].

Sobre esta obra é interessante discutir como Gilbert explicava a atração elétrica entre dois corpos. Segundo ele, os corpos eram atraídos devido a existência de um fluido entre eles, denominado *effluvium*. Quanto aos fenômenos magnéticos Gilbert propunha que, em volta de um ímã, existiria uma “esfera de influência” que seria a responsável pelos fenômenos de repulsão e atração magnética [9].

*Estas propostas foram importantes, pois serão precursoras do conceito de campo, introduzido no início do século XIX.*

É nesse contexto histórico que Galileu Galilei (1564-1642), astrônomo, físico e filósofo italiano, apresentou uma nova maneira de fazer ciência, agregando à experimentação hipóteses sobre a natureza e introduzindo o formalismo matemático às generalizações provindas das hipóteses e experimentações (modelos científicos). Com relação à experimentação, a ciência que se fazia até aquele momento levava em conta as premissas gregas, logo não creditava ao experimento a importância que a ciência de hoje lhe confere. Galileu atribuiu à experimentação um significado essencial para a corroboração de uma conjectura teórica: a experimentação faz parte da busca e confirmação da verdade e por isso não pode ser ignorada. Nesse sentido, é importante assinalar que Galileu nem sempre utilizava experimentos convencionais (mãos-na-massa ou *hands-on*), mas fazia uso freqüente de *experimentos de pensamento*<sup>12</sup> (*gedanken experiments*) [10].

Galileu conhecia a teoria atômica, tanto que, em sua obra *Il Saggiatore (O Experimentador)*, publicada em 1623, admitiu ser possível chegar a uma teoria corpuscular para fenômenos físicos e desenvolveu uma teoria corpuscular para o calor e para a luz. Utilizou o termo *átomo* para a luz, pois interpretou a luz como sendo formada por partículas [4]. Em sua obra, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo)*, publicada em 1632, ele apresenta os átomos como entidades sem forma, puramente matemáticas.

A admissão da hipótese atômica por Galileu é a possível geradora de seus problemas com a Igreja Católica. Essa tese é defendida pelo historiador Pietro Redondi [4]. Segundo Redondi, quando Galileu admitiu a existência dos átomos e os assumiu segundo a proposta de Leucipo, como indivisíveis e imutáveis, a Igreja Católica interpretou isso como a negação de um de seus principais dogmas, a eucaristia, que representa a transformação do pão e do vinho em sangue e carne de Cristo. Ainda

---

se além da Lua, onde não poderiam ocorrer mudanças. Nessa área estariam as estrelas e os planetas, considerados fixos e imutáveis.

<sup>12</sup> Os experimentos de pensamento ou experimentos mentais, também conhecidos como *gedanken experiments*, são experimentos em que o cientista imagina uma situação, geralmente muito difícil de ser reproduzida em um laboratório, em que ele supõe hipóteses e imagina como essas poderiam afetar a situação inicial, e a partir delas, tira suas conclusões.

segundo a tese de Redondi, a mudança no conceito de elementaridade pode ter impulsionado o processo de absolvição de Galileu pela Igreja Católica.

*Atualmente, analisando as contribuições de Galileu percebe-se que elas vão muito além do reconhecimento da teoria atômica, principalmente ao sugerir que as leis que regem os movimentos no céu e na Terra eram as mesmas, contestando a ideia de Aristóteles sobre este tema. Por isso, considera-se que Galileu ratificou a primeira unificação nas teorias da Física.*

*Outra importante contribuição de Galileu, já citada, é a importância dada à experimentação, inclusive com experimentos de pensamento, e ao formalismo matemático, introduzindo uma nova filosofia, “onde a ciência deve ser descrita logicamente através do alfabeto matemático com dados colhidos na experimentação” [11, p. 84]. Galileu iniciou a racionalização da ciência, como é concebida atualmente, que depois recebeu contribuições de René Descartes e atingiu seu auge com Isaac Newton.*

René Descartes (1596-1650) foi o filósofo francês responsável por uma nova concepção de universo que pôs fim à antiga visão escolástica medieval [2, p.83]. A base de seu sistema filosófico foi a dúvida e o racionalismo. Segundo Descartes tudo o que era percebido através dos sentidos deveria ser submetido à crítica; isso ficou conhecido como o “método da dúvida” [12]. Ele propôs uma filosofia racionalista, capaz de estudar os fenômenos com base na matéria e no movimento. Descartes apresentou o racionalismo como ferramenta principal para a compreensão do mundo, pois considerava-o como o triunfo da razão pura, desprovida de qualquer ilusão sensorial [11]. A intenção de Descartes foi tentar entender o mundo e o próprio ser por meio do seu pensamento, que era considerado sua única certeza. É dele a famosa frase: “*Penso, logo existo*”.

Em sua filosofia, a natureza era apresentada por meio de uma linguagem matemática. Para Descartes, a natureza funcionaria de acordo com leis mecânicas e tudo no mundo material poderia ser explicado em função da organização e do movimento de suas partes. Assim sua imagem da natureza era a de uma máquina perfeita, governada por leis matemáticas exatas. Esta filosofia foi decisiva para os rumos da ciência nos dois séculos seguintes [11].

A partir deste ponto de vista, Descartes descreveu o mundo e a matéria que o forma. Segundo ele, a matéria seria infinitamente divisível e era constituída por seu comprimento, largura e profundidade. Assim ele negou a existência dos átomos, pois não admitiu a indivisibilidade da matéria e ao mesmo tempo negou a existência do vácuo, pois o espaço deveria ser completamente preenchido por matéria [4]. Descartes provavelmente não aceitou o atomismo, porque sua filosofia exigia uma evidência concreta como prova da verdade o que não era possível até aquele momento.

Também formulou um novo método filosófico ao qual incorporou o raciocínio lógico e a Matemática para alcançar a verdade através de conclusões matemáticas [12].

*Provavelmente a grande contribuição da filosofia de Descartes para a ciência tenha sido a comprovação das ideias de Galileu sobre a importância da Matemática no trabalho científico e a racionalização do conhecimento. Apesar de Descartes não ter contribuído diretamente para a teoria atômica, ele contribuiu para mudanças profundas no pensamento científico vigente.*

Aos poucos, a visão atomística da matéria foi novamente se incorporando à ciência. O filósofo e matemático francês Pierre Gassendi (1592-1655), em 1647, foi o primeiro cientista a apresentar a distinção entre átomos e moléculas. Segundo Gassendi, os átomos seriam uma parte real, invisível e indivisível da matéria que,

reunidos em pequenos grupos receberiam a denominação de moléculas [13]. Foi por meio dos trabalhos de Gassendi que o físico e químico inglês Robert Boyle (1627-1691) conheceu a teoria atômica.

Em seus estudos, Boyle aceitou a visão atomista e admitiu a importância da Matemática e da experimentação, divulgadas por Galileu. Seu objetivo era tentar descrever as propriedades químicas dos átomos. Boyle diferenciava elemento de composto químico; os elementos formariam o composto químico. Para justificar esta afirmação ele usou como exemplo as reações químicas [4]. Contudo, a definição de elemento químico de Boyle não é a mesma que temos hoje em dia. Em sua obra, *The Sceptical Chemist (O Químico Cético)*, de 1661, Boyle escreveu:

“[...] o que entendo por elementos são certos corpos primitivos e simples, perfeitamente sem mistura, os quais não sendo formados de quaisquer outros certos corpos, nem uns dos outros, são os ingredientes dos quais todos os corpos perfeitamente misturados são feitos, e nos quais podem finalmente ser analisados...” [6, p. 77].

Baseado nessa definição, Boyle considerou a água como um elemento puro, enquanto o cobre (Cu) e o ouro (Au) eram compostos químicos ou misturas.

Boyle, como muitos cientistas de sua época, também estudou as propriedades do ar. Com o uso de uma bomba de vácuo, aperfeiçoada pelo físico Robert Hooke (1653-1703), de quem Boyle foi assistente de laboratório, ele determinou, em 1662, a relação que levava o seu nome, a *lei de Boyle*<sup>13</sup> [2].

*Percebe-se que mesmo com as grandes mudanças provocadas pela revolução científica ainda não havia um conceito melhor do que o proposto por Leucipo para o constituinte fundamental da matéria. Também pode-se interpretar este período com um dos primeiros passos para a construção da ciência que temos atualmente. O grifo foi proposital, pois ao mesmo tempo em que discutimos sobre a evolução da teoria atômica e do conceito de partícula elementar, esse texto se propõe a discutir a ciência sob a perspectiva de sua construção, priorizando o crescimento do conhecimento científico e enfatizando que as teorias científicas não surgem como uma ideia fantástica na mente de alguns poucos privilegiados, mas que antes de tudo elas são construções de pessoas dedicadas ao desenvolvimento deste conhecimento.*

### **3.2. Uma Nova Ciência**

Impregnado pela visão racionalista de Descartes e pelas ideias de Galileu, o físico e matemático inglês Isaac Newton (1642-1727) elaborou um conceito matemático de átomo, no qual eles eram interpretados como pontos que se relacionam geometricamente.

*A ênfase dos trabalhos de Newton não foi matéria e sim o movimento; talvez por isso aceitasse a visão atomista e matemática proposta por Galileu, sem dar outras grandes contribuições. O objetivo de Newton foi compreender a relação entre os átomos a partir do seu movimento.*

Durante seus estudos sobre a luz, Newton fez um experimento aparentemente simples, mas que se mostraria muito importante para o desenvolvimento da espectroscopia<sup>14</sup>. Em 1666, ele decompôs a luz solar com o auxílio de um prisma e

---

<sup>13</sup> A lei de Boyle estabeleceu que o produto da pressão pelo volume de um gás é constante quando a temperatura do gás é mantida inalterada.

<sup>14</sup> A espectroscopia é uma técnica de levantamento de dados físico-químicos por meio da transmissão, absorção ou reflexão da energia radiante incidente em uma amostra.

verificou que essa luz era composta por sete faixas coloridas, o espectro<sup>15</sup> da luz solar. Newton não foi o primeiro a observar este fenômeno, mas foi o primeiro a descrevê-lo de forma adequada. Segundo sua descrição esse espectro era contínuo e cada uma das cores tinha um índice de refração diferente [4].

Mesmo não sendo o objetivo principal do seu trabalho, Newton expõe algumas ideias sobre a teoria atômica na questão 31 da sua obra *Optikis (Ótica)*, publicado em 1704. Newton supôs que existiam forças que atuavam entre os átomos e que produziram grande parte dos fenômenos da natureza. Ele imaginou que estas forças agiam a distâncias muito pequenas por isso não haviam sido encontradas em nenhum experimento. Newton não especificou que tipo de força seria esta, mas imaginou que era diferente das forças gravitacional e eletromagnética [14].

*Por mais superficial que a explicação de Newton sobre os átomos possa parecer, ela admitia a sua existência. Também reconhecia que seria provável a existência de outra força, ainda desconhecida pela ciência da época, atuante entre os átomos e que entre seus efeitos estaria a explicação para muitos fenômenos naturais.*

Quando Newton apresentou a Lei da Gravitação Universal<sup>16</sup>, em 1687, concretizou a primeira proposta de unificação das leis da Física, que havia sido feita por Galileu Galilei.

*A ideia da unificação das leis que regem a natureza, lançada por Galileu e mantida por Newton será muito importante no desenvolvimento da Física de Partículas. O desenvolvimento científico, após os trabalhos de Newton foi fortemente marcado por suas convicções. A mecânica newtoniana foi utilizada como base para investigar a natureza.*

### **3.3 A origem do conceito de carga elétrica**

Após a identificação dos fenômenos da condução elétrica e indução elétrica, o físico inglês Stephen Gray (1670-1736) propõe, em 1729, a introdução de novos conceitos. Segundo Gray, a “virtude elétrica” de um tubo de vidro atritado pode ser transmitida a outros corpos com os quais ele é posto em contato, atribuindo-lhes a mesma propriedade de atração que o tubo atritado [9, p.193].

Os trabalhos de Gray foram publicados na revista “*Philosophical Transactions*” (*Transações Filosóficas*) editada pela Royal Society de Londres. Nesse artigo, Gray descreve que existiriam corpos capazes de conduzir eletricidade (hoje, condutores) e outros que não apresentariam essa característica (hoje, isolantes). Gray também descreve a “eletrização por influência” (hoje, indução elétrica) [9].

Após analisar os trabalhos de Gray, o químico francês Charles du Fay (1698-1739) propõe, em 1734, a existência de dois tipos de eletricidade, denominadas “eletricidade vítrea” e “eletricidade resinosa” (hoje, carga positiva e carga negativa, respectivamente) [9].

Sobre a origem do termo carga elétrica é interessante ressaltar que este termo foi adotado devido a uma analogia que se fazia entre o ato de “carregar” alguma coisa – tal como um canhão, com pólvora - e o ato de eletrizar um objeto com um fluido elétrico, isto é, “encher” um objeto com o fluido. Tal objeto eletrizado passou a ser chamado de “carregado” e o uso da expressão “carregar” para significar “eletrizar” perdurou até hoje, sendo que carga elétrica, ou simplesmente carga passou a significar

---

<sup>15</sup> O espectro de um elemento é a separação dos componentes desse elemento segundo seus comprimentos de onda, visualizando através de raios com cores diferentes.

<sup>16</sup> Lei segundo a qual para duas partículas com massa, no Universo, existe uma força de atração, diretamente proporcional ao produto das massas das partículas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa.

eletricidade ou fluido elétrico. O físico norte-americano Benjamin Franklin (1706-1790) é tido como autor da palavra “carga” na Eletricidade [9, p. 277].

Com a consolidação da mecânica newtoniana, era comum os cientistas tentarem fazer generalizações dos modelos mecânicos para os demais ramos da Física. Podemos constatar essa tendência com a proposta de que a eletricidade seria um fluido capaz de escoar pelo condutor (seção 3.1). Isso também pode ser percebido no estudo do calor, com a proposta de existência do calórico<sup>17</sup> e, na Química, com a proposta do flogístico<sup>18</sup> [9].

*O estudo da Eletricidade reforça a proposta divulgada desde a antiguidade grega, de que o mundo não é composto apenas pelo que nossos sentidos são capazes de perceber. A partir deste período, o cientista, além de equipamentos adequados para a pesquisa, precisa também de imaginação para descrever o que não é capaz de perceber com os sentidos.*

### **3.4. Bernoulli, a Teoria Cinética dos Gases e o átomo**

A Teoria Cinética dos Gases (TCG) começou a ser elaborada quando se procurou estabelecer a relação macro e microscópica de um sistema. Até esse momento, imaginava-se que as grandezas termodinâmicas macroscópicas deveriam refletir o comportamento microscópico do sistema físico. Esta ligação foi construída com o desenvolvimento da TCG, ao longo dos séculos XVIII e XIX.

Assim como Galileu, o físico e matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783) também adotou a hipótese atômica em seus trabalhos, sendo o primeiro cientista a elaborar uma teoria cinética do ar. Segundo Euler, o ar seria composto por moléculas esféricas girantes que estavam densamente juntas [15].

*Ao fazer essa proposta, Euler, mesmo que indiretamente, assume a hipótese atômica. Mesmo que ele não estudasse diretamente os átomos, compreendeu sua importância para a teoria que havia desenvolvido, pois sem eles seria muito difícil descrever o comportamento cinético do ar.*

A TCG teve seu desenvolvimento incentivado pela publicação do livro *Hydrodynamica (Hidrodinâmica)*, do físico e matemático suíço Daniel Bernoulli (1700-1782), em 1738. Bernoulli alcançou o auge de sua produção intelectual, em 1724, quando lecionou na Academia São Petersburgo, na Rússia. Em sua obra, Bernoulli falou sobre a mecânica dos fluidos, que se divide em: Hidrostática, que estuda os fluidos em repouso, concebida pelo filósofo grego Arquimedes (287-212 a.C.), e objeto de estudo também, no século XVII, dos físicos e matemáticos, o francês Blaise Pascal (1623-1662) e o flamengo Simon Stevin (1548-1620); e Hidrodinâmica, que estuda os fundamentos da dinâmica dos fluidos e foi concebida, no século XVIII, por Euler, com quem Bernoulli trabalhou e foi fortemente influenciado.

Para desenvolver seu trabalho em Hidrodinâmica, Bernoulli se inspirou nos trabalhos de Euler e em Demócrito e Arquimedes. De Demócrito, ele adotou a concepção de que a matéria era composta de átomos, e que estes átomos se moveriam rapidamente em todas as direções; de Arquimedes, adotou os conceitos de Hidrostática e Mecânica.

Em seu trabalho, Bernoulli tinha como objetivo explicar as leis empíricas de um gás ideal<sup>19</sup> a partir de um sistema mecânico simples. Os pontos principais abordados foram a interpretação microscópica da pressão e da temperatura, pois o volume já tinha

---

<sup>17</sup> O calórico era considerado um fluido, presente em todos os corpos, responsável por suas variações de temperatura. Este conceito foi posteriormente substituído pelo conceito de calor.

<sup>18</sup> O flogístico era considerado uma substância existente nos corpos que seria liberada ao ar quando estes sofriam o processo de combustão. Quanto mais combustível fosse o material, mais flogístico seria capaz de liberar.

<sup>19</sup> O gás ideal é um modelo idealizado para o comportamento de um gás real.

um significado claro. A pressão era descrita como o choque das moléculas do gás nas paredes do recipiente, enquanto a temperatura era relacionada com o estudo do movimento do gás [16].

*Na teoria desenvolvida por Bernoulli, o conceito atômico foi retomado, e assim como na obra de Euler, Bernoulli usou os átomos como um conceito importante em sua teoria, sem explicitar a sua natureza. Outra característica importante em sua obra foi a grande importância atribuída aos trabalhos de Newton. Como todo cientista de sua época, Bernoulli trabalhou com a base científica construída por Newton, ou seja, a natureza era analisada por meio de um sistema mecânico simples.*

Até 1800, somente Bernoulli tinha argumentado sobre a utilidade do conceito de átomo para a TCG [4].

*Como já foi dito anteriormente, o conhecimento científico foi construído com a história do homem. Mesmo que os trabalhos relacionados a TCG não conceituem o átomo, eles tiveram a sua importância reconhecida para a descrição da natureza.*

### **3.5. Os primeiros passos da Espectroscopia para a teoria atômica**

Em 1777, o interesse pelo espectro da luz solar foi novamente despertado; desta vez, foi o químico sueco Carl Scheele (1742-1786) quem constatou que as diferentes cores que compõem o espectro da luz solar tinham energias diferentes. Ele fez esta afirmação quando constatou que o cloreto de prata<sup>20</sup> (AgCl) escurecia de maneira desigual quando submetido às diferentes cores que compõem a luz solar [17].

*Com o início da análise espectroscópica, a ciência mostra como podemos chegar a um ponto comum – a teoria atômica – por diversos caminhos, recebendo contribuições de diversas áreas do conhecimento.*

### **3.6. Os diferentes caminhos para a teoria atômica: a Eletricidade**

Enquanto as diferentes áreas científicas se desenvolviam, o médico italiano Luigi Galvani (1737-1798), em 1780, relatava suas observações sobre a “eletricidade animal”. Esses relatos só foram claramente interpretados em 1799, quando o físico italiano Alessandro Volta (1745-1827) criou a pilha voltaica<sup>21</sup>. Com a pilha voltaica os laboratórios puderam dispor de uma corrente elétrica praticamente constante para realização de experimentos [4].

No ano seguinte, os químicos ingleses William Nicholson (1735-1815) e Anthony Carlisle (1768-1840) realizaram a primeira eletrólise<sup>22</sup> na água e constataram que a água poderia ser decomposta em hidrogênio (H) e oxigênio (O) e generalizaram suas conclusões dizendo que uma substância em meio ácido poderia se decompor, passo importante para a compreensão do átomo [4].

Esse experimento deu origem à Eletroquímica, mostrando que a eletricidade pode decompor ligações químicas e que, portanto, as ligações químicas deveriam ter origem elétrica [4], sugerindo que a Eletricidade e a Química eram áreas de estudo que se sobrepunham.

*Novamente percebemos o que foi dito na seção anterior, a construção da teoria atômica recebeu diversas contribuições de diferentes áreas científicas. Dentre elas a Eletricidade, que abre uma perspectiva completamente nova para o conceito de átomo; a dissociação iônica levaria os cientistas a se perguntarem se apenas moléculas de água poderiam ser dissociadas.*

<sup>20</sup> O cloreto de prata (AgCl) é o composto químico utilizado nas fotografias preto e branco; ele escurece o papel quando submetido a ação da luz.

<sup>21</sup> A pilha voltaica era formada por uma série de discos de metais diferentes, embebido em uma solução ácida, resultando em uma tensão elétrica.

<sup>22</sup> A eletrólise é a passagem de corrente elétrica por uma solução em consequência dos íons presentes nessa solução.

### **3.7. Os diferentes caminhos para a teoria atômica: a Química**

A diferenciação entre átomos, moléculas e compostos químicos, feita anteriormente por Gassendi (seção 3.1), estimulou o químico francês Antoine Lavoisier (1743-1794) a fazer estudos neste campo. Lavoisier procurou separar elementos de compostos químicos; seus trabalhos o estimularam a elaborar a primeira Tabela Periódica, contendo cerca de trinta elementos e publicada em 1789. Foi nesse mesmo ano que Lavoisier publicou sua obra *Traité Elementaire de Chimie (Tratado Elementar de Química)* [18].

*É nesse livro que a Química rompe seus últimos laços com a Alquimia e torna-se uma ciência moderna, introduzindo a importância dos métodos quantitativos e da investigação. Esses métodos foram fundamentais para a elaboração de diversas leis empíricas que permitiram aos químicos caracterizar novos compostos e novos elementos, sendo conduzidos, inclusive, até a teoria atômica.*

### **3.8. E no final do século XVIII**

*Conforme citado por Melo [1], Bachelard classificava o pensamento científico entre o século XVI até o início do XVIII como extremamente utilitário, pragmático. A hipótese atômica tinha pouca relevância neste contexto, pois as características microscópicas dos elementos eram ignoradas.*

*Mas mesmo assim, alguns cientistas tinham a hipótese atômica como a melhor opção para explicar algumas teorias, como a Teoria Cinética dos Gases (TCG). Pois, para a compreensão dessa teoria não era necessário compreender o que era o átomo, mas apenas que ele existia e que constituiria os gases. Por este motivo, a hipótese atômica ganhava mais adeptos, apesar de ainda não ter comprovação experimental.*

*Segundo Bachelard, o estudo da natureza e a construção do conhecimento científico devem se pautar na análise crítica [19, p. 111]. Assim, pode-se discutir a necessidade da existência do átomo para a TCG. Euler e Bernoulli consideravam a existência dos átomos um fato, pois esses eram imprescindíveis para a elaboração de suas teorias. Mas se assumirmos a proposta de Descartes, que não aceitava o atomismo, a TCG não teria significado, pois se baseava no conceito atômico. Esta análise crítica é importante, pois nos faz reconhecer os erros e acertos que surgem no decurso da construção do conhecimento científico [19].*

*A análise crítica rompe com a ideia de continuísmo presente no desenvolvimento científico. Segundo Bachelard, o conhecimento científico atual não pode ser entendido como pré-existente de forma embrionária em épocas anteriores [7, p. 255], pois segundo ele, não existe um fio condutor capaz de influenciar os cientistas ao longo da história. Combatendo a ideia de continuísmo e ainda analisando a TCG, é provável que ela não fosse elaborada se os predecessores de Descartes seguissem suas ideias sem questioná-las. Esse é um exemplo da importância da crítica na ciência.*

## **4. Século XIX**

Durante o século XIX a ciência tornou-se mais pública à medida que suas consequências chegavam ao dia-a-dia da população. Nesse período também se desenvolveram academias científicas, demonstrando o aumento do grau de especialização nas ciências. Foi também durante esse século, no ano de 1840, em Glasgow na Grã-Bretanha, que foi criada a palavra *cientista* pela Associação Britânica para o Progresso da Ciência. Em outros países, como os Estados Unidos, a intensificação da divulgação científica também aconteceu; além das associações



científicas, surgiram os periódicos científicos que logo se espalharam por outros países [2].

A segunda metade do século XIX foi muito rica para a Física Experimental, principalmente para a teoria atômica. Muitos dados puderam ser colhidos, apesar de ainda não poderem ser interpretados por teorias consistentes [4].

#### **4.1. Uma nova observação**

Nos estudos envolvendo espectroscopia, até esse momento, tudo o que se conhecia eram os espectros contínuos<sup>23</sup>, identificados por Newton em 1666 (seção 3.2) e estudados por Scheele em 1777 (seção 3.5). Em 1802, o físico inglês William Wollaston (1766-1828), observou o espectro solar, com o auxílio de um espectroscópio<sup>24</sup> de uma fenda, e descreveu sete linhas escuras. Contudo, não deu muita importância para sua observação, pois pensou tratar-se dos limites de cada uma das cores [17].

*A observação de Wollaston mostra um novo comportamento na ciência, no qual, resultados experimentais sem uma explicação conhecida, levam os cientistas a repensarem suas teorias.*

#### **4.2. A teoria atômica de Dalton**

O grande passo da Química para a construção de uma teoria atômica foi dado pelos químicos, o inglês John Dalton (1766-1844), o francês Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850) e o italiano Amadeo Avogadro (1776-1856).

A formulação da primeira teoria atômica científica foi feita por Dalton. Ele era um apaixonado por meteorologia, e essa paixão o conduziu à teoria atômica. Dalton fez registros meteorológicos diários das condições do tempo e das condições atmosféricas durante quarenta e seis anos, totalizando aproximadamente duzentas mil observações [20].

O caminho até a teoria atômica começou a ser percorrido quando Dalton soube que Lavoisier havia identificado que o ar atmosférico era composto, pelo menos, por dois gases de pesos diferentes. A partir dessa afirmação, Dalton começou a pesquisar sobre a composição da atmosfera, buscando as respostas para as seguintes perguntas:

“Quais eram as proporções em que esses gases apareciam?; O vapor de água no ar era quimicamente combinado com os gases, ou apenas estava misturado com eles?; Porque a quantidade de gás absorvido pelo vapor de água variava em relação a diferentes gases?; Porque os gases de pesos diferentes que compunham o ar não eram separados pela ação da gravidade?”[2, p. 37].

Dalton procurava pelos pesos relativos<sup>25</sup> dos diferentes gases e suas relações. A partir da análise de gases combinados entre si e suas pressões resultantes, Dalton concluiu que os gases eram capazes de misturar-se, mas não se combinavam quimicamente. Segundo ele, isso acontecia porque as partículas de gás eram circundadas por uma nuvem de calórico, o que impedia que elas formassem grupos. Considerando estes trabalhos, Dalton sugeriu que cada gás era composto por uma

---

<sup>23</sup> Um espectro contínuo é um espectro em que as faixas que o compõe estão uma ao lado da outra.

<sup>24</sup> Aparelho no qual um espectro é observado diretamente pelo olho humano.

<sup>25</sup> Os pesos relativos de Dalton são o que hoje conhecemos por pesos atômicos.

espécie de partícula, que se repeliam mutuamente quando pertencentes ao mesmo grupo, e que o peso do gás seria proporcional ao peso de suas partículas [18].

Quando Dalton explicitou suas ideias sobre a formação da atmosfera, estava admitindo a hipótese atômica, ao sugerir que as partículas que compunham o gás eram as mais elementares encontradas até o momento, e chamadas por ele de *partículas últimas da matéria*<sup>26</sup>. A partir destes estudos, Dalton fez o primeiro esboço da sua teoria atômica; utilizando a concepção newtoniana, propôs que os gases seriam compostos pelas partículas últimas de matéria que se repeliam entre si com uma força que se reduzia com a distância. Supostamente, esta força era o calórico, que envolveria os átomos como uma nuvem [18].

*Percebe-se, através do conceito elaborado por Dalton, que ele, apesar de admitir a existência dos átomos, não os conceitua, apenas diz que eles existem, assim como seus antecessores. É provável que ele tivesse consciência da importância deste conceito para a teoria dos gases, mas não conseguiu acrescentar nada ao conceito de átomo, provavelmente, devido à limitação imposta pela inexistência de experimentos adequados.*

*Quando Dalton descreve que as partículas estavam envolvidas por uma nuvem de calórico, ele demonstra sua preocupação não apenas em conhecer composição da matéria, mas em compreender suas interações.*

*Os trabalhos de Dalton são importantes porque ele constatou que existiam diferenças entre as substâncias químicas, por exemplo, substâncias diferentes têm pesos diferentes; também constatou diferenças nos comportamentos químicos das diferentes substâncias, além de sugerir que as reações químicas apenas separavam ou uniam as partículas últimas de matéria. São essas ideias que diferenciaram a teoria atômica de Dalton. Essa teoria também foi a primeira que se valeu de resultados experimentais conduzidos por outros estudiosos, como Lavoisier.*

Apesar de não acrescentar nenhuma novidade ao conceito de partícula, Dalton inovou quando agregou a esse conceito uma série de propriedades químicas. Dalton assumiu o antigo conceito de átomo; ele seria imutável e indestrutível. Todos os átomos de um mesmo elemento seriam iguais (em peso, forma e tamanho), e quando se unissem formariam um átomo composto. Essa ideia foi anteriormente descrita por Gassendi (seção 3.1). Dentre as propriedades postuladas, o peso foi a que mais de destacou, pois com o sucesso da Teoria da Gravitação de Newton (1687) essa grandeza foi muito valorizada pela ciência.

*Percebe-se como a influência de Newton foi dominante nos trabalhos de Dalton, pois em dois momentos ele agregou a sua teoria as ideias de Newton. Primeiro, quando fez o primeiro esboço de sua teoria atômica, deixando sua teoria muito parecida com a Teoria da Gravitação Universal; e, segundo, quando atribuiu como uma das características mais importantes dos átomos, o seu peso. Mas como foi dito anteriormente, o pensamento newtoniano era muito influente na época.*

Dalton fez a primeira comunicação oral de sua teoria atômica na Sociedade Literária e Filosófica de Manchester em 21 de outubro de 1803. A publicação de sua teoria aconteceu em 1807 no livro *System of Chemistry (Sistema de Química)* de Thomas Thomson (1773-1852), que descreveu, com detalhes, a teoria de Dalton, utilizando os símbolos inventados por ele para representar os elementos; nesse trabalho, também foi utilizada a palavra *átomo*. Um ano mais tarde, o próprio Dalton começou a publicar a sua teoria atômica no seu livro *New System of Chemical Philosophy (Novo Sistema da Filosofia da Química)*. Os três volumes foram lançados,

---

<sup>26</sup> Podemos dizer que as partículas últimas da matéria de Dalton seriam um sinônimo de átomo.

respectivamente, em 1808, 1810 e 1827. A teoria de Dalton não teve aceitação imediata devido às dificuldades na determinação precisa dos pesos atômicos [20].

Em seus apontamentos de 1803 foram identificados, pela primeira vez, o uso dos símbolos atômicos, de fórmulas atômicas e dos pesos relativos das *partículas últimas da matéria* [20].

John Dalton fez grandes contribuições à Ciência, publicando cerca de 150 artigos sobre vários assuntos, dentre eles, a primeira teoria atômica científica e a identificação da cegueira para algumas cores, conhecido como *daltonismo*, identificado em si próprio em 1792 [20].

*A teoria de Dalton representou um marco na história da teoria atômica; anteriormente tudo que se tinha eram suposições, depois de Dalton a teoria começou a ganhar força, pois apresentou um caráter científico agregando resultados experimentais e ganhando credibilidade.*

Os trabalhos de Gay-Lussac e de Avogadro também contribuíram para a elaboração do conceito de átomo e de molécula.

Gay-Lussac estava interessado em estudar as combinações entre os gases. Após alguns anos, e muitos experimentos realizados, ele já havia reunido várias evidências experimentais que comprovavam que a água era formada por duas partes de hidrogênio (H) e uma parte de oxigênio (O). Ampliou suas análises para outras substâncias e concluiu que todos os gases se combinavam de forma que seus volumes mantinham uma relação simples entre si. Os resultados de Gay-Lussac corroboraram a teoria atômica de Dalton. Havia apenas um problema: Gay-Lussac não conseguia explicar porque, quando combinados, alguns gases se contraíam.

Seus trabalhos geraram, em 1809, a *lei dos volumes ou a lei de Gay-Lussac*<sup>27</sup>. Esse problema só foi parcialmente esclarecido em 1811, por Avogadro, que, trabalhando com a lei dos volumes de Gay-Lussac, identificou que os átomos poderiam se agrupar e formar *grupos de átomos*, que foram chamados de *moléculas* (do latim, pequena massa). Avogadro percebeu que a contração relatada por Gay-Lussac era causada pela união dos átomos para formar uma molécula. Assim, Avogadro estabeleceu a definição de átomo e molécula, calculando a massa atômica e a molecular [2], gerando o que ficou conhecido como a *hipótese de Avogadro*<sup>28</sup>.

A hipótese de Avogadro não foi aceita imediatamente, pois a impossibilidade da comprovação experimental retardou seu reconhecimento, enfraquecendo a sua credibilidade entre alguns cientistas entre os anos de 1820 e 1840. Por esse motivo, os químicos só voltaram a ela em 1840, devido ao surgimento da Química Orgânica, pois estavam interessados em entender a estrutura de uma molécula. A hipótese atômica foi ganhando adeptos e acabou se disseminando, não apenas na Física e na Química, mas também na Biologia [18].

### **4.3. Modificações na Tabela Periódica de Lavoisier**

Com a aceitação da Tabela Periódica dos Elementos Químicos, publicada por Lavoisier em 1789, novos elementos foram sendo acrescentados a ela. E, em 1814, o químico sueco Jöns Jakob Berzelius (1779-1848) introduziu a nomenclatura moderna aos elementos químicos, usando as primeiras letras de seus nomes nos alfabetos grego e latino [6].

---

<sup>27</sup> Essa lei diz que, à pressão constante, o volume e a temperatura de um gás ideal são grandezas diretamente proporcionais.

<sup>28</sup> Iguais volumes de quaisquer gases ideais encerram o mesmo número de moléculas, quando medidos nas mesmas condições de temperatura e pressão.

*A importância na aceitação da Tabela Periódica mostra uma tendência de ver na natureza um aspecto de periodicidade e de simetria, que, aos poucos, vai sendo assimilada pelos cientistas em suas teorias.*

#### **4.4. Contribuições da Espectroscopia: uma nova proposta**

Também em 1814, relatos muito parecidos com os de Wollaston (seção 4.1) foram feitos pelo construtor de instrumentos ópticos, o alemão Joseph Fraunhofer (1787-1826), observando o espectro solar, com o auxílio, inicialmente, de prismas e, depois, de redes de difração [17]. Fraunhofer relatou a mesma observação feita por Wollaston, da existência de linhas negras sobrepostas às cores do espectro solar, linhas essas que foram denominadas de raias de *Fraunhofer*. Esse foi um passo importante para a espectroscopia, pois se identificou a existência de um tipo de espectro diferente do relatado anteriormente por Newton (seção 3.2) e Scheele (seção 3.4). Esse espectro não apresentava faixas contínuas, ao contrário, era composto por um certo número de linhas muito separadas umas das outras, razão pela qual ele foi chamado de *espectro discreto*. Fraunhofer estudou essas linhas e constatou que elas eram sempre iguais para um mesmo elemento [21].

*A observação de dois tipos de espectros, o contínuo e o discreto, demonstra a necessidade de maior compreensão do processo. Essa compreensão será muito importante para o desenvolvimento da Física do século XX.*

#### **4.5. Contribuições da Eletricidade: uma nova proposta**

Também em 1814, o físico André-Marie Ampère (1775-1836) propôs que o átomo seria constituído de partículas subatômicas. Sua intenção foi tentar explicar a definição de elemento químico proposta por Boyle (seção 3.1). Ampère foi o primeiro cientista a propor que o átomo, considerado até o momento a menor porção de matéria e indivisível, cuja existência ainda não tinha uma comprovação experimental, poderia ser formado por partes ainda menores [6].

*É provável que Ampère tenha relacionado à ideia de Boyle para a água com a concepção de átomo, sugerindo que, se a água, um “elemento químico”, era composta por partes menores, o oxigênio (O) e o hidrogênio (H), o átomo também poderia ser composto por partes menores.*

Em 1815, o médico inglês William Prout (1785-1850), propôs que os pesos atômicos dos elementos químicos poderiam ser expressos como múltiplos inteiros de uma unidade fundamental que, segundo ele, seria o peso do átomo de hidrogênio (H). Contudo, sua hipótese foi contestada pela verificação de que o elemento cloro (Cl) tinha peso fracionário; a explicação para este fato só foi dada com a identificação dos isótopos<sup>29</sup> [4].

*A proposta de Prout pode ter sido desconsiderada no momento que foi apresentada, mas analisando suas palavras e comparando com os conceitos atuais da Física, talvez possamos dizer que ele lançou uma das primeiras ideias que levaram ao conceito de quantização.*

A proposta de Ampère sobre a constituição dos átomos foi aos poucos sendo integrada à ciência por evidências encontradas nos experimentos de Eletromagnetismo feitos pelo físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851), e pelos trabalhos de Ampère com cargas elétricas circulando por fios condutores, também em 1820. As

---

<sup>29</sup> Isótopos são átomos de um elemento químico cujos núcleos têm o mesmo número atômico, mas diferentes massas atômicas.

evidências encontradas nesses experimentos levaram os cientistas a considerar que os átomos poderiam possuir *portadores de cargas elétricas*<sup>30</sup> [6].

*A proposta de Ampère, provavelmente, lançou mais polêmica a este tema, pois a existência do átomo não havia sido comprovada e já se sugeria que ele poderia ser composto por outras partículas ainda menores que ele. Apesar de polêmica, ela apresentava alguma hipótese de sucesso, pois um dos seus opositores, Prout, não havia conseguido explicar porque o peso atômico do cloro (Cl) era fracionário. Estes foram os primeiros indícios de que o átomo poderia não ser a partícula elementar da matéria.*

*Mesmo sem a comprovação experimental da existência do átomo, ela já era uma realidade para alguns cientistas, que também questionavam a sua indivisibilidade.*

#### **4.6. A origem do conceito de campo na Física**

O físico inglês Michael Faraday (1791-1867), apresentou as primeiras ideias sobre o conceito de campo em um artigo de 1821. Nele, o novo conceito é apresentado a partir das noções de linhas de força relatadas em seu trabalho. Segundo o referido artigo, as forças elétricas e magnéticas poderiam ser visualizadas como uma espécie de linha elástica que se estendia no espaço a partir de ímãs ou de corpos eletrizados. Como essas linhas deveriam preencher completamente o espaço vazio, Faraday denominou-as *linhas de forças*. Mais tarde, Faraday utilizou o termo “campo” para se referir à disposição e à intensidade dessas linhas de força no espaço [9, p. 254]. Esta proposta foi estruturada matematicamente pelo físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) [9]

*Ao introduzir estas ideias Faraday rompe com o pensamento vigente no qual a ação a distância prevalecia na Física, incorporando à esta ciência um conceito tão importante nos dias atuais: o conceito de campo.*

#### **4.7. Um modelo atômico preliminar**

No ano de 1828, o físico alemão Gustav Fechner (1801-1887) após estudar o que havia sido proposto sobre a existência dos átomos até o momento, propõe um modelo atômico. Segundo Fechner, o átomo era constituído por uma parte central massiva que atrairia por meio da força gravitacional uma nuvem de partículas quase imponderáveis [6, p. 79].

*Ainda que muito sutil, podemos dizer que Fechner compartilhava as mesmas ideias que Amperè (seção 4.5) no que diz respeito à estrutura atômica. Isso pode ser constatado quando ele descreve seu modelo atômico, compondo seu átomo com partículas subatômicas, além da forte influência newtoniana apresentada no modelo. É provável que este tenha sido o primeiro modelo atômico elaborado.*

#### **4.8. Contribuições da Biologia**

Também no ano de 1828, o botânico escocês Robert Brown (1773-1858) descreveu uma experiência em que observou, com a ajuda de um microscópio, uma suspensão de grãos de pólen em água. Em seus relatos, Brown descreveu que cada grão se movia desordenadamente. Ele repetiu esse experimento com outras substâncias orgânicas e constatou que todas tinham o mesmo comportamento. Acreditando ter encontrado a *molécula primitiva* da matéria viva. Continuando seus experimentos, Brown observou que o mesmo comportamento era observado em

---

<sup>30</sup> Em outras palavras, os átomos poderiam ser compostos por partículas subatômicas.

substâncias inorgânicas, concluindo, assim, que toda a matéria viva era constituída de *moléculas primitivas*. Esse fenômeno foi denominado *movimento browniano* [16].

Ainda sobre a influência das ideias atômicas, difundiu-se a definição do conceito de célula elaborada pelo botânico alemão Matthias Schleiden (1804-1881). Segundo Schleiden, a célula era uma unidade essencial do organismo vivo. Paralelamente a essas ideias, o fisiologista alemão Theodor Schwann (1810-1882) estudando ovos de algumas espécies, concluiu que eles eram essencialmente células. Com o intuito de explicar a origem da grande diversidade de criaturas vivas, o naturalista alemão Lorenz Oken (1779-1851), usou a célula como resposta. Estas conclusões só puderam ser relatadas após a década de 1830, quando bons microscópios foram desenvolvidos [2].

*Provavelmente a atmosfera científica da época, a nova fronteira da visão proporcionada pelo microscópio e a crescente aceitação de uma teoria atômica podem ter influenciado esses pesquisadores na busca pelo menor constituinte da vida, assim como influenciou outros na busca pelo menor constituinte da matéria.*

#### **4.9. Uma nova contribuição da Eletricidade**

Em 1833, novamente o físico inglês Michael Faraday, por meio de uma eletrólise, encontrou evidências quantitativas da existência de constituintes eletricamente carregados no interior da matéria; esses foram chamados de *átomos de eletricidade* [4].

Os trabalhos de Faraday se desenvolveram em várias áreas da Física, dentre elas, a Espectroscopia. Investigou a influência dos campos magnéticos sobre os espectros, contudo, não obteve o êxito esperado e dedicou-se à Eletricidade [22].

Em 1838, Faraday começou um trabalho que seria muito importante para a compreensão da composição da matéria. Ele foi um dos primeiros cientistas a trabalhar com descargas elétricas em gases rarefeitos. Em seus trabalhos, Faraday observou uma região escura próxima ao ânodo<sup>31</sup> do tubo, região essa que ficou conhecida como *espaço escuro de Faraday* [6]. Contudo, seus trabalhos não tiveram muito sucesso devido às dificuldades técnicas, tais como a impossibilidade de se conseguir um vácuo eficiente. Os trabalhos com descargas elétricas em gases só foram retomados 20 anos mais tarde [23].

*Faraday, provavelmente, tenha sido o autor de uma proposta de estrutura atômica para a Eletricidade, mais tarde chamada de “carga elementar”; além de seus resultados experimentais, aceitava a teoria atômica e deveria conhecer a proposta de uma subestrutura para o átomo. Os resultados de Faraday corroboraram as propostas apresentadas anteriormente por Amperè, Oersted (seção 4.5) e Fechner (seção 4.7). Além disso, começou a desenvolver um caminho muito importante para a Física de Partículas, os experimentos com descargas elétricas em gases, além de seus trabalhos com Espectroscopia, ambos extremamente importantes para o desenvolvimento de Física de Partículas.*

#### **4.10. Uma nova contribuição da Teoria Cinética dos Gases**

Ainda sobre a influência da Teoria Cinética dos Gases, o instrutor naval inglês James Waterston (1811-1883) escreveu seu livro *Thoughts on the Mental Functions (Reflexões sobre Funções Mentais)*, publicado em 1843, no qual encontramos o texto *Note on the Physical Constitution of Gaseous Fluids and Theory of Heat (Nota sobre a Constituição Física dos Fluidos Gasosos e a Teoria do Calor)*, no qual Waterston introduz o conceito de *livre caminho médio*, afirmando que:

---

<sup>31</sup> Eletrodo positivo que faz parte do aparato experimental.

“A distância percorrida por uma molécula, após colidir com outra e antes de encontrar uma segunda, é inversamente proporcional à densidade do meio” [15, p. 63].

*Para a elaboração desse conceito, Waterston, assim como Bernoulli, admite a hipótese atômica e também introduz, mesmo que indiretamente, o conceito de probabilidade na ciência.*

#### **4.11. A Espectroscopia e as partículas subatômicas**

Em 1845, Faraday retomou seus trabalhos com espectroscopia, analisando a ação de campos magnéticos sobre os espectros, motivado por uma carta enviada pelo físico inglês Lord Kelvin (1824-1907) na qual ele fazia algumas sugestões para aperfeiçoar o trabalho de Faraday. Seguindo essas recomendações, Faraday conseguiu demonstrar que o plano de polarização<sup>32</sup> da luz era alterado pela ação de um campo magnético, o que ficou conhecido como *efeito Faraday* [23].

O estudo da espectroscopia teve como um de seus adeptos o físico francês Jean Foucault (1819-1868), que, em 1849, concluiu que quando uma dada substância emitia luz em uma determinada frequência ela absorvia melhor a luz dessa mesma frequência. Essa observação levou Foucault a interpretar o fenômeno da emissão e da absorção como uma espécie de ressonância<sup>33</sup> entre a radiação e os átomos de uma substância, o que conduziu a interpretação dos átomos como sistemas compostos [4].

*Assim, a proposta de que o átomo seria formado por partículas subatômicas ganha mais adeptos. Dessa forma, a palavra átomo deixa de ter o significado dado por Leucipo. Pois, as observações de Foucault propunham exatamente o contrário, que o átomo seria composto por algo menor. Sobre estas conclusões, Maxwell assim se manifestou:*

“[...] foram essas observações que primeiro levaram à conclusão de que o espectro implicava que os átomos tivessem estrutura, ou seja, fossem um sistema capaz de executar movimentos internos de vibração.” [4, p. 230].

*A possibilidade dos átomos terem estrutura interna e que essa estrutura executasse movimento oscilatório representava uma concepção importante no sentido de explicar a emissão de radiação pelos átomos.*

*Existiam muitas especulações sobre a constituição da matéria; especulações é o termo mais apropriado porque ainda não havia sido feito a comprovação experimental da existência dos átomos, mas já se questionava a sua indivisibilidade, qualidade essa imprescindível anteriormente. Apesar de nenhuma dessas hipóteses terem confirmação experimental, para os cientistas que estavam envolvidos nessas pesquisas, a teoria atômica era uma realidade, pois era impossível acreditar em tudo o que foi relatado sem acreditar na existência dos átomos.*

*A descrição dos espectros discretos e a falta de uma explicação para eles, juntamente com alguns questionamentos não respondidos, como por exemplo, o relato feito por Scheele (seção 3.5) sobre os diferentes efeitos que o cloreto de prata (AgCl) havia sofrido quando submetido às diferentes cores (ou energias) do espectro solar, conduziram as pesquisas a um dos conceitos mais importantes para a Física do século XX: a quantização.*

<sup>32</sup> Polarizar uma onda é fazer com que ela se propague em apenas um plano.

<sup>33</sup> Aquisição de uma frequência máxima por parte de um sistema “excitado” por algum agente externo [24].

O primeiro gás a ser submetido a uma observação espectroscópica foi o hidrogênio (H), em 1853, pelo físico sueco Anders Angström (1814-1874). Após suas observações, Angström descreveu o espectro discreto do hidrogênio (H), mas não conseguiu explicar a relação entre as linhas (raias espectrais) observadas [4].

Um importante impulso para a teoria atômica foi dado pelos alemães Robert Bunsen (1811-1899) e Gustav Kirchhoff (1824-1887). Bunsen era químico e Kirchhoff era físico; quando começaram a trabalhar juntos, tinham como objetivo compreender os espectros emitidos pelos diferentes elementos químicos. Para isso eles desenvolveram, entre os anos de 1855 e 1863, um espectrógrafo<sup>34</sup> óptico e uma técnica de análise de substâncias químicas, denominada *espectroscopia* [4]. As análises de Bunsen e Kirchhoff consistiam na exposição de diversos materiais à chama do *bico de Bunsen*<sup>35</sup>, pois, quando submetidos a altas temperaturas, cada material emitia um espectro característico, que era analisado com a ajuda do espectrógrafo óptico.

*Percebe-se que mesmo sem uma explicação adequada, a comunidade científica já aceitava algumas observações, como os espectros discretos e a existência dos átomos, pois compreendiam a sua importância em algumas teorias, como por exemplo, a Teoria Cinética dos Gases. Seria muito difícil descrever o comportamento de um gás sem usar os átomos.*

*Outra constatação importante é a de que as teorias usadas até então não eram suficientes para explicar algumas observações experimentais, como por exemplo, a relação entre as linhas que compõe o espectro do hidrogênio (H) descritas por Angström. Os equipamentos de pesquisa evoluíram, mas a teoria ainda era a mesma. O tubo de Geissler (seção 4.12) surge como uma nova forma de investigar a matéria.*

#### **4.12. O tubo de Geissler**

Em 1855, o físico alemão Heinrich Geissler (1814-1879), aprimorando as técnicas existentes, construiu o *tubo de Geissler*<sup>36</sup>. O tubo de Geissler era um tubo de vidro, dentro do qual foi produzido um vácuo mais eficiente do que nos tubos usados anteriormente nos experimentos de descargas elétricas em gases rarefeitos. Essas melhorias técnicas possibilitaram a retomada nos trabalhos com descargas elétricas em gases [6].

#### **4.13. A Teoria Cinética dos Gases e o conceito de átomo**

A Teoria Cinética dos Gases (TCG), uma das grandes defensoras da teoria atômica, mesmo em uma época em que não existiam evidências experimentais para corroborá-la, ressurgiu em uma nova fase, proporcionada pelo abandono da teoria do calórico e motivada pela Primeira Lei da Termodinâmica (Conservação de Energia). Nesta nova fase, os primeiros trabalhos apresentados foram do físico alemão August Krönig (1822-1879), em 1856, e do físico e matemático alemão, Rudolf Clausius (1822-1888), em 1857.

Krönig publicou, em 1856, um trabalho no qual propôs um modelo dinâmico para estudar os gases. Sugeriu que os gases seriam constituídos por esferas perfeitamente elásticas movendo-se segundo as leis da probabilidade [15].

Em 1857, Clausius publicou um trabalho no qual apresentou um modelo dinâmico para os gases. Em seu modelo, as moléculas de um gás tinham energia

---

<sup>34</sup> Esse equipamento é similar a um espectroscópio, contudo ele não permite a observação direta de um espectro.

<sup>35</sup> É uma fonte de calor utilizada para o aquecimento de substâncias em laboratório.

<sup>36</sup> Os tubos de vidro desenvolvidos para a realização desse tipo de experimento receberam outros nomes, tais como: ampolas de Crookes ou tubos de raios catódicos.



proporcional à temperatura, demonstrando assim, que “a energia térmica de um gás era proveniente da energia cinética de suas moléculas” [25, p. 283].

Com essa afirmação, Clausius demonstrou que a Primeira Lei da Termodinâmica nada mais era do que uma lei da mecânica aplicada às partículas de um gás.

Um ano depois, Clausius publicou um artigo em que redescobre o conceito de *livre caminho médio*, anteriormente publicado por Waterston (seção 4.10). Esta redescoberta acrescentou credibilidade a esse conceito.

*O trabalho de Krönig reafirma como a ligação entre a TCG e a teoria atômica era estreita. Sua idéia sobre os gases serem constituídos por esferas é muito próxima ao conceito de átomo. E Clausius reflete em seu trabalho a importância dos trabalhos de Newton, que guiaram muitos cientistas por muito tempo.*

#### **4.14. O conceito de molécula**

Apenas em 1858, quando o químico italiano Stanislao Canizzaro (1826-1910), utilizando a *lei de Gay-Lussac* e a *hipótese de Avogadro*, estabeleceu uma tabela dos pesos atômicos e moleculares, os trabalhos de Gay-Lussac e Avogadro foram reconhecidos. Este tardio reconhecimento ocorreu pela dificuldade na elaboração de uma tabela de pesos atômicos e moleculares. Os químicos usavam diferentes métodos de resolver este problema, a maioria dos quais apresentavam grandes contradições.

Canizzaro foi o primeiro químico a especificar de uma maneira clara a elaboração de sua tabela. Esse reconhecimento foi consolidado no Congresso Internacional de Química, de 1860, realizado na Alemanha. Nesse congresso Canizzaro apresentou a distinção entre átomos e moléculas e definiu essas últimas como uma reunião de átomos [15]. A consequência mais importante do reconhecimento do trabalho de Avogadro foi o estabelecimento da constante chamada de *número de Avogadro*<sup>37</sup>, cujo valor foi determinado pela primeira vez em 1865.

#### **4.15. A retomada dos experimentos com o tubo de Geissler**

Também no ano de 1858, o físico alemão Julius Plücker (1801-1868) retomou os experimentos com descargas elétricas em gases rarefeitos, utilizando os tubos de Geissler. Nesses experimentos, Plücker observou que os raios gerados pelo cátodo<sup>38</sup> poderiam ser desviados quando submetidos a um campo magnético [6]. A partir das suas observações, Plücker pode concluir apenas que os raios identificados por ele não poderiam ser luz, pois essa não era desviada na presença de um campo magnético [4].

Esses raios foram considerados uma incógnita para a ciência por, aproximadamente, quarenta anos. Durante esse período uma grande discussão sobre a natureza desses raios dominou os meios científicos [6].

*Novamente temos observações que não puderam ser compreendidas devido a falta de teoria adequadas.*

#### **4.16. A unificação proposta por Maxwell**

O físico escocês James Clerk Maxwell, já citado na seção 4.6, ao escrever o tratado “*A Treatise on Electricity and Magnetism*” (*Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo*) conseguiu uma formulação matemática unificada para as leis presentes nos estudos sobre Eletricidade e Magnetismo<sup>39</sup> expressando-as na forma de quatro equações, hoje denominadas equações de Maxwell. A proposta das quatro leis foi

<sup>37</sup> O número de Avogadro corresponde ao número de entidades elementares (átomos ou moléculas) contidas em um mol de qualquer substância, nas mesmas condições de temperatura e pressão. Seu valor é:  $6,02 \times 10^{23}$ .

<sup>38</sup> Eletrodo negativo do aparato experimental.

<sup>39</sup> Entendam-se as leis de Coulomb, Oersted, Ampère, Biot e Savart, Faraday e Lenz.

executada quando Maxwell especulou a simetria de comportamento dos campos elétrico e magnético, no sentido da variação temporal de um gerar o outro; e o resultado mostrou-se favorável [9].

Provavelmente a consequência mais importante desta unificação foi a constatação de que as equações de Maxwell para o campo elétrico e para o campo magnético satisfaziam a uma equação análoga à equação escrita pelo físico francês Jean D'Alembert (1717-1783) para ondas elásticas. A partir dessa equação Maxwell demonstrou que a velocidade de suas ondas eletromagnéticas – ondas essas desconhecidas até então – coincidiam com a velocidade da luz, que já era conhecida, o que lhe indicou que a luz era de natureza eletromagnética. Esta previsão feita por Maxwell, em 1861, foi confirmada pelo físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894) em 1887 [9].

*O tratado de Maxwell sintetiza, do ponto de vista teórico, os conhecimentos daquela época sobre Eletricidade, Magnetismo e Ótica. Uma das grandes proezas de Maxwell foi incluir a Ótica na teoria Eletromagnética. Por isso, essa é considerada uma teoria unificadora, assim como a mecânica newtoniana.*

#### **4.17. A consolidação da Teoria Cinética dos Gases**

Em 1866, o físico austríaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) publicou o artigo intitulado “Sobre a interpretação mecânica da segunda lei da teoria do calor”. Segundo Dahmen [25], nesse artigo Boltzmann tentou fundamentar a Segunda Lei da Termodinâmica utilizando a aplicação de princípios mecânicos às moléculas de um gás. Ao fazer isso, Boltzmann assumiu a teoria atômica, mas essa não foi a única polêmica nos seus trabalhos, pois, como conclusão desse artigo, ele apresentou que a irreversibilidade nos processos naturais não era impossível, apenas improvável, apresentando, dessa forma, a Segunda Lei da Termodinâmica como uma lei probabilística. Essa foi uma das grandes contribuições de Boltzmann à ciência. Ele introduziu o conceito de probabilidade como fundamental para a descrição dos sistemas naturais.

Boltzmann conhecia os trabalhos de Maxwell, sobre a TCG, de 1859 e 1867, pois os cita em seu trabalho de 1868, no qual abordou o problema de distribuição de velocidades das moléculas de um gás. Boltzmann era um grande admirador dos trabalhos de Maxwell e ajudou a popularizar os seus trabalhos sobre Eletromagnetismo na Europa continental [25, p. 284].

Contudo, os trabalhos de Boltzmann não foram bem recebidos por seus contemporâneos. Essa rejeição pode ter ocorrido porque ele aceitou a hipótese atômica, até aquele momento sem comprovação, ou talvez pela introdução do conceito de probabilidade. Mesmo assim, este foi o primeiro de uma série de artigos sobre esse último conceito que marcou o início da Mecânica Estatística e consolidou a TCG [16].

*Os resultados obtidos pela TCG e a formulação do conceito de átomo científico, elaborado no século XIX, por Dalton, contribuiu para a aceitação da teoria atômica e consolidaram a visão mecanicista da natureza. Isso pode ser verificado na definição dada por pelo físico irlandês Lorde Kelvin (1824-1907):*

“O átomo é um pedaço de matéria com forma, movimento e leis de ação, objeto inteligível da investigação científica” [4, p. 97].

#### **4.18. Mais uma tentativa**

Entre a busca pela confirmação da hipótese atômica e a evolução de novas ideias sobre esse tema, temos alguns cientistas, como o físico alemão Wilhelm Weber

(1804-1891), que acreditava na existência do átomo, e dedicou-se a aprimorar o trabalho de Fechner (seção 4.7). Entre os anos de 1862 e 1871, Weber propôs modificações no modelo que Fechner de 1828. Segundo Weber, as partículas imponderáveis que envolveriam o átomo seriam atraídas para o núcleo devido a uma força de origem elétrica [6].

*Durante o século XIX, percebe-se exatamente um comportamento dual dos cientistas: aqueles que já acreditavam na existência dos átomos e outros, que ainda esperavam por uma comprovação experimental.*

#### **4.19. A Tabela Periódica de Mendeleev**

Acompanhando uma das tendências científicas da época, a Química também buscava pelo constituinte elementar da matéria. Utilizando a tabela de pesos atômicos e moleculares de Canizzaro (seção 4.14) e o conhecimento acumulado até aquele momento, o químico russo Dmitri Mendeleev (1834-1907) elaborou a Tabela Periódica dos elementos químicos em 1869. Mendeleev agrupou os elementos de acordo com seus pesos atômicos e suas características físico-químicas, guiando-se pelos ideais da ciência grega, como a síntese e a simetria [4].

A convicção nesses ideais levou Mendeleev a prever elementos químicos que ainda não haviam sido identificados. Dois exemplos das previsões feitas por Mendeleev são os elementos gálio (Ga) e germânio (Ge). Esses elementos foram previstos por Mendeleev em 1869: a existência do gálio (Ga) foi confirmada em 1875 pelo químico francês Lecocq de Boisbaudran (1838-1912), e o germânio (Ge) foi identificado em 1886 pelo químico alemão Klemens Winkler (1838-1904).

A Tabela Periódica de Mendeleev também recebeu contribuições valiosas da espectroscopia. Vários elementos químicos foram identificados com o uso dessa técnica, preenchendo assim muitas lacunas existentes na Tabela [17]. Por exemplo, os cientistas alemães Bunsen e Kirchhoff (seção 4.11), identificaram o céscio (Cs) e o rubídio (Rb) usando esta técnica de análise [17, p. 24]. A espectroscopia também foi a responsável pela identificação do ferro (Fe) e do cobre (Cu) na atmosfera solar, abrindo caminho para uma importante área de investigação, a Astrofísica<sup>40</sup> [4].

A convicção de Mendeleev na previsibilidade da sua teoria é um legado tão importante quanto a elaboração da Tabela Periódica. Outra constatação importante que surgiu a partir da Tabela Periódica elaborada por Mendeleev, foi a ideia que os elementos químicos poderiam ter uma origem comum. Reforçando a ideia de que a partícula elementar deveria existir e que ela deveria ser a base de todos os elementos químicos [18].

A Tabela Periódica que conhecemos atualmente já foi modificada algumas vezes depois dos trabalhos de Mendeleev, com a inclusão das séries dos *lantânídeos* ou *terras raras*, em 1895, e dos *actinídeos*, em 1945. Quando o químico norte-americano Glen Seaborg (1912-1999) sugeriu a inclusão da série dos actinídeos, ele apresentou uma versão da Tabela Periódica muito semelhante à Tabela Periódica atual, apenas faltavam os nove elementos que completavam a série dos actinídeos, acrescentados cinquenta anos depois.

*Percebe-se na Química, e na ciência em geral, a mesma busca que motivou os cientistas desde a Grécia antiga, a busca pela perfeição, pela simetria. Imagina-se que essa perfeição exista na natureza, e ela pode ser a chave para que possamos entender sua estrutura. Na busca pelo constituinte elementar da matéria os cientistas têm mantido esse ideal, o que tem se mostrado importante para o desenvolvimento da ciência.*

---

<sup>40</sup> Ramo da Astronomia que estuda a Física do Universo.

#### **4.20. Novamente os tubos de Geissler**

Também em 1869, o físico alemão Johann Hittorf (1824-1914), repetiu o experimento de seu professor, Plücker (seção 4.15) encontrando resultados que corroboraram os resultados de Plücker. Foi apenas naquele momento que foi confirmado que eram raios o que se propagava dentro dos tubos de vidro: Hittorf colocou um objeto diante do cátodo e percebeu que, quando os eletrodos eram ligados, uma sombra se formava na parede de vidro atrás do objeto, mostrando, que as emissões se deslocavam em linha reta [26].

Foi no ano de 1871 que o físico inglês Cromwell Varley (1828-1883) constatou que os raios identificados por Plücker eram partículas carregadas negativamente. De qualquer forma, os raios ou as partículas, receberam o nome de *raios catódicos*<sup>41</sup>, em 1876, do físico alemão Eugen Goldstein (1850-1931) [6].

Entretanto, outros experimentos realizados por ingleses, sugeriam diferentes conclusões. Para demonstrar que os raios catódicos eram constituídos por partículas, eles deveriam possuir energia cinética. Para isso, o tubo descrito acima tinha em seu interior uma hélice que girava quando atingida pelos raios catódicos. Assim, quando o aparato experimental era ligado, os raios ao atingirem a hélice, provocavam o seu movimento, o que levou a conclusão de que eles eram constituídos por partículas, pois apenas as partículas possuíam energia cinética.

Esses experimentos aumentaram as especulações sobre a natureza dos raios catódicos, e os cientistas dividiram-se em dois grupos: os que acreditavam que os raios catódicos eram ondas, liderados por Hertz e os que acreditavam que os raios catódicos eram partículas carregadas negativamente, liderados pelo físico inglês William Crookes (1832-1919); ambos pesquisadores desenvolveram trabalhos tentando validar suas hipóteses.

Os trabalhos de Faraday com a eletrólise (seção 4.9) motivaram o físico irlandês George Stoney (1826-1911), a estimar o valor da carga elementar, em 1874. Stoney sugeriu que a carga elementar fosse chamada de *elétron*<sup>42</sup> [4], que em grego significa âmbar [9].

A proposta da Teoria Iônica pelo químico sueco Svante Arrhenius (1859-1927), em 1884, foi importante porque corroborou as ideias apresentadas por Faraday, em 1833. Segundo essa teoria, os íons que constituíam a corrente elétrica na eletrólise, eram átomos carregados eletricamente [6]. Por esse trabalho Arrhenius recebeu o Prêmio Nobel de Química em 1903 [27].

*Os trabalhos de Faraday, Arrhenius e Stoney contribuíram para a discussão que se travou sobre a existência de uma partícula subatômica.*

#### **4.21. Mais um passo na direção da quantização**

Trinta e dois anos depois da descrição das linhas espectrais do hidrogênio (H) por Angström (seção 4.11), em 1885, o matemático alemão Johann Balmer (1825-1898), movido por um dos ideais mais duradouros da ciência, o da simetria, formulou uma equação matemática capaz de relacioná-las. Segundo Balmer, o mundo inteiro relaciona-se por meio de uma harmonia unificada, harmonia essa expressa através de sua equação [4].

---

<sup>41</sup> Os raios catódicos receberam essa denominação porque eram provenientes do cátodo, eletrodo negativo do aparato experimental.

<sup>42</sup> Provavelmente, Tales de Mileto (século VI a. C.) foi o primeiro a utilizar esse termo (elektron) que significa âmbar, quando descreveu a capacidade do âmbar; resina encontrada em uma espécie de pinheiro, de atrair corpos leves quando preliminarmente atritada.

O que Balmer argumenta como motivador para a elaboração de sua equação, a harmonia universal, já havia sido utilizada como “guia” por muitos filósofos/cientistas ao longo dos séculos, marcando a importância da antiga ciência grega no desenvolvimento científico universal.

A equação empírica de Balmer (Equação 1) foi de fundamental importância para o desenvolvimento de novas ideias, pois relacionava os comprimentos de onda (ou energias) das raias, representados por  $\lambda$ , com números inteiros, representados por  $n$ ; assim, as trocas de energia nos átomos foram associadas a valores discretos [17], ainda que não houvesse qualquer explicação adequada para esse comportamento, nem na Mecânica, nem no Eletromagnetismo. Essa equação está expressa abaixo:

$$\lambda = 3645,6 \frac{n^2}{n^2 - 4}, \text{ onde } n = 3, 4, 5, 6 \quad (1)$$

Essa foi uma das muitas ideias que surgiram no final do século XIX que não puderam ser respondidas adequadamente pelas teorias científicas vigentes. Esta inadequação das teorias aos resultados obtidos pelos experimentos será importante para a formulação da chamada Física Moderna.

#### **4.22. Os raios canais**

Trabalhando com descargas elétricas em gases, Goldstein (seção 4.20), autor da denominação dos raios catódicos, observou, em 1886, um comportamento diferente desses raios ao serem emitidos por um tipo particular de cátodo. Quando o cátodo presente no tubo tinha perfurações na forma de canais, os raios emitidos moviam-se em direção oposta à normalmente observada. Pelo seu comportamento peculiar, Goldstein os denominou *raios canais* [6].

#### **4.23. Retomada dos trabalhos de Balmer**

Alguns anos após a elaboração da equação de Balmer (seção 4.21), o físico sueco Johannes Rydberg (1854-1919), em 1890, reescreveu essa equação em termos do número de onda<sup>43</sup> e observou que as posições das raias espectrais de alguns elementos químicos apresentavam um fator numérico constante que ficou conhecido como a *constante de Rydberg* [28].

A busca de respostas por meio dos espectros continuou, em 1906, com o físico norte-americano Theodore Lyman (1874-1954), que encontrou outras séries espectrais do hidrogênio (H) na região do ultravioleta [29]. Em 1908, o físico alemão Louis Paschen (1865-1947) encontrou séries espectrais do hidrogênio (H) na região do infravermelho [28]. E, em 1922 e 1924, respectivamente, os também físicos norte-americanos, Frederick Brackett (1896-1972) e August Pfund (1879-1949) identificaram novas séries espectrais do hidrogênio (H) presentes na região do infravermelho [21].

#### **4.24. Os raios X**

Apesar de um grande número de cientistas desenvolverem trabalhos sobre a condução de eletricidade através de gases, ainda existiam muitas dúvidas sobre este tema. Até aquele momento, os raios catódicos (seção 4.20) só haviam sido observados dentro de tubos, razão pela qual alguns cientistas se perguntaram se os raios catódicos poderiam se propagar no ar.

---

<sup>43</sup> O número de onda é o inverso do comprimento de onda.

Tentando responder a essa questão, em 1894, o físico austro-húngaro Philipp Lenard (1862-1947), então assistente de Hertz, montou um equipamento que o ajudou a verificar a propagação dos raios catódicos fora do tubo [4].

Esse equipamento tinha como base os tubos de descargas usados até então, com uma fina janela de alumínio por onde os raios catódicos poderiam sair. Assim, Lenard conseguiu constatar que os raios catódicos podiam se propagar também no ar, contudo, só atingiam uma distância muito pequena, de alguns centímetros [30]. Seu trabalho também detectou que os raios provenientes destes tubos podiam impressionar chapas fotográficas e tornar fluorescentes alguns materiais, como o platino-cianeto de bário –  $\text{BaPt}(\text{CN})_4\text{H}_2\text{O}$  [4] e descarregar eletroscópios<sup>44</sup> [30]. Os estudos desenvolvidos com os raios catódicos conferiram-lhe o Prêmio Nobel, em 1905.

Interessado pelo assunto, o físico alemão Wilhelm Röntgen (1845-1923), começou a estudar a fluorescência presente em algumas substâncias. Para isso, ele utilizou como base para seus trabalhos o equipamento utilizado por Lenard com algumas adaptações. Por exemplo, ele isolou o tubo em uma caixa de papelão na tentativa de evitar que a radiação visível e a ultravioleta, provenientes do próprio tubo, fossem emitidas junto com os raios catódicos [4].

Após essas adaptações, Röntgen observou que quando o tubo estava ligado, e próximo a ele colocava-se um cartão coberto por uma solução de platino-cianato de bário, esse ficava iluminado. Contudo, ele sabia que os raios catódicos propagavam-se apenas alguns centímetros no ar. O que também chamou a atenção de Röntgen foi que o cartão que ficou iluminado sequer estava na linha de feixe dos raios catódicos. Ele também observou que ao colocar sua mão entre o tubo de raios catódicos e esse cartão, viu a imagem dos ossos de sua mão, como se sua pele e músculos se tornassem translúcidos [31]. Com estes resultados e novas observações, Röntgen percebeu que estava diante de um tipo de raio diferente dos raios catódicos; esse novo raio foi chamado de raios X. A escolha da letra X se deve a referência à incógnita de um problema a resolver [4]. A observação dos raios X por Röntgen aconteceu em 1895 na Alemanha. Por esse trabalho, Röntgen foi o primeiro cientista a receber o Prêmio Nobel de Física, em 1901.

Röntgen identificou que os raios X eram provenientes da parede do tubo onde a fluorescência era mais forte, o centro de irradiação, que enviava raios em todas as direções<sup>45</sup>. Com suas observações, Röntgen percebeu que os raios X não eram desviados por campos magnéticos e que seu poder de penetração em certos materiais, como a madeira e o papel, era muito maior do que qualquer outra onda eletromagnética até então conhecida [4].

Apesar da identificação de algumas características dos raios X, Röntgen não havia identificado sua natureza. Mesmo assim, isso não impediu que apenas quatro dias após a chegada da notícia da identificação dos raios X aos Estados Unidos, eles fossem utilizados na localização de uma bala na perna de uma paciente. Dessa forma, o uso dos raios X na medicina se popularizou [31]. Durante alguns anos a discussão sobre a natureza desses raios tomou conta das conversas na comunidade científica, assim como a discussão sobre a natureza dos raios catódicos.

Atualmente, sabe-se que para o funcionamento de um tubo de raios X, é necessária a aplicação de alta tensão, que provocará a o aquecimento do cátodo e a emissão de elétrons do mesmo. Esses elétrons colidirão com o ânodo e essa colisão provocará a emissão dos raios X.

---

<sup>44</sup> Eletroscópios são aparelhos utilizados para identificar se um corpo está eletrizado; os eletroscópios mais comuns são o pêndulo eletrostático e o eletroscópio de folhas.

<sup>45</sup> Nos tubos utilizados por Röntgen, o cátodo e o ânodo formavam um ângulo reto entre si. Dessa forma o feixe de raios catódicos atingia o vidro e não o ânodo [31].

#### **4.25. Novamente os raios catódicos**

Em 1895, o físico francês Jean Perrin (1870-1942) realizou experimentos sobre descargas elétricas em gases rarefeitos. Nesses experimentos Perrin identificou duas partículas subatômicas de grande importância para a história da Física de Partículas: o próton e o elétron.

Refazendo o experimento de Goldstein (seção 4.22) e revisando seus resultados, Perrin mostrou que os *raios canais* eram desviados quando submetidos a um campo elétrico. Também confirmou que esse desvio ocorria em sentido oposto ao dos raios catódicos [27].

A partir dessas observações, Perrin pode concluir que um feixe de raios catódicos era composto por dois tipos de emissão; os raios catódicos e os raios canais.

*Esses trabalhos foram contribuindo para a perspectiva de o átomo ser constituído por partes menores, as partículas subatômicas, de características diferenciadas.*

#### **4.26. As primeiras observações sobre a Radioatividade**

Nesta época os raios X (seção 4.24) se tornaram um dos grandes campos de pesquisa.

Depois de ouvir uma apresentação sobre os trabalhos de Röntgen, feita pelo físico francês Henri Poincaré (1854-1912), na Academia de Ciências da Paris em 1896, o físico francês Antoine Becquerel (1852-1908), que estudava a luminescência, se interessou em estudar os raios X e sua relação com a fluorescência<sup>46</sup> [4].

Seus trabalhos começaram com a investigação de algumas substâncias que anteriormente já haviam sido classificadas como fosforescentes; uma das substâncias utilizadas foi um sal de urânio. Becquerel envolveu uma chapa fotográfica em um papel preto bem espesso com intenção de protegê-la da luz, colocou uma amostra do sal de urânio sobre o filme e expôs o conjunto por várias horas ao Sol. Como era esperado, após a revelação, a silhueta da amostra aparecia no negativo. Os resultados de Becquerel pareciam indicar que o sal de urânio realmente havia emitido raios X [4]. Contudo, uma observação feita de forma casual alterou estas conclusões. Ao preparar o material para mais um experimento, Becquerel constatou que o dia estava nublado e não poderia expor o conjunto ao Sol, então guardou-o em uma gaveta. Becquerel imaginava que revelando a chapa fotográfica ela teria um fraco contorno da amostra, mas qual não foi sua surpresa quando viu que o contorno da amostra que não havia sido exposta ao Sol era mais intenso do que o da amostra que havia sido exposta. Becquerel havia identificado um novo fenômeno: o sal de urânio era capaz de emitir uma radiação invisível capaz de penetrar no papel preto, mesmo sem estar exposto à luz solar [4].

As constatações de Becquerel levaram-no a testar vários compostos de urânio e o próprio urânio (U) metálico, e todos apresentaram a mesma característica identificada anteriormente: eram capazes de emitir uma radiação invisível. Essa constatação poderia ter levado Becquerel a reconhecer que esses raios invisíveis tinham como origem a fosforescência, contudo ele presumiu exatamente o contrário, que era o metal o responsável pela emissão da fosforescência. Aparentemente, ele ficou satisfeito com

---

<sup>46</sup>Atualmente entendida da seguinte forma: luminescência quando um átomo, de um determinado elemento, absorve um fóton passa para um estado de maior energia. Ao voltar ao seu estado fundamental, o átomo emite a radiação correspondente. Essa liberação de energia pode ser percebida pela emissão de luz visível [32, p. 273]. Se a absorção de energia ocorre quase que simultaneamente com a emissão, esse fenômeno recebe o nome de fluorescência. Mas quando o tempo entre absorção e emissão de energia é razoavelmente longo o fenômeno recebe o nome de fosforescência [33].

esta conclusão, pois, não prosseguiu suas pesquisas nesse tema [34]. Com estes trabalhos, Becquerel deu início à era da Física Atômica e Nuclear [35].

Pode-se concluir que os trabalhos de Becquerel tiveram como mérito identificar a emissão desses raios, mas não detectaram a sua origem nem as condições necessárias para sua emissão. Esse assunto intrigou os cientistas por muitos anos, e só foi respondido com os conceitos provenientes da Mecânica Quântica, no século seguinte [4].

Conforme [36], simultaneamente ao desenvolvimento dos trabalhos de Becquerel, o físico e engenheiro elétrico inglês Silvanus Thompson (1851-1916), também identificou outros elementos que emitiam radiação. Thompson trabalhou com substâncias fosforescentes, como o sulfeto de bário (BaS), que quando exposto à luz solar eram capazes de emitir uma radiação similar aos raios X; a essa emissão ele denominou hiperfosforescência. Após essas observações, Thompson enviou uma carta para o físico e matemático inglês George Stokes (1819-1903) relatando seus trabalhos. Na resposta de Stokes, ele recomendava a Thompson que publicasse logo seus trabalhos, pois muitos eram os trabalhos sobre os raios X.

#### **4.27. Ainda sobre a Espectroscopia**

Ainda tentando compreender o comportamento das raias espectrais emitidas pelos materiais, o físico holandês Peter Zeeman (1865-1943) desenvolveu estudos em que submeteu o espectro da luz emitida por gases a um campo magnético. Esse experimento conduziu às primeiras evidências sobre a *existência do elétron* sendo denominado de *efeito Zeeman* [4].

A idéia de Zeeman para este experimento foi inspirada nos trabalhos de Faraday relacionados ao efeito Faraday (seção 4.11). Na verdade, Zeeman considerou importante refazer o experimento de Faraday com novos equipamentos, com melhor resolução do que os disponíveis na época de Faraday. Ele também foi incentivado por uma declaração de Maxwell, na qual ele afirmava que não existia força na natureza que alterasse a frequência de oscilação dos “pequenos corpos” [4].

Assim, em 1896, Zeeman observou o alargamento das raias espectrais do vapor de sódio (Na). E, um ano depois, em 1897, Zeeman observou o desdobramento da linha azul do espectro atômico do cádmio (Cd) em linhas mais finas devido a ação de um campo magnético [4, p. 232].

Seus resultados foram discutidos com o físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928), de quem Zeeman era assistente. Com os dados obtidos em seus experimentos, sugeriu a explicação expressa por força de Lorentz<sup>47</sup>, o que permitiu que Zeeman propusesse a existência de uma carga fundamental no interior do átomo. Outro importante argumento foi a sua teoria do elétron, desenvolvida alguns anos antes, em 1892. Essa teoria dizia que a eletricidade possuía uma estrutura composta de partículas carregadas que foram denominadas *íons*, em 1895, e *elétrons*, em 1899. Segundo essa teoria, os elétrons seriam os responsáveis pela emissão do espectro luminoso dos corpos devido às oscilações que ocorreriam no interior desses corpos [37]. Esta foi a base da explicação do efeito Zeeman dada por Lorentz; que as emissões dos espectros ocorreriam devido ao movimento vibratório dos elétrons no interior dos átomos, e que a frequência da luz emitida por eles seriam alterada quando eram submetidos a um campo magnético [4]. Zeeman escreveu em seu diário:

---

<sup>47</sup> Força que age sobre uma partícula de carga  $q$ , em movimento, sujeita a campos elétrico e magnético.



“Finalmente confirmado que de fato existe uma ação da magnetização sobre a vibração da luz (...) [Lorentz] chamou isto de uma prova direta da existência de íons” [4, p. 233].

O elétron, previsto por Stoney, em 1874, e por Lorentz, em 1892, acabava de ser confirmado por Zeeman; seus resultados foram tão eficientes que foi possível estimar a ordem de grandeza da razão carga/massa do elétron ( $e/m$ ) [4].

*Os trabalhos de Zeeman chamaram a atenção para a existência de algo no interior do átomo. Esses “corpos pequenos”, íons ou elétrons, realmente deveriam existir. Esta linha de trabalho indicava que a ciência já havia incorporado a existência dos átomos não mais como estrutura indivisível, mas com algo em seu interior.*

O efeito Zeeman representou um fenômeno de grande importância porque ajudou a desvendar a estrutura atômica da matéria, além de desempenhar um papel de destaque no trabalho do físico austríaco Wolfgang Pauli (1900-1958), cujo *princípio de exclusão*<sup>48</sup> auxiliou na compreensão do spin<sup>49</sup> do elétron. E em 1902, Zeeman e Lorentz dividiram o Prêmio Nobel de Física por seus trabalhos sobre a influência dos campos magnéticos sobre a radiação.

Os trabalhos de Zeeman foram corroborados pelo físico inglês, Joseph Thomson (1856-1940), que, em 1897, confirmou as expectativas da comunidade científica inglesa, quando identificou a existência dos elétrons. Contudo, seus trabalhos começaram muito antes desta época. Foi no ano de 1884, como professor de Física Experimental no laboratório Cavendish<sup>50</sup>, que Thomson começou a estudar a condução de eletricidade através dos gases [38].

#### **4.28. O elétron**

No final do século XIX, os cientistas europeus estavam intensamente envolvidos na discussão sobre a natureza dos raios catódicos. Como foi dito anteriormente (seção 4.20), para os ingleses, liderados por Crookes, os raios catódicos seriam constituídos por partículas carregadas negativamente; já para o grupo alemão, liderado por Hertz, os raios catódicos seriam ondas, ou seja, perturbações que se propagariam no éter<sup>51</sup> [26]. A teoria alemã estava ganhando adeptos, pois Hertz havia observado que os raios catódicos eram capazes de atravessar uma fina lâmina de ouro (Au). Essa observação era muito difícil de ser explicada pelos adeptos da teoria corpuscular. Como explicar que partículas poderiam passar através de matéria sólida?

Hertz também realizou outro experimento, que comprometeria a versão inglesa para os raios catódicos. Segundo esse experimento, os raios catódicos não sofreriam nenhuma alteração quando submetidos à ação de um campo elétrico. A discordância com o resultado desse experimento levou Thomson a repeti-lo no ano de 1897 [39].

Thomson percebeu que poderia desviar os raios catódicos produzindo um campo elétrico com o auxílio de um par de placas metálicas carregadas com cargas opostas e com um vácuo mais eficiente do que o feito por Hertz. Ele percebeu que o erro no experimento de Hertz era o excesso de gás no tubo por onde os raios catódicos passavam. Pois esse gás tornava-se ionizado devido ao campo elétrico; e as cargas

<sup>48</sup> Princípio da Física Quântica segundo o qual dois férmions idênticos não podem ocupar simultaneamente o mesmo estado quântico. Uma das conseqüências deste princípio é observada na ocupação pelos elétrons das diferentes camadas de um átomo [24, p. 184].

<sup>49</sup> Quantidade característica da Física Quântica sem equivalente clássico e que pode ser compreendida como o momento angular intrínseco de uma partícula que toma valores característicos para tipos diferentes de partículas [24, p. 214].

<sup>50</sup> O laboratório Cavendish faz parte do departamento de Física da Universidade de Cambridge, situada na cidade de Cambridge, Inglaterra.

<sup>51</sup> Hipótese que supunha ser necessário à propagação das ondas eletromagnéticas um fluido imaterial que permearia todo o espaço. Contudo essa hipótese foi descartada após diversos experimentos que demonstraram que as ondas eletromagnéticas se propagavam no vácuo.

elétricas depositavam-se sobre as placas diminuindo a intensidade do campo elétrico. Dessa forma, o campo remanescente era tão pequeno que defletia muito pouco ou quase não defletia os raios catódicos [39].

Corrigindo esse erro, Thomson conseguiu, não só observar a deflexão dos raios catódicos, quando submetidos a um campo elétrico, como observou que os raios moviam-se em direção à placa positiva, concluindo que esses raios só poderiam ser carregados negativamente [40].

*Até aqui, temos a primeira conclusão importante dos trabalhos de Thomson: os raios catódicos têm carga negativa. Com esse resultado, ele conseguiu atrair mais atenção para a proposta inglesa sobre a natureza dos raios catódicos. Contudo, Thomson ainda deveria explicar como os raios catódicos poderiam ter atravessado a lâmina metálica.*

Para responder essa questão, propôs o seguinte: com o campo elétrico aplicado, haveria a deflexão dos raios catódicos, mas se houvesse um equilíbrio entre o campo elétrico e o campo magnético, esses raios mover-se-iam em linha reta. Com esse equilíbrio, seria possível calcular a velocidade. Sobre a velocidade encontrada, Thomson relatou em sua conferência ao receber o prêmio Nobel:

“...muitas milhares de vezes maior que a velocidade média com a qual as moléculas de hidrogênio estão se movendo em temperaturas ordinárias...” [26, p. 302].

Com esse resultado, Thomson pôde calcular a razão carga/massa ( $e/m$ ) dos raios catódicos. Um resultado interessante desse cálculo foi que não importava a maneira com que os raios catódicos haviam sido produzidos, o valor encontrado para a razão  $e/m$  era sempre o mesmo. Tanto os eletrodos como o gás poderiam ser diferentes, mas a razão  $e/m$  era sempre constante [26, p. 302]. Esse resultado levou Thomson a concluir que essas partículas deveriam estar presentes em todos os materiais. Além disso, Thomson percebeu que seu resultado apresentava um valor muito próximo ao encontrado por Zeeman [4].

Outro dado que chamou muito a atenção de Thomson foi que a razão  $e/m$  dos raios catódicos era muito menor do que a do hidrogênio (H), único elemento que havia sido calculado a razão  $e/m$ . Isso levava a duas possibilidades: ou a massa dos raios catódicos era muito menor que a massa do hidrogênio (H), a menor massa conhecida até esse momento, ou a carga elétrica dos raios catódicos era muito maior do que a do hidrogênio (H). Thomson percebeu que a carga elétrica do hidrogênio (H) e dos raios catódicos era praticamente a mesma; logo, concluiu que a massa dos raios catódicos era muito menor do que a do hidrogênio (H). Isso levou Thomson a concluir que o átomo, até esse momento, representado pelo hidrogênio (H), não é a menor parte da matéria, existe algo menor que ele chamou de *corpúsculo*<sup>52</sup> [26].

*A identificação de que essa partícula era muitas vezes menor que o átomo também deu credibilidade à proposta inglesa sobre a constituição dos raios catódicos, pois somente uma partícula muito pequena poderia atravessar um material sólido; o que explicaria a observação de Hertz.*

*Analisando-se a contribuição de Thomson, naquele momento, pode-se concluir que ele confirmou as expectativas de que existia algo menor que o átomo, o corpúsculo; e que sua carga era negativa. Uma observação muito importante ocorreu quando Thomson percebeu que a razão  $e/m$  dos corpúsculos era constante, não importando o material que eram confeccionados os eletrodos ou o tipo de gás dentro*

---

<sup>52</sup> Que mais tarde passou a ser chamado de elétron, representado por e.

*do tubo no qual os raios catódicos se propagavam - esses corpúsculos deveriam estar presentes em toda a matéria.*

Após a sua identificação foi exatamente isso que aconteceu. Verificou-se que os “corpúsculos” eram liberados por materiais aquecidos, também por metais alcalinos quando expostos à luz e por substâncias radioativas [26]. Sobre essas observações, Thomson relatou na mesma conferência em que recebeu o prêmio Nobel:

“...Parece formar uma parte de todos os tipos de matéria sob as mais diversas condições; é natural, portanto, considerá-los como um dos tijolos dos quais os átomos são construídos.” [26, p. 303].

*A confirmação de que os raios catódicos eram formados por partículas, os corpúsculos, com carga negativa e sendo menores do que o átomo, constituiu a identificação experimental da primeira partícula subatômica. O caminho para essa confirmação já vinha sendo construído por muitos cientistas durante alguns anos, o experimento realizado por Thomson foi o fato que concretizou essa ideia.*

Sobre os trabalhos desenvolvidos com os raios catódicos, e a importância dos seus resultados, Crookes assim se manifestou:

“Parece, finalmente, que temos nas nossas mãos, e sob nosso controle, as pequenas partículas indivisíveis que, com boa margem de certeza, parecem constituir a base física do Universo.” [4, p. 241].

A metodologia experimental de Thomson, valendo-se de medidas indiretas, permitiu-lhe determinar a razão carga/massa do elétron; o valor absoluto da carga elétrica ainda permanecia indeterminado. Para determiná-lo, foram necessárias medidas diretas. E o próprio Thomson já pensava nisso quando usou a *câmara de nuvens*<sup>53</sup>, desenvolvida pelo seu aluno, o físico escocês, Charles Wilson (1869-1959). Ela foi usada pela primeira vez em 1898 para determinar a carga do elétron [4]. Esse equipamento consistia em um recipiente fechado onde um vapor super-resfriado se condensaria em gotículas com a passagem de um feixe de partículas carregadas<sup>54</sup> [41]. Contudo, ele precisava ser aperfeiçoado. Por seu trabalho com a câmara de nuvens, Wilson recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1927<sup>55</sup>.

*Assim, apesar da câmara de nuvens ter apresentado alguns problemas, ela foi o primeiro equipamento a propiciar a possibilidade da visualização do efeito provocado pela interação com as partículas que compõem a matéria.*

Thomson recebeu o Prêmio Nobel de Física, em 1906, por seus trabalhos com descargas elétricas em gases.

Partindo do princípio que os átomos eram neutros, como explicar a existência dos elétrons? E será que existiam apenas elétrons? Não deveria existir algo positivo dentro do átomo?

Thomson foi o primeiro a criar um modelo, baseado em constatações experimentais, para o átomo. Isso aconteceu em 1899, sua ideia inicial era que o átomo era composto por um grande número de elétrons e uma quantidade de carga positiva, para que houvesse um balanceamento na carga total. Esse modelo inicial foi substituído por um mais elaborado cinco anos depois [4].

No ano de 1899, os corpúsculos de Thomson passaram a ser conhecidos como *elétrons*, conforme proposto anteriormente por Stoney. E após mais de 110 anos, ainda

<sup>53</sup> Esse equipamento também ficou conhecido como câmara de Wilson ou câmara de bolhas.

<sup>54</sup> É o mesmo fenômeno que ocorre com os aviões, pois os gases emitidos com a combustão do combustível provocam uma condensação do vapor, formando assim aqueles traços brancos que vemos quando os aviões cruzam o céu [40, p. 71].

<sup>55</sup> Esse prêmio foi partilhado com Arthur Compton.

não foi encontrada nenhuma estrutura atômica menor do que o elétron; contudo, as origens de sua massa e de sua carga elétrica continuam desconhecidas [4].

*A comprovação da existência do elétron corroborou as idéias de Faraday (1833), Stoney (1874), Arrhenius (1884) e Zeeman (1897), dentre outros. Assim, sabendo que existiam partículas que compunham o átomo, a comunidade científica tentou explicar como essas partículas se organizavam dentro dos átomos, integrando teorias e resultados experimentais.*

#### **4.29. A Radioatividade**

Era final de 1897, quando a física polonesa, que vivia na França, Marie Curie<sup>56</sup> (1867-1934), também conhecida como Madame Curie, procurava um assunto para sua tese de doutoramento e deparou-se com os trabalhos de Becquerel, publicados em 1896 na *Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris (Relatórios Semanais de Reuniões da Academia de Ciências de Paris)*. O interesse por aqueles trabalhos foi imediato, e logo passou a estudar os “raios de Becquerel”, expressão usada inicialmente por ela para designá-los [36].

Madame Curie pretendia refazer os trabalhos de Becquerel e complementar suas conclusões com resultados quantitativos [4, p. 282]. Para isso, utilizou a piezoelectricidade<sup>57</sup>, que havia sido identificada por seu marido, Pierre Curie, juntamente com o irmão desse, o químico francês Paul-Jacques Curie (1855-1941), em 1880 [36].

Inicialmente, Madame Curie confirmou que os “raios de Becquerel” eram uma propriedade atômica presentes em algumas substâncias. Em seus trabalhos, detectou que o tório (Th) também era capaz de emití-los. Suas observações levaram-na a propor que a denominação “raios de Becquerel” não era adequada, sugerindo o termo *radioatividade*<sup>58</sup> para esse fenômeno.

Outra contribuição importante de Madame Curie foi a constatação de que os raios X e os raios emitidos por esses elementos tinham uma grande diferença em seu poder de propagação; os raios emitidos pelo tório (Th) e pelo urânio (U) propagavam-se poucos centímetros a partir da fonte emissora e sua penetração na matéria sólida era de apenas alguns milímetros [4, p. 283].

As análises de Madame Curie, feitas em diferentes rochas e minérios, classificaram como radioativos aqueles que apresentavam em sua composição algum percentual de urânio (U) ou tório (Th). Ao mesmo tempo, identificaram elementos que apresentavam radioatividade três ou quatro vezes maior que o urânio (U) e o tório (Th). Essa identificação foi fundamental para uma conclusão muito importante: era provável que as amostras que apresentavam uma radioatividade maior deveriam conter algum elemento ainda não identificado. Desta forma, Madame Curie apresentou ao mundo científico uma nova forma de identificar novos elementos, a análise radioativa. Assim como a espectroscopia havia, anteriormente, expandido as fronteiras da Física, a radioatividade fez o mesmo. A identificação de novas substâncias, usando a radioatividade, foi o tema de trabalho de grande parte da vida de Madame Curie [4].

Investigando a possibilidade de existência de um elemento mais radioativo que o urânio (U) e o tório (Th), Madame Curie, com o auxílio de seu marido, identificou um novo elemento que foi denominado *polônio* (Po), em homenagem a sua terra natal. O anúncio aconteceu em julho de 1898. Em setembro do mesmo ano, o casal Curie

---

<sup>56</sup> Maria Sklodowska nasceu em Varsóvia, capital da Polônia e passou a se chamar Marie Curie após seu casamento com o físico francês Pierre Curie (1859-1906).

<sup>57</sup> O efeito piezoelétrico é o aparecimento de uma diferença de potencial entre as faces de um cristal, por exemplo, o quartzo, quando sujeito a uma compressão [4, p. 284].

<sup>58</sup> O núcleo atômico é normalmente estável e tem certa energia compatível com sua estabilidade. Quando esse núcleo apresenta energia em excesso, e para baixar o seu nível de energia e ficar estável, emite partículas [42].

anunciou a identificação de um novo elemento radioativo, o *rádio* (Ra). A identificação desses novos elementos resultou do trabalho que o casal empreendeu na extração de impurezas de minérios de urânio que apresentavam mais radioatividade do que o urânio (U) puro [4].

Tanto o casal Curie, como Becquerel receberam o Prêmio Nobel de Física, em 1903, em reconhecimento aos seus trabalhos sobre a radioatividade. Em 1911, Madame Curie, também recebeu o Prêmio Nobel de Química pela identificação e por seus trabalhos com os elementos rádio (Ra) e polônio (Po).

*Os trabalhos do casal Curie foram de grande importância para a compreensão de estrutura atômica. A identificação da diferença no poder de penetração dos raios X e dos elementos radioativos foi uma característica importante na diferenciação dessas radiações. Entretanto, apesar dos trabalhos desenvolvidos com os raios catódicos, com os raios X e com radioatividade, ainda não se tinha respostas esclarecedoras a respeito da natureza dessas radiações.*

Assim como a elaboração da Tabela Periódica, a identificação da radioatividade reacendeu a opinião de alguns químicos, de que os elementos deveriam ter uma origem comum [18].

#### **4.30. Os raios alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ )**

O poder de ionização dos raios X (seção 4.24) também foi objeto de pesquisa do Thomson que contou com a ajuda do físico e químico neozelandês Ernest Rutherford (1871-1937) [36]. Rutherford chegou ao laboratório Cavendish após receber uma bolsa de estudos por dois artigos sobre radioatividade, escritos em 1895. Nesses artigos, Rutherford relatou a identificação de que os raios X produziam uma grande quantidade de partículas eletricamente carregadas que se recombinavam formando moléculas neutras [31].

Esse trabalho serviu como base para um trabalho desenvolvido posteriormente por Rutherford no qual ele pretendia medir a ionização provocada pelos “raios de Becquerel”, fazendo-os atravessar folhas metálicas [36]. Assim, em 1898, Rutherford identificou dois tipos diferentes de emissões radioativas: os raios alfa<sup>59</sup> ( $\alpha$ ) e beta<sup>60</sup> ( $\beta$ ). Para estabelecer a diferença entre eles, Rutherford considerou seu poder de ionização e penetração na matéria. Segundo essa classificação, os raios  $\alpha$  tinham um grande poder de ionização, mas pouco poder de penetração na matéria, podendo ser interceptados por uma folha de papel. Os raios  $\beta$  tinham um poder de ionização menor, mas eram mais penetrantes, podendo atravessar finas folhas metálicas [4, p. 286]. Rutherford também concluiu que a radiação  $\alpha$  era composta por cargas positivas e a radiação  $\beta$  por cargas negativas, identificadas como elétrons [36].

Em 1899, independentemente, Becquerel e os físicos austríacos Stefan Meyer (1872-1949) e Egon Von Schweidler (1873-1948), e o físico alemão Frederick Giesel (1852-1927) observaram que essas radiações sofriam uma deflexão quando submetidas a um campo magnético [36]. Esse efeito corroborou a conclusão de Rutherford sobre a composição das radiações.

#### **4.31. Mais uma confirmação sobre a existência dos elétrons**

Em 1899, Lenard e Thomson, independentemente, apresentaram mais fatos que corroboraram a existência do elétron. Eles mostraram que superfícies metálicas

---

<sup>59</sup> Hoje se sabe que são núcleos de hélio (He).

<sup>60</sup> Hoje se sabe que são elétrons.

poderiam emitir elétrons. Lenard fez essa afirmação após observar o efeito fotoelétrico<sup>61</sup> e Thomson, após observar o efeito termiônico<sup>62</sup> [6].

#### **4.32. E no final do século XIX**

*No início do século XIX, a matéria era interpretada como contínua; ainda que alguns cientistas já acreditassem na teoria atômica, não havia provas suficientes de sua existência. Esses dados foram sendo colhidos ao longo do século, e, ao final, temos uma interpretação completamente nova para o conceito de matéria: ela seria formada por átomos, e esses tinham em seu interior os elétrons.*

*Apesar dessa grande mudança na interpretação da matéria, a hegemonia da mecânica newtoniana ainda persistia, mostrando o quanto o determinismo ainda estava presente no pensamento científico. Mas isso era previsível já que essa era uma teoria de grande aceitação, e exercia hegemonia no pensamento científico da época. Com ela eram respondidas todas as questões científicas, desde o movimento dos corpos celestes, ao dos sólidos e líquidos do mundo macroscópico, até a teoria atômica amplamente aceita por meio da Teoria Cinética dos Gases [43].*

*Contudo, o grande sucesso da mecânica newtoniana não foi suficiente para responder alguns questionamentos que surgiam. Os resultados experimentais não se adequavam eficientemente às teorias disponíveis; desse modo ou os experimentos deveriam ser refeitos ou as teorias deveriam ser repensadas. Esses fatos aguçaram a curiosidade de alguns cientistas e os conduziram a uma “nova física” [43].*

*Analisando alguns acontecimentos deste século, à luz da teoria de Bachelard, é importante chamar atenção novamente para os períodos de rupturas e descontinuidade presente na evolução da ciência. Como já foi dito, o conhecimento científico não deve ser interpretado como a evolução contínua de ideias antigas. Segundo Bachelard, todas as mudanças no pensamento vigente podem ser consideradas rupturas. Geralmente, esses períodos são gerados pela percepção de um erro na teoria vigente. Contudo, esse erro não deve ser encarado como uma anomalia, pelo contrário, Bachelard assume o erro como algo positivo. Isso pode acontecer quando uma teoria não é mais capaz de explicar de forma satisfatória alguns fenômenos. Dessa forma a sua revisão é capaz de gerar um avanço científico [1].*

*Para exemplificar, podemos analisar a relação de Dalton com o atomismo e, posteriormente, a identificação do elétron.*

*A teoria atômica proposta por Dalton diferencia-se das anteriores pelo seu caráter científico, pois agregava resultados experimentais. Rompendo com a antiga ciência grega que negava a importância do experimento. Esse é um dos motivos que nos mostra como a história da ciência não é linear e cumulativa [44].*

*Também podemos continuar falando sobre a descontinuidade da história da ciência, analisando a identificação do elétron. No texto foram apresentados os diferentes caminhos percorridos pela ciência para a identificação e confirmação do elétron. Tanto a espectroscopia, como os trabalhos com tubos de raios catódicos, identificaram o elétron. Reforçando a proposta de Bachelard que dizia que a ciência não é construída por meio de uma continuidade histórica. Por dois caminhos diferentes se alcançou um resultado comum. E se analisarmos esse caminhos separadamente, encontraremos muitas descontinuidades. O próprio elétron pode ser considerado uma grande ruptura com a proposta anterior; pois com sua identificação o átomo não era mais uma estrutura compacta ou indivisível [19].*

---

<sup>61</sup> É a emissão de elétrons por um metal, quando exposto a uma radiação eletromagnética de frequência adequada.

<sup>62</sup> É a emissão de elétrons pela superfície de um metal aquecido. Também é conhecido como efeito Edison.

*Mas essa não é a única ruptura proposta por Bachelard, ele também propõe a ruptura com o conhecimento comum e sua substituição pelo conhecimento científico, essa mudança seria mediada pela “fenômenotécnica”, que é a realidade construída por meio de técnicas experimentais [1].*

*Quanto à técnica experimental, o século XIX mostrou um grande crescimento que possibilitou novas observações. Contudo, percebemos que essas observações são indiretas, como a detecção do elétron por Thomson. Para Bachelard, esta é uma nova maneira do fazer ciência, na qual os instrumentos científicos mediam/promovem o diálogo (racionalismo dialético), entre cientista e o experimento, gerando o conhecimento [19].*

*Dessa forma, Bachelard considera a “fenomenotécnica” indispensável para a compreensão da Física Contemporânea. É por meio dela que um fenômeno que não poderia ser presenciado com os sentidos, como a detecção do elétron, é apresentado ao cientista [19].*

*O contexto histórico do século XIX reforça a proposta de Bachelard de que a ciência é construída socialmente, no qual muitas propostas foram responsáveis pela reformulação do conceito de átomo [7].*

*A assim, para concluir o capítulo, cita-se uma frase de Bachelard:*

*“...Já foi dito que uma hipótese científica que não esbarra em nenhuma contradição tem tudo para ser uma hipótese inútil.” [45, p.13].*

## **5. Século XX**

Nesse início de século, para alguns cientistas a dúvida sobre a existência dos átomos persistia. Apesar dos trabalhos realizados por Boltzmann com a Teoria Cinética dos Gases, da proposta do átomo feita pela Química e das diferentes estimativas do número de Avogadro, muitos cientistas imaginavam que os átomos eram apenas artifícios matemáticos que não faziam parte de sistemas físicos [46]. Mas, para os que já acreditavam na existência dos átomos, como Thomson e Zeeman, o século XX já começou com uma pergunta: existiria alguma coisa dentro do átomo, além do elétron?

Também no início deste século, a ciência recebeu um incentivo especial, a criação da Fundação Nobel. Essa foi fundada em 1900, com o intuito de premiar pessoas que fizessem pesquisas importantes, criando técnicas pioneiras ou com importantes contribuições teóricas à sociedade nas áreas de Física, Química, Medicina, Literatura e Paz. Seu mentor foi o químico e industrial sueco Alfred Nobel (1833-1896) [47].

*O século XX teve um desenvolvimento científico bem diferente dos seus antecessores. Obviamente, os avanços tecnológicos e um número maior de cientistas e de institutos científicos espelhados pelo mundo contribuíram para isso; até o início desse século os grandes institutos científicos concentravam-se na Europa, mas, na primeira metade deste século, o eixo científico transferiu-se para os Estados Unidos.*

### **5.1. Ainda sobre as radiações**

Em 1900, o físico e químico francês Paul Villard (1860-1934) identificou um terceiro tipo de radiação, denominada raios gama ( $\gamma$ ). Essa radiação, além de ser eletricamente neutra, tinha um poder de penetração na matéria muito maior que as radiações alfa ( $\alpha$ ) e beta ( $\beta$ ) (seção 4.30), identificadas anteriormente por Rutherford [4]. Becquerel também fez experimentos com os raios  $\gamma$  e comprovou as mesmas características [36]. O experimento utilizado para testar a carga elétrica destas radiações foi submetê-las a um campo magnético perpendicular à direção do seu

movimento. As radiações  $\alpha$  e  $\beta$  sofreram desvio, sendo identificadas como eletricamente carregadas. Já a radiação  $\gamma$  atravessou o campo magnético sem sofrer nenhum desvio, o que a identificava como eletricamente neutra [4]. Como os desvios das radiações  $\alpha$  e  $\beta$  ocorreram em direções opostas, foi possível identificar que suas cargas eram opostas. Rutherford, em 1909, em colaboração com o químico inglês Thomas Royds (1884-1955), usando a espectroscopia, demonstrou que as partículas  $\alpha$  eram átomos de hélio (He) duplamente ionizados; e os raios  $\beta$  foram identificados como elétrons [4].

## **5.2. A transmutação radioativa**

Em 1902, Rutherford e o químico inglês Frederick Soddy (1877-1956) formularam uma teoria em que sugeriam que cada emissão radioativa seria uma transmutação<sup>63</sup> de elementos [36]. Nesses átomos, uma fração fixa se desintegraria espontaneamente, por meio da emissão de certo tipo de radiação característica –  $\alpha$ ,  $\beta$  ou  $\gamma$  (seção 5.1). O resultado desse processo seria a criação de novos elementos que apresentavam características físico-químicas diferentes dos seus elementos geradores. Esse processo ocorreria, um número finito de vezes, até que um elemento estável fosse alcançado [4]. Por esses trabalhos com a radioatividade, o Prêmio Nobel de Química foi concedido a Rutherford, em 1908, e a Soddy, em 1921.

*Analisando a proposta de transmutação apresentada por Rutherford e Soddy com um olhar atual podemos dizer que este conceito lançou uma nova interpretação sobre a estrutura atômica. A instabilidade do átomo leva, mais uma vez, ao questionamento do que há dentro dele. A importância desses trabalhos está na admissão de que as substâncias radioativas continham átomos instáveis.*

## **5.3. O nascimento da Física Quântica**

Também no ano de 1900, em uma reunião da Sociedade Alemã de Física, realizada em 14 de dezembro, o físico alemão Max Planck (1858-1947) apresentou o seu artigo “*Sobre a Teoria da Lei de Distribuição de Energia do Espectro Normal*”. A princípio esse artigo atraiu pouca atenção da comunidade científica, mas posteriormente essa data ficou conhecida como o nascimento da Física Quântica [48].

Os trabalhos que culminaram com a apresentação do artigo referido começaram com o estudo da radiação emitida por um corpo negro. Um corpo negro é um objeto teórico que é capaz de absorver toda a energia incidente sobre ele e reemiti-la integralmente sob a forma de radiação eletromagnética [4]. O comportamento dessa radiação não podia ser explicado pelas teorias conhecidas até aquela época. Assim, Planck desenvolveu seus trabalhos tentando adequar os dados experimentais a uma teoria.

Para isso ele começou analisando os resultados dos físicos, o alemão Wilhelm Wein (1864-1928) e o inglês Lord Rayleigh (1842-1919). Em 1893, Wein desenvolveu uma teoria capaz de explicar a distribuição de energia emitida por um corpo negro para as frequências mais altas do espectro visível (luz violeta), mas para frequências menores (luz vermelha), os resultados eram insatisfatórios [48]. Sete anos após estes trabalhos, Rayleigh apresenta uma proposta complementar para o tema [4]. Foi com este cenário que Planck começou o seu trabalho sobre a radiação do corpo negro: existiam explicações parciais para determinadas partes do espectro visível, mas não existia nenhuma satisfatória que pudesse abranger todo o espectro [31].

---

<sup>63</sup> A transmutação é a transformação de um elemento químico em outro devido a uma reação nuclear induzida ou espontânea.



Para tentar explicar essa aparente ambiguidade, Planck propôs que a energia, assim como a matéria, apresentava um comportamento discreto, ou seja, existia em pequenas unidades, os *quanta* (no singular, *quantum*). Para Planck o *quantum* era indivisível, desse modo, quando a energia de uma onda eletromagnética tinha o seu valor alterado, essa alteração não era contínua. Planck postulou que quando um corpo absorve ou emite energia, ele o faz em quantidades múltiplas de um *quantum* de energia. Acrescentou que essa energia era diretamente proporcional à frequência da radiação [48].

Para chegar a essa conclusão, Planck partiu do pressuposto que a matéria era composta por átomos que oscilavam (osciladores elementares). Adotando a abordagem estatística de Boltzmann, Planck concluiu que a frequência de cada componente da radiação emitida seria a frequência natural de oscilação desses átomos. Contudo, eles não poderiam emitir qualquer frequência, mas apenas determinadas frequências, cujas energias associadas seriam múltiplos inteiros desse *quantum* [4]. Por esse trabalho, Planck recebeu o Prêmio Nobel em 1918.

*Mesmo Planck adotando uma visão atomística da matéria e fazendo uma sugestão tão ousada como a proposta do quantum de energia, ainda resistia sua própria proposta, pois passou vários anos procurando outra forma de explicar a emissão da radiação por um corpo negro.*

*Esta grande mudança provocada pelo trabalho de Planck acaba levando os cientistas da época a refletir o quanto as teorias trabalhadas até aquele momento eram adequadas para se prosseguir na discussão sobre a teoria atômica.*

#### **5.4. O modelo atômico de Thomson**

Em 1903, um estudante de Thomson, o inglês Harold Albert Wilson (1874-1964) fez algumas sugestões para melhorar o desempenho da câmara de nuvens para a determinação da carga do elétron (seção 4.28). Sua primeira proposta foi a de observar apenas a parte superior da nuvem, pois ali estavam as menores partículas e as mais lentas. Também propôs o uso de um campo elétrico na mesma direção do campo gravitacional. O valor encontrado, nesse experimento, para a carga do elétron, foi  $e = 1,04 \times 10^{-19} \text{C}$  [49].

Após a detecção do elétron e da constatação de que ele era uma partícula subatômica, Thomson elaborou um modelo que tentava explicar a dinâmica do átomo. Seu modelo consistia em:

“Temos assim, em primeiro lugar, uma esfera de eletricidade positiva uniforme e, dentro dessa esfera, um número de corpúsculos dispostos em uma série de anéis paralelos, com o número de corpúsculos em um anel variando de anel para anel: cada corpúsculo se move a alta velocidade sobre a circunferência do anel no qual está situado e os anéis são dispostos de modo que aqueles que contêm um grande número de corpúsculos estão próximos à superfície da esfera, enquanto aqueles em que há um número menor de corpúsculos estão mais no interior.” [4, p. 359].

Sua proposta, provavelmente, estava baseada em trabalhos apresentados até aquele momento sobre o tema. Desse modo, Thomson sugere que os elétrons deveriam estar imersos na carga positiva, pois imaginava que essa configuração seria a mais adequada para se garantir que o átomo fosse neutro. Além disso, com esse modelo, Thomson admite a explicação apresentada pela Eletrodinâmica Clássica para

a emissão de radiação pelos átomos como decorrente do movimento acelerado dos elétrons no seu interior [4].

Buscando encontrar concordância quantitativa com os resultados experimentais obtidos, Thomson estimou a ordem de grandeza da frequência de luz emitida por um átomo hipotético, com apenas um elétron, e do raio atômico, encontrando para esse último a mesma ordem de grandeza dos resultados obtidos anteriormente pela Teoria Cinética dos Gases. Quanto à emissão de radiação, Thomson constatou que seu modelo levaria o átomo a um colapso, pois ele emitiria radiação continuamente [4].

Mesmo ciente dos problemas de seu modelo, Thomson continuou a trabalhar nele. Deixando de lado o problema provocado pela emissão de radiação, concentrou-se em uma explicação que levasse em conta a estabilidade atômica. Baseado em um experimento feito pelo norte-americano Alfred Mayer (1836-1897), em 1878, que consistia em mostrar como pequenos pólos magnéticos se comportavam na presença de um campo magnético intenso, Thomson imaginou que cargas elétricas tivessem um comportamento análogo ao dos pólos magnéticos, estabelecendo assim posições pré-definidas para um determinado número de cargas elétricas presentes em um átomo. Este modelo apresentava características de periodicidade, o que poderia levar à compreensão das regularidades apresentada na Tabela Periódica (seção 4.19). Provavelmente, a ideia mais importante apresentada por Thomson foi tentar descrever a distribuição das partículas subatômicas dentro do átomo [4].

Outra hipótese considerada por Thomson em seu modelo era que apenas os elétrons teriam massa, assim, a massa atômica era dada exclusivamente por eles. Mas esta hipótese gerava alguns problemas para o seu modelo; segundo ela, um átomo de hidrogênio (H) deveria possuir milhares de elétrons para que sua massa pudesse ser justificada<sup>64</sup>. Mesmo que, à primeira vista, esta ideia fosse contraditória, Thomson a utilizou para explicar a emissão de frequências diferentes pelo átomo de hidrogênio (H). Segundo ele, os milhares de elétrons que faziam parte do átomo de hidrogênio (H) oscilariam devido às interações coulombianas que ocorriam entre eles, emitindo assim, as diversas frequências que caracterizavam o espectro de emissão do hidrogênio (H) [4].

Contudo, Thomson não tentou calcular as frequências do espectro emitido pelo átomo de hidrogênio (H) a partir do seu modelo; foi Rayleigh que, em 1906, detectou resultados que não estavam de acordo com a previsão da fórmula de Balmer (seção 4.20), o que fez Thomson rever, no mesmo ano, suas ideias iniciais: de milhares de corpúsculos constituindo o átomo de hidrogênio (H), seu modelo admitia agora que:

“o número de corpúsculos em um átomo (...) é da mesma ordem que o peso atômico da substância.” [4, p. 357].

Para a comprovação dessa hipótese, Thomson sugeriu que fossem usadas técnicas de raios X para medir o número de elétrons, o que só foi feito com êxito em 1911 [4].

Além desses questionamentos, o modelo de Thomson foi fortemente testado quando suas previsões quanto ao espalhamento de partículas alfa ( $\alpha$ ) em uma fina lâmina metálica não se confirmaram. Seus trabalhos em relação ao raio atômico estimularam Rutherford a sugerir a dois estudantes, Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970), que realizassem um experimento que consistia no bombardeamento de um alvo por partículas  $\alpha$  [4].

---

<sup>64</sup> A massa do elétron é cerca de 1840 vezes menor que a de um íon de hidrogênio [4].

Esse experimento tinha o objetivo de analisar as deflexões que as partículas  $\alpha$  sofriam ao colidir com a placa metálica [31]. Para isso o aparato experimental foi projetado da seguinte forma: uma fonte radioativa emitia partículas  $\alpha$  que eram colimadas por um par de diafragmas que as direcionava para uma folha metálica (folha de ouro), onde colidiam. Essa folha metálica era extremamente fina o que fazia com que as partículas  $\alpha$  a atravessassem completamente apenas com uma pequena redução em sua velocidade. No momento que atravessavam a folha, as partículas sofriam muitas deflexões, devidas à ação da força coulumbiana entre sua carga e a carga dos átomos da folha metálica. Essas deflexões determinavam que esse feixe emergisse da folha como um feixe divergente. Para detectá-las, foram usados vários alvos de sulfeto de zinco ( $\text{ZnSO}_4$ ), que cercavam por todos os lados a folha metálica, e um microscópio. Ao colidir com o sulfeto de zinco ( $\text{ZnSO}_4$ ) a partícula  $\alpha$  produzia uma pequena cintilação<sup>65</sup> que era observada com o auxílio do microscópio. Dessa forma, Geiger e Mardens poderiam contar o número de cintilações produzidas por unidade de tempo em função da posição angular do detector [48].

Segundo Thomson, se uma partícula  $\alpha$  atravessasse um único átomo dessa folha metálica ela sofreria uma pequena deflexão, pois a massa dos elétrons era muito pequena se comparada com a da partícula  $\alpha$ , e também porque a carga positiva presente no átomo estaria distribuída em todo o seu volume atômico, assim não exercia nenhuma força de repulsão significativa sobre a partícula  $\alpha$ . Então, se tivéssemos um feixe de partículas  $\alpha$  e considerássemos o grande número de átomos da folha metálica, as partículas  $\alpha$  teriam um comportamento similar ao previsto anteriormente, ou seja, muitas partículas sofreriam um espalhamento em pequenos ângulos. Contudo o experimento realizado por Geiger e Mardens mostrou exatamente o contrário; segundo eles, existia uma probabilidade pequena de que alguns átomos poderiam sofrer um espalhamento em ângulos maiores do que aqueles previstos por Thomson. Eles observaram que algumas partículas foram espalhadas com ângulo de até  $180^\circ$ . Segundo essas observações o número de grandes ângulos de espalhamento era proporcional ao número de átomos atravessados por partículas  $\alpha$  [48]. Este desacordo entre as previsões do Thomson e o experimento de Geiger e Mardens motivou Rutherford a propor um novo modelo atômico que fosse capaz de explicar essa divergência.

Por fim, concluindo o seu artigo de 1904, Thomson utilizou o seu modelo atômico na tentativa de explicar a radioatividade. Segundo sua proposta, o equilíbrio dos anéis eletrônicos era devido à sua velocidade angular crítica. Quando o átomo era submetido a uma velocidade maior que a velocidade angular crítica ele emitia energia, e quando sua velocidade era inferior ele “explodia”. Segundo Thomson, explodir significava a desintegração do átomo que era acompanhada de uma emissão de radiação [4].

Após a identificação do elétron, entre 1907 e 1913, Thomson continuou suas pesquisas com descargas elétricas em gases, mas agora seu trabalho voltou-se para uma região conhecida como *espaço escuro de Crookes*<sup>66</sup>. Ele observou que, nessa região, estavam presentes partículas positivas que se moviam em direção ao cátodo. [50]. Nestas pesquisas ele também verificou a existência dos *isótopos* (do grego, mesmo lugar). Esse termo foi sugerido, em 1913, por Soddy para designar átomos com o mesmo número atômico, mas com número de massa diferente. O químico e físico

---

<sup>65</sup> A cintilação é um processo que ocorre quando uma partícula carregada passa através de uma determinada substância arrancando elétrons de seus átomos, que ao se recombinarem emitem luz.

<sup>66</sup> Era uma região sem luminosidade que aparecia na trajetória dos raios catódicos durante as descargas nos tubos de Crookes [50]. Uma região semelhante a essa foi identificada anteriormente por Faraday, e conhecido como espaço escuro de Faraday (seção 4.9).

inglês Francis Aston (1877-1945) deu continuidade ao trabalho sobre os isótopos e, em 1919, criou o espectrógrafo de massa<sup>67</sup> [27].

### **5.5. O modelo atômico de Nagaoka**

No mesmo ano em que foi apresentado o artigo em que Thomson descrevia seu modelo atômico, o físico japonês Hantaro Nagaoka (1865-1950), tentando resolver os problemas apresentados pelo modelo de Thomson, sugeriu um novo modelo atômico. Nagaoka tinha como objetivo explicar os espectros atômicos e a emissão de partículas beta ( $\beta$ ) por núcleos pesados [4].

Segundo este novo modelo, os átomos apresentariam um grande número de elétrons que estariam distribuídos em um anel. A distância entre um elétron e outro seria constante, pois eles sofreriam uma força de repulsão coulombiana [4].

*Até este momento, o modelo proposto por Nagaoka não diferia muito do modelo de Thomson; isso já era esperado, pois o modelo de Thomson não foi considerado totalmente inadequado, mas precisava de algumas correções.*

O que surge como algo realmente novo é a proposta de que no centro dos anéis em que estariam contidos os elétrons haveria uma partícula com massa e carga positiva. Essa partícula teria uma carga e massa muito maiores, em módulo, do que a massa e a carga do elétron. Esta configuração mantinha a neutralidade do átomo [4].

Nagaoka sugeriu que os elétrons executavam pequenas oscilações, radiais ou perpendiculares ao plano da órbita, provocando variações na densidade de elétrons no anel, o que justificaria as linhas espectrais. Segundo essa proposta, as oscilações seriam responsáveis pela emissão dos espectros característicos de cada átomo. E para explicar como um átomo poderia emitir mais de uma frequência, Nagaoka propôs que um átomo poderia ter tantos anéis quantas fossem suas frequências emitidas [4].

Essa sua proposta também foi usada para tentar explicar a emissão de partículas  $\beta$ . Segundo Nagaoka, se um átomo tivesse no mínimo dois anéis, esses poderiam interagir e entrar em ressonância, o que poderia ocasionar a quebra do anel. Essa quebra seria a responsável pela emissão das partículas  $\beta$ , que só seria possível para elementos que emitissem mais de uma frequência [4].

No entanto, algumas perguntas ainda não estavam adequadamente respondidas por esse modelo; por exemplo, Nagaoka não especificou o número de elétrons por anel. Nesse ponto, Nagaoka e Thomson tiveram o mesmo problema, de como explicar a estrutura do átomo de hidrogênio (H). Em [4], os autores dizem que o problema de Nagaoka era não estabelecer o número de elétrons em cada anel, o que poderia sugerir que o átomo de hidrogênio pudesse ter vários elétrons; mas, já era sabido que o hidrogênio só tinha um elétron. Também foram constatados problemas quanto à emissão de partículas  $\beta$ . Quando Nagaoka afirma que, ao se quebrar um anel, haveria a emissão de um grande número de partículas  $\beta$ , isso realmente se verificava experimentalmente; contudo, essas observações foram feitas com um grande número de átomos, o que não garantia a existência de muitos elétrons por átomo. E por fim, seu modelo não era estável, pois, ao emitir radiação continuamente, o átomo de Nagaoka tenderia ao colapso [4].

*Esses dois modelos atômicos mostram o desafio do início do século, o de unir os resultados experimentais com a teoria vigente. Também podemos perceber que uma teoria não refuta a outra; Nagaoka, ao elaborar seu modelo atômico, não desprezou o trabalho anterior realizado por Thomson, mas sugeriu algumas correções que poderiam*

---

<sup>67</sup> Instrumento que utiliza uma chapa fotográfica para registrar as diversas posições de partículas de diferentes massas, que, quando ionizadas e ao passarem por um campo magnético constante e uniforme, seguem trajetórias com diferentes raios, segundo a ação da força de Lorentz [24].

aperfeiçoar o modelo de Thomson. Mais um episódio que reforça a proposta de Bachelard, pela qual o desenvolvimento científico é construído por meio de rupturas e reconciliações [7].

### **5.6. A participação, mesmo que indireta, de Einstein**

No ano de 1905, também chamado de “ano milagroso”, o mundo conheceu o físico germano-norte-americano Albert Einstein (1879-1955). Esse foi um ano especialmente importante na história da Física, porque Einstein lançou a base das duas teorias mais importantes do século XX: a Teoria da Relatividade e a Mecânica Quântica. Foram cinco os trabalhos produzidos por Einstein neste ano, dentre eles um que falava sobre a origem do movimento browniano. Esse artigo era intitulado “*Sobre o movimento de partículas suspensas em um fluido em repouso*”. Einstein já assumira uma visão realista e objetiva sobre a existência de átomos e moléculas, então, nesse trabalho (que era a sua tese de doutoramento) buscava uma expressão para o movimento das moléculas em um fluido, pois esperava calcular o número do Avogadro e o diâmetro das partículas do soluto. Para isso, ele aplicou à análise do movimento das moléculas a pressão osmótica<sup>68</sup> e sua relação com a teoria da difusão<sup>69</sup> e com a teoria molecular do calor. É provável que Einstein tenha feito essa escolha influenciado pelo seu tempo de estudos no programa de pesquisa de Boltzmann (seção 4.17), no final do século XIX [51].

A análise feita por Einstein contribuiu para a aceitação da realidade de átomos e moléculas juntamente com a concordância de resultados obtidos por outros pesquisadores, com técnicas e ideias distintas de Einstein, entre os quais, Perrin [46]. Diferente das análises feitas até aquele momento, em moléculas invisíveis de um gás, o movimento browniano foi observado mais a fundo, com o uso de potentes microscópios da época, tornando visíveis as flutuações das partículas em suspensão e o seu constante choque com as microscópicas partículas do fluido [51]. Após esses trabalhos, Perrin, com a intenção de diminuir a resistência da comunidade científica em relação à hipótese atômica, escreveu um livro intitulado *Les Atomes (Os Átomos)*, onde ele afirmava que a teoria atômica havia triunfado [43]. Ainda com relação a esse trabalho, Perrin recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1926.

Como Einstein admitia a hipótese atômica, não foi difícil para ele aceitar as novas ideias propostas por Planck. Isso se verifica em seu trabalho sobre a natureza da luz, no qual Einstein assume que a luz era formada pelos *quanta*, posteriormente, denominados *fótons*<sup>70</sup>. Também explica algumas propriedades dos metais quando irradiados com luz visível e ultravioleta, como o efeito fotoelétrico [4].

O efeito fotoelétrico foi inicialmente observado por Hertz, em 1887 e estudado por Lenard, em 1902. Esse efeito consiste na emissão de elétrons de uma superfície metálica após a absorção da energia proveniente da radiação eletromagnética incidente sobre ela, de forma que uma parte dessa energia é transformada em energia cinética dos elétrons expelidos. Contudo, os resultados apresentados por Lenard não estavam de acordo com a Teoria Ondulatória Clássica da Luz. Assim, Lenard não conseguiu explicar suas observações, tais como: a emissão dos elétrons não dependia da intensidade da luz incidente, mas dependia da sua frequência; para cada material existe um limite mínimo de frequência para que ocorresse a emissão de elétrons [4].

Esse comportamento só foi explicado por Einstein, admitindo, como foi dito anteriormente, que a luz era composta por *quanta* [3]. Segundo Einstein, quando o

<sup>68</sup> Pressão capaz de impedir a osmose. Osmose é a difusão através de uma membrana semipermeável.

<sup>69</sup> Teoria que descreve o transporte de matéria, onde um soluto é transportado por meio do movimento das moléculas de um fluido.

<sup>70</sup> Esta denominação foi dada por Arthur Compton [52].

*fóton* da radiação incidente interagia com o elétron do metal, ele cedia uma determinada quantidade de energia o que provocaria a emissão do elétron. Contudo, nem a radiação incidente tem uma frequência qualquer, nem o elétron pode ser ejetado do metal com qualquer energia. O fóton de luz carrega uma quantidade de energia pré-determinada - um *quantum* de energia- que depende de sua frequência; e o elétron só pode ser ejetado do metal se receber exatamente a quantidade de energia necessária para isso. Einstein interpretou esses valores fixos de energia, tanto da energia da radiação quanto o valor mínimo de energia para o elétron, como o *quantum* proposto por Planck. Esta explicação para o efeito fotoelétrico obrigava uma revisão do conceito aceito até aquele momento, de que a luz era uma onda.

Ao fazer essa proposta, Einstein não usa a Física Clássica para explicar as novas observações, aumentando o interesse dos cientistas sobre a “nova Física” que surgia.

*A explicação do efeito fotoelétrico, por Einstein, aumentou a aceitação da nova Física, pois se percebe que ela foi ganhando credibilidade pelos diferentes trabalhos de vários pesquisadores, que foram sendo produzidos, auxiliados por tecnologias mais sofisticadas, o que permitiu corroborar as ideias convergentes a respeito da existência do quantum de energia.*

A contradição entre os conceitos de fóton e de luz, que ficou explícita no trabalho de Einstein, mostrou um grande contraste entre a Física Clássica e a “nova Física” [52]. Essa contradição surgiu porque o fóton era tratado como uma partícula e a luz era tratada como uma onda eletromagnética. Assim buscava-se uma forma de explicar como tratar dois entes tão diferentes, mas, que pela interpretação da teoria de Einstein, representariam a luz.

Einstein mostrou que era possível associarmos a uma onda eletromagnética, de frequência  $\nu$ , um conjunto de partículas, os fótons, que carregam *quanta* de energia  $E$ , proporcional à frequência da radiação [4, p. 427]. Matematicamente, sua proposta pode ser escrita:

$$E = h\nu \quad (2)$$

Na Equação 2, o  $h$  é uma constante de proporcionalidade, mais tarde calculada e conhecida como *constante de Planck* [53]. Seu valor é  $h = 6,62 \times 10^{-34}$  J.s.

Assim, Einstein propôs que a energia total da onda, em uma dada região do espaço, seria a soma das energias dos fótons. Assim, uma onda eletromagnética apresentaria uma natureza discreta, sendo constituída de corpúsculos não-materiais de energia, os *fótons* [4, p. 427]. Por seu trabalho com o efeito fotoelétrico, Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física, em 1921.

Considerando o trabalho de Einstein, o físico francês Louis de Broglie (1892-1987) propôs que não só a luz apresentaria esse comportamento dual, mas a matéria também. Segundo de Broglie, isso ocorreria nos casos em que a magnitude da constante de Planck não pudesse ser desprezada; dessa forma o elétron também apresentaria um comportamento ondulatório [4]. Por esse trabalho, de Broglie recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1929.

*Esta nova interpretação da matéria e da radiação demonstra a importância das teorias utilizadas serem repensadas.*

*Para Bachelard, o ano de 1905 foi o início da era do “novo espírito científico”. Pois com seus trabalhos Einstein, alterou conceitos primordiais que eram tidos como imutáveis para sempre. Assim, reafirmar-se a importância do saber científico ser reconstruído a cada momento [45].*

## 5.7. O cálculo da carga elétrica do elétron

Com o intuito de calcular a carga do elétron com uma precisão maior, o físico norte-americano Robert Millikan (1868-1953) acompanhava os trabalhos desenvolvidos por Thomson e seus alunos no Laboratório Cavendish. Millikan se interessou especialmente pelos resultados que Harold Wilson (seção 5.4) tinha conseguido para a carga do elétron usando a câmara de nuvens. Apesar de Wilson ter aprimorado a primeira câmara de nuvens, suas modificações não eliminaram os erros contidos nesse equipamento; por exemplo, uma das fontes de erro era a velocidade de evaporação das bolhas: como essas evaporavam muito rápido, os dados colhidos não tinham muita precisão, o que comprometia os valores obtidos para a carga do elétron [54].

Consciente dos problemas enfrentados por Wilson, Millikan repetiu esse experimento em 1907, com a ajuda do seu então estudante, o físico francês Louis Begeman. Os resultados ainda mostraram-se insatisfatórios, o que os levou a procurar novos caminhos para aperfeiçoar o equipamento. Uma dessas tentativas os levou até a descoberta do método da gota isolada<sup>71</sup> [54]. Com esse método, Millikan concluiu que os valores das cargas das diversas gotículas eram sempre múltiplos da menor carga que eles haviam obtido.

Contudo, os problemas com a evaporação persistiam, e eles buscavam uma substância que minimizasse esses problemas; foi assim que chegaram ao óleo de relógio. Nessa fase da experimentação, Millikan já havia alcançado o resultado mais importante, o da comprovação da existência de uma carga elementar. O uso do óleo de relógio no experimento, não só corroborou a conclusão anterior como gerou dados mais confiáveis. Essa foi a primeira demonstração, sem ambiguidade, da natureza discreta das cargas elétricas e a primeira confirmação confiável do valor da carga do elétron [4], representado por cerca de  $e = 1,56 \times 10^{-19} \text{C}$  [54].

Com estes experimentos Millikan também confirmou a afirmação de Thomson quanto à existência dessas partículas em todos os corpos, pois segundo Millikan, a carga elementar não dependia da natureza da substância que compõe a gota nem da natureza do gás no qual ela está imersa [4]. Os resultados de seu trabalho levaram Millikan a afirmar:

“[...] A carga elétrica tem cada vez mais sido vista, não somente como a mais fundamental das constantes físicas ou químicas, mas também como aquela da mais suprema importância na solução de problemas numéricos na Física Moderna.” [4, p. 258].

Paralelamente aos trabalhos para a determinação da carga do elétron, Millikan também estudava o efeito fotoelétrico, cujos trabalhos foram os responsáveis pelo seu Prêmio Nobel de Física em 1923.

## 5.8. O modelo atômico de Rutherford

A proposta de um novo modelo atômico feita por Rutherford surgiu após a análise do experimento realizado alguns anos antes por Geiger e Mardens (seção 5.4)

Rutherford sabia das deficiências do modelo de Thomson, mas o aceitava. Por esse motivo, imaginava que seria improvável que ocorressem deflexões significativas quando as partículas alfa ( $\alpha$ ) incidissem nos átomos da folha metálica, uma vez que, segundo o modelo de Thomson, os elétrons do metal seriam os únicos a defletirem as partículas  $\alpha$ ; além disso, como eles tinham uma massa muito menor que as partículas  $\alpha$

---

<sup>71</sup> Este método consistia em aplicar um campo elétrico à nuvem de gotículas que se formava na câmara de Wilson; como resultado, Millikan conseguiu observar as gotículas individualmente.

não poderiam provocar deflexões maiores do que as previstas no modelo de Thomson [31].

Ao ser informado sobre a deflexão das partículas  $\alpha$  em ângulos de até  $180^\circ$ , Rutherford imaginou que deveria existir algo além dos elétrons que constituíam os átomos do metal, deveria haver algo maior, que estava dentro do átomo assim como os elétrons.

O experimento que intrigava Rutherford foi realizado em 1909, mas ele só se pronunciou publicamente em 1911, quando publicou um artigo expondo suas ideias [31]. Sua proposta era de que existiria dentro do átomo algo muitas vezes maior que o elétron e comparável à massa da partícula  $\alpha$  - assim ele propôs a existência de um núcleo central em que toda carga positiva estaria concentrada. Esse núcleo estaria rodeado por uma distribuição uniforme de elétrons, configuração essa que seria a responsável por manter o átomo neutro [4].

Com a proposta de existência do núcleo, Rutherford explicou as deflexões em ângulos de até  $180^\circ$ , observados por Geiger e Mardens: quanto mais a partícula  $\alpha$  se aproximasse do núcleo, maior seria a repulsão coulombiana, provocando assim uma deflexão maior devido à colisão com a placa de ouro. Além disso, Rutherford sabia que quando partículas positivas são emitidas por átomos elas adquirem uma grande velocidade devido à repulsão coulombiana [4]. Dessa forma, o modelo atômico de Rutherford buscava responder o que o modelo elaborado por Thomson não conseguiu relativamente aos resultados obtidos por Geiger e Mardens.

Quando Rutherford propôs a existência do núcleo, ele estimou o seu tamanho como dez mil vezes menor que o valor estimado para o raio atômico [4]. Também verificou que a massa deste núcleo representava quase toda a massa do átomo [48].

Quanto à estabilidade atômica, Rutherford enfrentou os mesmos problemas de seus antecessores, Thomson (seção 5.4) e Nagaoka (seção 5.5). Se ele considerasse que os elétrons eram estacionários, eles tenderiam a serem atraídos pelo núcleo; por outro lado, se eles executassem um movimento em torno do núcleo, emitiriam energia e o átomo tenderia ao colapso, assim como nos modelos anteriores [4]. Dessa forma, ao mesmo tempo em que o modelo atômico proposto por Rutherford conseguia explicar o experimento de Geiger e Mardens, propondo uma nova configuração para a estrutura atômica, o problema da estabilidade atômica ainda não podia ser explicado.

*A intenção de Rutherford ao propor o experimento a Geiger e Mardens não era a de refutar o modelo atômico de Thomson, pelo contrário, era de corroborar a proposta de Thomson. Essa intenção, analisada à luz da teoria de Bachelard, expressa a importância da retificação do erro para a evolução dos conceitos científicos. Segundo Bachelard, o desenvolvimento científico ocorre com a retificação dos erros. Assim, o erro passa a assumir uma função positiva na construção do saber [7].*

*Ao interpretar os resultados apresentados por Geiger e Mardens, Rutherford propõe uma retificação no modelo de Thomson, pois nesse modelo a carga positiva já estava presente na estrutura atômica – os elétrons estariam imersos na carga positiva. Rutherford, retificando o modelo de Thomson, propõe que a carga positiva estaria concentrada em um ponto central. Assim, com essa proposta, Rutherford explica os resultados experimentais obtidos por Geiger e Mardens. Dessa forma, o que seria considerado um erro, passa a ser interpretado como um fato importante para o desenvolvimento científico.*

*O modelo de Rutherford, assim como os de seus antecessores, consegue dar explicações a algumas perguntas não respondidas, mas ainda não apresenta explicações suficientes para se entender a estrutura atômica. Estas questões “momentaneamente sem respostas” acabam gerando mais conhecimento, pois incitam*



a pesquisa. Como já foi mencionado anteriormente, não existe uma verdade única e acabada, o conhecimento científico apresenta verdades momentâneas [7]; quanto aos problemas que ainda persistem no modelo, reforça-se a ideia: para que existem hipóteses científicas se elas não esbarram em nenhuma contradição? [45].

### **5.9. O modelo atômico de Bohr**

Ainda sob a resistência de Planck as suas próprias ideias, o físico sueco Niels Bohr (1885-1962), que havia sido aluno de Rutherford em Manchester, uniu o modelo atômico proposto por Rutherford (seção 5.8) com a quantização proposta por Planck (seção 5.3) para elaborar um novo modelo que conseguisse explicar a instabilidade atômica [31].

Os trabalhos de Bohr começaram na sua tese de doutorado, que discutia sobre a teoria eletrônica dos metais e enfatizava as inadequações da Física Clássica para tratar o comportamento da matéria em nível atômico. Trabalhando certo tempo em Cambridge com Thomson, como pós-graduando, solicitou transferência para Manchester onde conheceu Rutherford e o seu trabalho. Apesar da aceitação do modelo de Rutherford para o átomo, Bohr procurava uma explicação para a instabilidade atômica que não havia sido esclarecida nem por Rutherford nem por Thomson. Segundo seus colegas, ele tinha uma grande habilidade em identificar e explorar falhas em uma teoria [31].

Seus primeiros estudos sobre o tema começaram a se desenvolver em 1912, com ideias sobre a estrutura dos átomos que sequer mencionavam a constante de Planck e as séries espectrais referentes ao hidrogênio (H). Como conclusões desses estudos preliminares, Bohr sugeriu que a estabilidade do átomo de Rutherford dependia da proporcionalidade entre a energia cinética, representada por  $E$ , e a frequência de rotação dos elétrons nos orbitais, representada por  $\omega$ . [55]. E ambas as grandezas eram relacionadas por uma constante representada por  $k$ . Bohr representava matematicamente sua ideia pela Equação 3:

$$E=k\omega \quad (3)$$

No final de 1912, Bohr conheceu o trabalho do astrofísico inglês John Nicholson (1881-1955) e reconheceu algumas semelhanças com suas ideias. Ambos aceitavam o modelo proposto por Rutherford, e imaginavam que existia alguma relação entre a energia dos elétrons em suas órbitas e as suas respectivas frequências. Contudo, seus trabalhos divergiam quando o tema era o cálculo de frequências do espectro visível; para Bohr, a constituição atômica não estava relacionada com os espectros emitidos pelos átomos. Contudo, suas ideias mudaram quando o espectroscopista Hans Hansen lhe perguntou se sua proposta seria capaz de explicar as séries espectrais decorrentes da fórmula de Balmer-Rydberg (seções 4.21 e 4.23). Essa pergunta levou Bohr a estudar o assunto que o conduziu até a formulação do seu modelo atômico que foi apresentado em uma série de três artigos, publicados em 1913 [31].

O primeiro artigo “*Sobre a constituição de átomos e moléculas*”, apresentava suas ideias para descrever os átomos. A solução proposta para resolver o problema da instabilidade atômica foi acrescentar as regras de quantização à teoria atômica. Contudo, essas regras foram adicionadas sem nenhuma fundamentação teórica: sua única preocupação, ao adicioná-las, era poder continuar utilizando o formalismo da Física Clássica para calcular grandezas observáveis, como a frequência da radiação [4]. Outras ideias importantes, presentes nesse artigo; o átomo teria a configuração

proposta por Rutherford, contudo, os elétrons descreviam órbitas circulares<sup>72</sup> com uma velocidade muito menor que a velocidade da luz no vácuo, sem que houvesse emissão de energia devido a esse movimento. Para emitir energia, o elétron deveria mudar de órbita. Nessa mudança, o átomo poderia emitir ou absorver energia, isso dependeria da transição realizada; ao mesmo tempo, a radiação emitida ou absorvida seria quantizada, como já havia sido proposto por Planck. Mesmo admitindo as novas ideias, Bohr ainda usava a Física Clássica para explicar a interação entre o núcleo e os elétrons; para isso ele usava a força eletrostática coulombiana [4].

*Assim, o modelo sugerido por Bohr era visualizado da seguinte forma: o átomo é composto por um núcleo central que está envolto por elétrons, que descrevem órbitas circulares em torno do núcleo. Para cada órbita, está associado um valor de energia para os elétrons. Enquanto eles permanecerem em uma determinada órbita, a estabilidade é mantida. A emissão de radiação pelos átomos é explicada quando elétrons transferem-se de órbitas associadas com mais energia para outras associadas com menos energia. Foi nessa descrição que Bohr aplicou as ideias de Planck à sua teoria. Segundo Bohr, os elétrons só poderiam realizar transições de uma órbita para outra se absorvessem ou emitissem os quanta de energia necessários para isso.*

Os trabalhos de Bohr também se diferenciam dos demais quando ele propôs que a frequência de radiação é diferente da frequência de revolução do elétron, o que o levaria até o princípio da correspondência<sup>73</sup> [4]. A primeira ideia de Bohr sobre esse princípio foi apresentada no seu primeiro artigo da trilogia apresentada em 1913. Ao analisar a equação da frequência de radiação Bohr diz:

“A frequência da radiação emitida durante a passagem de um sistema entre estados estacionários coincidirá com a frequência de revolução do elétron na região de baixas vibrações.” [56].

*Quando Bohr assume as ideias de Planck e as aplica para a teoria atômica ele dá um passo importante para uma nova fronteira para a Física. Ele fez essa escolha porque acreditava que a Física Clássica sozinha não era capaz de explicar a constituição atômica, pois, segundo ele:*

“A existência do quantum elementar de ação expressa, a rigor, uma nova faceta da individualidade dos processos físicos, a qual é desconhecida das leis clássicas da mecânica e do eletromagnetismo, e restringe a validade destas leis básicas aos fenômenos em que envolvem ações grandes em comparação com o valor de um único quantum, tal como fornecido pela nova constante atômica de Planck. Essa condição, embora amplamente satisfeita nos fenômenos da experiência física comum, não é de modo algum aplicável ao comportamento dos elétrons nos átomos e, a rigor, somente a existência do quantum de ação impede a fusão dos elétrons e do núcleo num corpúsculo neutro maciço, de extensão praticamente infinitesimal.” [57, p. 44].

Os postulados propostos por Bohr geraram algumas hipóteses que estavam implícitas em seu trabalho. Por exemplo: os átomos produziram apenas uma linha espectral de cada vez, pois as transições entre órbitas ocorreriam uma de cada vez; os

---

<sup>72</sup> Posteriormente Bohr retificou a forma das órbitas presentes em seu modelo atômico, elas passaram a ser elípticas.

<sup>73</sup> Princípio enunciado por Bohr segundo o qual as leis da Física Quântica se reduzem às da Física Clássica no caso limite em que os números quânticos são grandes [24, p.183].

espectros emitidos pelos átomos são fenômenos explicados por regras quânticas e o responsável por esse processo seria o elétron [4].

*Essas ideias constituíam o modelo atômico de Bohr. Esse modelo é classificado como um modelo semi-clássico, pois agrega componentes da Física Clássica, como a Eletrodinâmica e a Mecânica Clássica, e da Física Quântica, como a quantização da energia. Aparentemente, as ideias de Bohr tiveram uma boa receptividade, como podemos ver no comentário do escritor inglês Edmund Whittaker:*

“...devemos renunciar a todas as tentativas de visualizar ou de explicar classicamente o comportamento do elétron ativo durante uma transição do átomo entre um estado estacionário e outro.” [4, p. 384].

Mas, foi apenas na 83ª Reunião da Associação Britânica para o Progresso da Ciência, realizada em setembro de 1913, que elas foram, pela primeira vez, amplamente discutidas. As dúvidas que pairavam sobre a quantização, introduzida por Planck, estenderam-se ao modelo atômico de Bohr. O físico inglês James Jeans (1877-1946) foi o primeiro a reconhecer publicamente as ideias de Bohr; segundo ele, Bohr:

“consegui uma explicação engenhosíssima, sugestiva e, penso que devemos acrescentar, convincente, das leis das riscas espectrais.” [58].

O modelo de Bohr teve êxito porque conseguiu apresentar concordância quantitativa com alguns dados espectroscópicos; por exemplo, seu modelo conseguia explicar a emissão de radiação pelo hidrogênio (H), confirmando os resultados empíricos das séries de Balmer e Paschen [48]. Novas séries corroboraram a teoria de Bohr, como as de Lyman e Pfund; além disso, foi possível calcular o valor da constante de Rydberg, mencionada nas seções 4.21 e 4.23 [55].

A importância dos espectros para o trabalho de Bohr estende-se à origem da quantização do momento angular. Inicialmente, foi Arthur Haas o primeiro a tentar relacionar a constante de Planck à constituição do átomo; para isso, utilizou o modelo atômico de Thomson. Segundo [4], Haas fez essa tentativa, influenciado por ideias de Einstein de que deveria haver uma maneira de se relacionar fatos não explicados pela Eletrodinâmica Clássica de Maxwell: a existência dos elétrons e a natureza quântica da radiação.

Haas, assim como Planck, considerou que os átomos eram osciladores harmônicos ideais, pois dessa forma poderia utilizar a regra da quantização da energia [4]. Partindo desse princípio, ele postula a relação entre a energia potencial de um elétron, representado por  $E_p$ , e a frequência de radiação emitida por um átomo, representada por  $\nu$ , como:

$$E_p = h\nu \quad (4)$$

Na Equação 4, o  $h$  representa a constante de Planck. Contudo, ela só seria válida para o estado fundamental de um átomo. Após esta tentativa, outras buscaram incorporar a constante de Planck na constituição dos átomos, contudo, como a maioria delas também estava baseada no modelo de Thomson, logo foram abandonadas, pois Rutherford mostrou as limitações desse modelo [4].

Além da introdução da constante de Planck na teoria atômica, duas outras mudanças foram importantes para o aprimoramento dos modelos atômicos. A primeira foi a compreensão de que o espectro de um elemento químico depende de um grande número de átomos, que devido ao movimento de seus elétrons, produzia uma linha

espectral. E a segunda mudança, devida a Nicholson, foi a compreensão de que os espectros deveriam ser interpretados à luz da nova Teoria Quântica [4]. Segundo Nicholson:

“As leis fundamentais da Física devem se basear na Teoria Quântica da radiação, recentemente desenvolvida por Planck e outros, de acordo com a qual trocas de energia entre sistemas periódicos só podem ocorrer em certas quantidades definidas, determinadas pelas frequências dos sistemas.” [4, p. 388].

Baseado nessas ideias e no modelo atômico de Rutherford, Nicholson postula que o momento angular de um átomo pode aumentar ou diminuir por quantidades discretas. Mas apesar de suas ideias se aproximarem da quantização do momento angular, foi Bohr o primeiro a interpretar que uma linha espectral era produzida por um único elétron atômico como um fenômeno quântico, postulando assim a quantização do momento angular [4].

Quando Bohr assumiu o postulado da quantização do momento angular, ele admitiu que apenas algumas órbitas seriam possíveis para os elétrons. Também concluiu que a órbita de um elétron era elíptica, e aplicando a ela a quantização do momento angular obteve a quantização da energia e a fórmula de Balmer, mencionada na seção 4.21 [4, p. 391].

Um trabalho importante para a aceitação do modelo de Bohr foi a análise dos espectros de raios X feita pelo físico inglês Henry Moseley (1887-1915). Moseley teve como motivador para sua pesquisa um trabalho publicado, em 1913, pelo físico holandês Antonius van den Broek (1870-1926), que relacionava o peso atômico do elemento químico com sua posição na Tabela Periódica [59]. Segundo seus resultados, o número atômico de cada elemento era igual ao número de elétrons do átomo e, portanto, igual à carga do núcleo [55, p. 158]. Da mesma forma, os trabalhos do físico inglês Charles Barkla (1877-1944) e de seu assistente Charles Sadler, de 1908, sobre a relação entre a carga do núcleo atômico e a emissão de raios X pelos elementos químicos, também influenciaram Moseley na sua pesquisa [54].

Moseley mediu as linhas espectrais dos raios X característicos<sup>74</sup> de aproximadamente 40 elementos [60]. Ele imaginava que essas linhas correspondiam a transições de elétrons entre as órbitas mais internas do átomo [4, p. 393]. Segundo seus resultados, publicados em 1914, Moseley sugeriu que os elementos químicos deveriam ser reordenados na Tabela Periódica, pois essa organização deveria ser feita baseada no número atômico dos elementos químicos (responsável por suas propriedades químicas) e não pelo seu peso atômico, critério utilizado anteriormente por Mendeleev e mencionado na seção 4.19 [60]. Moseley chegou a esses resultados e os comparou com os trabalhos de Bohr, encontrando consonância com os resultados apresentados por ele. Segundo Moseley verificou em seus trabalhos:

“...temos aqui uma prova de que existe no átomo uma quantidade fundamental que aumenta a passos regulares quando se passa de um elemento para o próximo. Esta quantidade só pode ser a carga do núcleo central, cuja existência já temos prova definitivas.” [4, p. 393].

---

<sup>74</sup> O choque do feixe de elétrons (que saem do catodo com energia de dezenas de KeV) com o anodo (alvo) produz dois tipos de raios X. Um deles constitui o espectro contínuo, e resulta da desaceleração do elétron durante a penetração no ânodo. O outro tipo é o raio X característico do material do ânodo. Assim, cada espectro de raios X é a superposição de um espectro contínuo e de uma série de linhas espectrais características do ânodo.

Outro experimento importante para a aceitação do modelo de Bohr foi realizado pelos físicos alemães James Franck (1882-1964) e Gustav Hertz (1887-1975), em 1914, que elaboraram a lei que explicava a colisão de um elétron com um átomo [58]. Bohr interpretou esse experimento à luz da Teoria Quântica demonstrando assim que sua hipótese sobre as órbitas estacionárias era correta, contudo Franck e Hertz não aceitavam essa interpretação, repetindo o experimento em 1916. Mas, em 1919, eles finalmente aceitaram a interpretação proposta por Bohr e, em 1925, receberam o Prêmio Nobel de Física por esse trabalho [55].

O modelo atômico de Bohr conseguiu responder a questionamentos antigos, como o significado dos espectros. Também estabeleceu um limite para sua teoria, mostrando os limites entre a Física Clássica e a Física Quântica [4]. Por seu trabalho Bohr, recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1922.

*Provavelmente a maior contribuição de Bohr foi corroborar a proposta central da nova Física, a quantização. Em seu modelo, essa proposta é reafirmada, aumentando assim seu grau de aceitação no meio científico.*

### **5.10. O modelo atômico de Sommerfeld**

Ainda que o modelo atômico de Bohr incorporasse a Física Clássica, não há dúvidas sobre a sua contribuição, juntamente com Planck, no lançamento de ideias que reforçaram a implementação de uma nova Física [4].

Contudo, a importância da Física Clássica pode ser reconhecida na grande resistência que se estabeleceu no início do século XX, para a aceitação da Teoria Quântica. Uma nova tentativa foi feita, entre 1915 e 1916, pelos físicos, o inglês William Wilson (1875-1965) e o alemão Arnold Sommerfeld (1868-1951), de formas independentes [4]. Eles estabeleceram regras gerais de quantização estabelecendo que grandezas físicas como a energia e o momento angular seriam quantizadas em um sistema periódico [61].

Paralelamente ao trabalho de Wilson e Sommerfeld, a espectroscopia foi se aperfeiçoando, permitindo a constatação de que as raias espectrais observadas anteriormente eram formadas por raias mais finas, que foram chamadas de estrutura fina. Sommerfeld tentou explicá-las partindo do modelo atômico proposto por Bohr [4].

Para Bohr, a energia ou a frequência de um elétron está associada a um único número quântico<sup>75</sup>. Mas, cada raia apresentada pela estrutura fina tinha uma energia diferente; assim, deveriam existir outros números quânticos que descrevessem essas raias mais finas. Para Sommerfeld, esse número quântico teria sua origem na órbita elíptica proposta por Bohr. Sommerfeld imaginava que ele poderia encontrar esse valor, pois essa órbita não tinha um raio constante. Para isso ele calculou a forma, o tamanho e a energia da órbita elíptica, usando a Mecânica Clássica. Como resultado ele encontrou mais um número quântico; anteriormente, já haviam sido encontrados dois, concluindo que a energia do elétron dependeria desses valores. Contudo, isso não foi suficiente para explicar a estrutura fina. O modelo não-relativístico de Sommerfeld apenas apresentou que as várias órbitas, caracterizadas por um mesmo número quântico, são ditas degeneradas<sup>76</sup> [4].

Tentando corrigir as falhas em seu modelo, Sommerfeld propôs uma correção relativística que removia a degenerescência da energia, gerando uma correção que é justamente da mesma ordem de grandeza necessária para explicar a estrutura fina:

---

<sup>75</sup> Para um sistema quântico, um número quântico identifica um dos possíveis valores de uma grandeza física observável. O estado de um sistema quântico fica caracterizado pelo conjunto de seus números quânticos. Alguns exemplos de números quânticos são os valores do momento angular ou do spin [24].

<sup>76</sup> O termo degenerado refere-se à situação de existência de estados diferentes para um mesmo nível de energia [24].

“a estrutura fina dos espectros atômicos é explicada pela correção relativísticas da massa do elétron.” [4, p. 406].

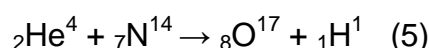
Mesmo respondendo satisfatoriamente a muitos resultados experimentais da época, Bohr continuava a afirmar que ainda existia a necessidade de uma “nova Física”. Posteriormente, os trabalhos realizados nesta época ficaram conhecidos como “a velha Teoria Quântica” [4].

### 5.11. Consequências do modelo de Sommerfeld

Com o objetivo de explicar a Tabela Periódica, o físico austro-norte-americano Wolfgang Pauli (1900-1958), em 1925, acrescentou aos três números quânticos decorrentes da teoria atômica de Bohr-Sommerfeld, um quarto número quântico. Assim, segundo Pauli, dois elétrons só poderiam coexistir em um mesmo sub-nível energético se tivessem, pelo menos, um dos quatro números quânticos diferente. Com essa hipótese, hoje conhecida como *Princípio da Exclusão de Pauli*, a estrutura atômica dos elementos havia sido explicada [62].

### 5.12. O próton

Em 1919, Rutherford, utilizando o mesmo princípio experimental utilizado no experimento que levou à proposta do seu modelo atômico (seção 5.8), fez incidir partículas alfa ( $\alpha$ ) sobre átomos de nitrogênio (N). Esperava-se um padrão de cintilações, já conhecido, proveniente da interação entre as partículas e uma tela cintilante. Contudo, ele observou um padrão diferente do esperado para as cintilações, que não era proveniente das partículas  $\alpha$  nem dos átomos de nitrogênio (N). Rutherford só havia observado esse padrão em experimentos que envolviam o átomo de hidrogênio (H). Mas, nessa montagem experimental não havia hidrogênio (H) presente. Procurando uma explicação para essa observação, Rutherford empregou o conceito de transmutação (seção 5.2), elaborado em 1902, segundo o qual o hidrogênio (H) era proveniente dos átomos de nitrogênio (N). Quando os átomos de nitrogênio (N) se desintegravam, atingidos por partículas  $\alpha$ , transformavam-se em oxigênio (O), emitindo um átomo de hidrogênio (H). Essa reação pode ser representada pela Equação 5:



A primeira parte da reação,  ${}_2\text{He}^4 + {}_7\text{N}^{14}$ , corresponde a colisão, representada pelo símbolo +, entre o núcleo de nitrogênio (N) e a partícula  $\alpha$ . O produto dessa reação, indicado pelo símbolo  $\rightarrow$ , é apresentado na segunda parte da reação por  ${}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{H}^1$ . Já o símbolo + dessa parte da reação representa que houve mais de um produto gerado nessa reação. É importante enfatizar que o símbolo + utilizado nesse contexto não tem o mesmo significado utilizado na Matemática.

Com esta proposta, Rutherford corrobora sua ideia de que os elementos poderiam sofrer transmutação, pois, reafirma que o átomo é capaz de se desintegrar, ou seja, o seu núcleo é divisível. Segundo a interpretação de Rutherford, como o átomo de hidrogênio (H) era proveniente do núcleo do nitrogênio (N), era provável que ele fosse uma partícula elementar que fazia parte do núcleo [35]. Então, em 1920, Rutherford propõe, à Acadêmica Britânica de Desenvolvimento da Ciência, a existência do *próton* (do grego, primeiro), como ele denominou o núcleo do hidrogênio [6].

*A proposta de Rutherford agregou ao conhecimento sobre a estrutura da matéria mais uma partícula elementar, o próton. Naquele momento, era conhecido que existiam duas partículas elementares que compunham o átomo: o elétron e o próton.*

*Rutherford além de propor a existência de núcleo atômico propõe que ele pode ser divisível ao sugerir a existência do próton. Essa observação abre um novo caminho para a Física.*

A trajetória de um próton foi fotografada, pela primeira vez, em uma câmara de nuvens, em 1925, pelo físico inglês Patrick Blackett (1897-1974) [63].

Rutherford criou um método experimental extremamente eficaz e utilizado até hoje na Física Nuclear e na Física de Partículas Elementares. Ele fez um feixe de partículas incidir sobre um núcleo ou sobre uma partícula, detectando os núcleos ou as partículas produzidas na colisão [42]. Nos aceleradores modernos, observa-se o resultado da colisão entre prótons de alta energia. Quanto maior a energia da partícula incidente, maior seu poder de penetração. Atualmente as partículas atingem energias da ordem de 1 TeV<sup>77</sup> o que nos permite observar mais profundamente a matéria [37].

### **5.13. O efeito Compton**

Apesar dos trabalhos de Planck (seção 5.3) e de Einstein (seção 5.6) sobre a quantização da energia, poucos pesquisadores aceitavam suas conclusões. A quantização da energia recebeu um pouco de reconhecimento, em 1913, devido às ideias de Bohr (seção 5.9). Mas, a proposta dos *fótons* só foi definitivamente aceita em 1922, após cinco anos de experimentos realizados pelo físico norte-americano Arthur Compton (1892-1962) [4].

Em suas investigações, Compton fez um feixe de raios X incidir sobre um alvo de grafite. Então, mediu a intensidade dos raios X espalhados em função do seu comprimento de onda para vários ângulos de espalhamento, verificando que, embora o feixe de raios X incidente fosse composto por apenas um comprimento de onda, os raios X espalhados pelo alvo de grafite apresentavam dois comprimentos de onda: um era o mesmo do feixe incidente e o outro era maior. Também constatou que essa diferença no comprimento de onda aumentava com o ângulo de espalhamento [48]. Esses resultados não eram explicados pela Teoria Clássica do Eletromagnetismo, o que fez Compton supor que entre o fóton, que constituía a radiação X, e o elétron, presente no alvo de grafite, ocorresse uma colisão, como se fóton e elétron fossem duas partículas livres que obedeciam a Cinemática Relativística<sup>78</sup> [4].

Apesar de o efeito Compton ter desempenhado um papel muito importante na aceitação do *fóton* como constituinte da luz, alguns cientistas, como Bohr, ainda questionavam como seriam explicados fenômenos como a interferência e a difração, partindo-se dessa interpretação [4].

Por seu trabalho, Compton recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1927<sup>79</sup>.

*Mesmo com o aumento do número de trabalhos que enfatizavam a importância da “nova Física”, não havia a preocupação em estabelecer qual era a teoria predominante, a “nova Física” ou a Física Clássica. O importante era compreender qual era o limite entre elas.*

### **5.14. O nêutron**

Após a proposta do próton (seção 5.12), Rutherford, em 1920, sugeriu a Royal Society de Londres que o isótopo que ele havia obtido ( ${}_8\text{O}^{17}$ ) poderia ser o  ${}_8\text{O}^{16}$ ,

<sup>77</sup> Teraelétron-volt, unidade de energia, equivalente a  $10^{12}$  eV  $\cong 1,6 \cdot 10^{-7}$  J.

<sup>78</sup> Descrição do movimento de corpos que se movem com velocidades próximas à velocidade da luz no vácuo, cerca de 300.000 km/s.

<sup>79</sup> Esse prêmio foi partilhado com Charles Wilson.

acrescido de uma partícula neutra de massa aproximadamente igual a do próton. Convencido de que essa partícula existia, Rutherford organizou um programa de pesquisa para detectá-la, e para coordenar essa pesquisa ele convidou o físico inglês James Chadwick (1891-1974). Essa partícula só foi identificada em 1932 [6], quando Chadwick provocou uma colisão entre partículas alfa ( $\alpha$ ) e elementos leves, como lítio (Li), berílio (Be) e boro (B).

A proposta da existência do *nêutron* baseava-se no problema da instabilidade atômica. Rutherford imaginou que essa partícula neutra seria composta por um próton e um elétron, o que justificaria sua carga elétrica neutra. Assim, Rutherford propôs que o núcleo dos elementos seria formado por prótons e elétrons [63]. Nessa proposta estava inserida uma importante questão: qual seria a força responsável pela coesão entre prótons e elétrons, para torná-los neutros? Na verdade, essa pergunta não pôde ser respondida na época, mas os cientistas já imaginavam que a força coulombiana era insuficiente para manter essas partículas unidas. Assim, era provável que existisse outra força, maior que a coulombiana, responsável por essa interação. Segundo Bassalo [62], o físico e historiador da ciência, Abraham Pais (1918-2000), considerou essa proposta como o início da, posteriormente denominada *interação forte*.

A busca pelo nêutron começou em 1930, quando o físico alemão Walter Bothe (1891-1957) e seu aluno Herbert Becker (1877-1955) projetaram um experimento que consistia no bombardeamento de uma amostra de berílio (Be) por partículas  $\alpha$ . Observaram que a interação entre as partículas  $\alpha$  e o berílio (Be) produzia um novo tipo de radiação, que identificaram como neutra e concluíram que se tratava da radiação gama ( $\gamma$ ). Por meio de um artigo publicado por Bothe, o casal de físicos franceses Irène Joliot-Curie (1897-1956) – filha de Pierre e Marie Curie - e Frédéric Joliot (1900-1958), refizeram o experimento proposto por Bothe utilizando uma fonte de partículas  $\alpha$  mais intensa e acrescentando, após o alvo de berílio (Be), uma placa de parafina. Os resultados do casal Joliot-Curie corroboraram a identificação de Bothe quanto à radiação ser neutra e radiação  $\gamma$ , mas acrescentaram que essa radiação era capaz de arrancar prótons da parafina, fazendo uma alusão ao efeito Compton [64].

Quando Chadwick relatou esse experimento a Rutherford, ele discordou da conclusão, pois imaginava que a radiação  $\gamma$  não teria energia suficiente para arrancar prótons da parafina. Isso contribuiu para que Chadwick resolvesse refazer o experimento do casal Joliot-Curie. Para isso ele introduziu algumas modificações como uma câmara de ionização<sup>80</sup> e um oscilógrafo<sup>81</sup>, esses dispositivos foram colocados depois do alvo de parafina [64].

Os resultados de Chadwick concordavam parcialmente com os do casal Joliot-Curie: as partículas  $\alpha$  quando interagem com o berílio (Be) produzem uma radiação neutra que, ao interagir com a parafina, arrancava prótons dessa. Chadwick mediu a energia desses prótons e verificou que eles não poderiam ser produzidos por raios  $\gamma$ . Então, propôs que essa radiação fosse composta por partículas neutras de peso semelhante ao do próton. Para verificar essa hipótese, Chadwick usou esta radiação neutra para bombardear vários gases diferentes e, medindo a energia dos átomos desses gases após a interação, calculou a massa dessas partículas e obteve um valor um pouco maior que a massa do próton, como previsto por Rutherford [59]. Chadwick publicou um artigo intitulado *“Possível existência de um nêutron”* na revista *Nature* que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Física de 1935 [6].

---

<sup>80</sup> A câmara de ionização foi utilizada para a detecção do tipo de partícula emitida. Assim quando o feixe de radiação passava pela câmara, ionizava o gás presente no seu interior, esse então, que era atraído por uma placa eletricamente carregada.

<sup>81</sup> O oscilógrafo detectava essas partículas atraídas pela placa, transformando esse sinal em pulso de corrente elétrica que geravam deflexões em um ponteiro.



*Mais uma vez Rutherford contribui para o conhecimento da estrutura da matéria. Ao propor a existência do nêutron ele inclui essa partícula no grupo das partículas elementares, junto com o elétron e o próton.*

*A identificação do nêutron mudou o rumo dos trabalhos que eram feitos. Anteriormente, sempre partículas com carga eram usadas para bombardear o núcleo, o que acabava gerando interações indesejáveis; usando o nêutron, isso poderia ser evitado.*

*Além disso, Rutherford apresentou a possibilidade da previsão de uma partícula antes de sua detecção experimental; isso só foi possível devido ao aumento da capacidade experimental e do conhecimento acumulado a partir desse século, e largamente difundido, a Física começa a aceitar previsões o que será muito importante para o seu desenvolvimento.*

### **5.15. O pósitron**

Outro episódio que ressalta a importância das previsões teóricas na Física, foi o trabalho do físico inglês Paul Dirac (1902-1984); em 1928, formulou a *Teoria Quântico-Relativística* do elétron, mais conhecida por *equação de Dirac*<sup>82</sup>, prevendo a existência de elétrons livres com estados de energia negativos [6].

Para entender a proposta de Dirac, deve-se voltar a 1927, quando ele propôs a *Teoria Quântica da Radiação*, que dizia que o elétron, em um estado excitado, perde energia emitindo um fóton e assim cai para o estado fundamental. Segundo demonstrou o físico sueco Oskar Klein (1897-1977), em 1929, um elétron no estado fundamental, pode emitir fótons indefinidamente e cair em um estado de energia negativa. Essa afirmação ficou conhecida como *paradoxo de Klein*, cuja solução foi proposta por Dirac, em 1930 [6].

Segundo Dirac, as transições previstas por Klein poderiam ser evitadas, em consequência do princípio de exclusão de Pauli [6], esse mencionado na seção 5.11. Assim, Dirac propôs que o vácuo seria constituído de todos os estados de energia positiva desocupados, e de todos os estados de energia negativa ocupados, esses últimos conhecidos como “mar de Dirac”. Dessa forma, quando um elétron desse “mar” absorvesse um fóton de energia maior do que a sua energia associada a sua massa de repouso<sup>83</sup>, deslocar-se-ia para um estado de energia positiva, deixando para trás um “buraco”, que foi chamado por Dirac de *antielétron* [6, p. 84]. O processo descrito acima por Dirac é conhecido como *criação de pares de partícula e antipartículas* e foi observado experimentalmente mais tarde [4].

Dirac imaginava que esse “buraco” na verdade fosse o próton, mas os físicos, o norte-americano Julius Oppenheimer (1904-1967) e o alemão Hermann Weyl (1885-1955), em 1930 e em 1931, respectivamente, demonstraram baseados nas propriedades de simetria da *equação de Dirac*<sup>84</sup> que essa partícula deveria ter a mesma massa do elétron. Ela foi detectada, em 1932, pelo físico norte-americano Carl Anderson (1905-1991), quando ele estudava o desvio magnético de raios cósmicos<sup>85</sup>, depois que atravessavam placas de chumbo (Pb) colocadas em uma câmara de nuvens. Anderson chamou essa partícula de *pósitron*, representada por  $\bar{e}$ , aceitando

---

<sup>82</sup> Dirac estabeleceu uma equação capaz de descrever a dinâmica de um elétron em sua interação com um campo eletromagnético, covariante com relação às transformações de Lorentz, mostrando, pela primeira vez, que o spin parece ser intrinsecamente uma propriedade quântico-relativística do elétron e do pósitron [4, p. 548].

<sup>83</sup> Na teoria da relatividade especial, energia de repouso é  $E=m_0c^2$ , que é a relação conhecida como equivalência entre massa e energia [24].

<sup>84</sup> Essa equação descreve o comportamento de férmions, tais como o elétron e o próton [24].

<sup>85</sup> Raios cósmicos são partículas atômicas que chegam à Terra, vindas do espaço sideral. Todo o Universo é percorrido por partículas atômicas emitidas pelos astros, que viajam em todas as direções e muitas delas encontram a Terra em suas trajetórias. Sua composição varia com a altitude [40].

assim a sugestão do editor da revista *Science News Letters*, onde foi publicada a primeira fotografia do traço de ionização deixado pelo pósitron em uma câmara de nuvens [4]. Sua confirmação foi feita por Blackett e pelo físico italiano Giuseppe Occhialini (1905-1993) [6]. Pela identificação do *pósitron*, Anderson recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1936.

O pósitron foi a primeira antipartícula detectada em um laboratório. Foi a primeira vez que uma partícula elementar não foi encontrada naturalmente no interior dos átomos [4]. A identificação do pósitron foi decisiva para a conceituação do elétron (seção 4.28). Também provocou uma revisão no conceito de partícula elementar, que deixou de ser entendida como necessariamente imutável e indestrutível [4]. Outro conceito importante estimulado pelas previsões de Dirac e pela identificação do pósitron foi o conceito de *antipartícula*<sup>86</sup>, reafirmando assim as simetrias existentes na natureza.

*Percebe-se o resgate dos trabalhos da antiguidade grega, escritos por Anaximandro de Mileto (seção 2.1), que relatavam a busca da harmonia através do conflito entre os opostos e os cíclicos processos de criação e destruição.*

A proposta, de que para cada partícula existia uma antipartícula, mostrou a possibilidade de novos fenômenos e também conduziu a uma revisão de mais um conceito da Física: o vácuo. Quando Dirac encontrou para sua equação duas soluções, uma para energia positiva e outra para energia negativa ele sugeriu essa revisão. Segundo ele:

“...Se não podemos excluir [os estados de energia negativa], devemos encontrar um método de interpretação física para eles. Pode-se chegar a uma interpretação razoável adotando uma nova concepção de vácuo. Anteriormente, as pessoas pensavam no vácuo como uma região do espaço que é completamente vazia, uma região do espaço que não contém absolutamente nada. Agora devemos adotar uma nova visão. Podemos dizer que o vácuo é uma região do espaço onde temos a menor energia possível.” [4, p. 553].

Dirac propôs uma nova forma de se entender o que é o vácuo; segundo essa proposta a primeira grande diferença do conceito antigo é que matéria e espaço não são mais conceitos excludentes. O vácuo não pode mais ser conceituado como a ausência de matéria. O trabalho de Dirac ao tentar unir a Mecânica Quântica com a Relatividade Especial modificou a relação entre matéria e espaço. Referindo-se a esse trabalho, o físico norte-americano Steven Weinberg (1933- ) diz:

“...dela resultou uma nova visão de mundo, em que a matéria perdeu seu papel central e são os princípios de simetria que assumem esse papel.” [4, p. 553].

Os trabalhos de Dirac também estão na base do desenvolvimento da Eletrodinâmica Quântica<sup>87</sup> (QED) e, em geral, da Teoria Quântica de Campos<sup>88</sup>. É essa a teoria que descreve os processos de criação a aniquilação de partículas, que define o vácuo e descreve a dinâmica das interações entre partículas elementares; o que, por sua vez, determina a revisão do próprio conceito de partícula elementar. [4, p. 553].

---

<sup>86</sup> Uma antipartícula possui a mesma massa e um conjunto de cargas opostas com relação à partícula associada [4, p. 547].

<sup>87</sup> Teoria que utiliza os conceitos da Mecânica Quântica e da Relatividade Especial na descrição dos campos eletromagnéticos, da radiação eletromagnética e de sua interação com a matéria [24].

<sup>88</sup> Teoria que descreve campos utilizando os conceitos da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade Especial, fornecendo um quadro teórico para as partículas elementares que correspondem aos modos de vibração quantizados dos campos. Exemplos de teorias quânticas de campo são a Eletrodinâmica Quântica, a Cromodinâmica Quântica e a Teoria Eletrofraca [24, p. 222].

A identificação do elétron, por Thomson, foi importante, pois provocou a revisão do conceito de átomo. Contudo, a identificação do pósitron foi tão ou mais importante quanto à do elétron, pois foi responsável pela melhor compreensão do que era o elétron, gerando uma descrição teórica da sua dinâmica e de sua interação com campos externos [4]. Segundo Caruso e Oguri [4]:

“a concepção e a descoberta do pósitron talvez sejam comparáveis apenas à gênese do conceito de átomo na Grécia Antiga.” [4, p. 548].

A análise dessas questões sobre simetria nos faz retomar a pergunta:

“por que existe em nosso Universo essa enorme assimetria entre matéria e antimatéria?” [3, p. 559].

É possível que essa questão só possa ser resolvida quando conseguirmos elaborar uma teoria unificada das interações fundamentais, assunto que será tratado mais tarde.

*Após a identificação do pósitron, um grande número de partículas pode ser identificado devido à possibilidade de interação entre matéria e antimatéria nos aceleradores de partículas<sup>89</sup>.*

A formulação final dessa teoria só foi possível após a Segunda Guerra Mundial, devido aos esforços de físicos como os norte-americanos Richard Feynman (1918-1988), Julian Schwinger (1918-1994), e do japonês Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979) entre outros [52].

## **5.16. O neutrino**

Como já foi dito anteriormente, o grande passo dado no estudo das partículas elementares foi saber o que procurar; e a capacidade de previsão, aliada ao desenvolvimento tecnológico foram muito importantes para o desenvolvimento dessa área da Física. Ainda na década de 1920, existiam muitas dúvidas sobre o decaimento beta ( $\beta$ ) – seção 4.30; não existia uma explicação esclarecedora o suficiente sobre como um núcleo *A* poderia emitir um elétron e transformar-se em um núcleo *B*, com energia menor do que a do núcleo anterior, onde estava a energia que faltava? [6].

Tentando responder a esta pergunta, Bohr, em 1923, defendia que o Princípio da Conservação da Energia só era válido para sistemas macroscópicos, sendo violado para sistemas microscópicos.

Pauli, em 1930, também tentou responder a essa pergunta propondo a existência de uma partícula neutra de massa muito pequena, que seria emitida junto com o elétron do núcleo radioativo<sup>90</sup>, explicando que a energia que “faltava” estava associada com esta partícula [6]. Em 1931, Pauli apresentou sua proposta de uma nova partícula em uma série de conferências, na Itália. O físico ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954) em 1934, denominou esta partícula de *neutrino* (que significa pequeno nêutron), representada por  $\nu$ , quando ela foi usada por ele na sua teoria da *força fraca*, como responsável pelo decaimento  $\beta$  [65].

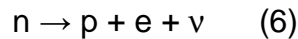
Segundo a proposta de Fermi, o decaimento  $\beta$  ocorria por intermédio de uma força da natureza que ainda não havia sido identificada, inicialmente chamada de *interação de Fermi* e, posteriormente denominada de *interação fraca*. Assim, um

---

<sup>89</sup> Aparato destinado a aumentar a energia cinética de partículas carregadas, tais como elétrons, prótons e suas antipartículas [24, p. 4].

<sup>90</sup> Em Física de Partículas, esse termo é usado quando nos referimos ao elemento radioativo, e não propriamente a seu núcleo.

nêutron (n) transformava-se em um próton (p) emitindo um elétron (e), a partícula  $\beta$ , e um *neutrino*, como na Equação 6:



Naquele ano de 1934 Fermi liderou um grupo de físicos italianos, conhecidos como o Grupo de Roma [66], do qual fazia parte os físicos italianos Emilio Segrè (1905-1989), entre outros; com esta teoria em mente e acreditando que poderiam criar novos elementos fizeram as primeiras tentativas, bombardeando com nêutrons alguns elementos químicos em ordem crescente de número atômico [4], até que chegaram ao urânio (U), o elemento químico mais pesado conhecido até aquele momento. Contudo, não conseguiram entender o resultado obtido, pois além da desintegração e da identificação da meia-vida<sup>91</sup> do urânio (U), encontraram uma mistura de outras meias-vidas. Essas observações levaram Fermi a concluir que havia identificado um novo elemento “transurânico”, que chegou a ser denominado urânio-X [66].

*Aqui podemos perceber a importância da identificação do nêutron; considerando as partículas já conhecidas essa era a única que poderia penetrar no núcleo atômico sem ser repelida. E ainda tinha massa suficiente para colidir com um núcleo atômico.*

Foi nesse momento que o grupo de pesquisa da física sueco-austriaca Lise Meitner (1878-1968) e do químico germano-austriaco Otto Frisch (1904- 1979) interessaram-se pelo trabalho de grupo de Roma e passaram a realizar pesquisas na mesma área, na Alemanha, obtendo resultados que corroboraram os do grupo de Roma [66]. Contudo, Meitner foi além, e baseada no modelo da gota líquida de Bohr, elaborou uma explicação teórica para os resultados de Fermi. Segundo ela, quando o nêutron colidia com o núcleo de urânio (U), esse tornava-se instável e se dividia em dois. Esse processo ficou conhecido como *fissão nuclear*. A teoria de fissão nuclear foi desenvolvida nesse mesmo ano por Bohr e pelo físico norte-americano John Wheeler (1911-2008). Tentando controlar esse processo, um grupo de cientistas, liderado por Fermi, construiu o primeiro protótipo de um reator nuclear<sup>92</sup> na Universidade de Chicago. Os resultados dessa pesquisa permitiram aos cientistas que faziam parte do Laboratório Nacional americano de Los Alamos, a construção da primeira bomba atômica [65].

Para elaborar a teoria da interação fraca, Fermi uniu conceitos como o do neutrino, da identificação do nêutron (seção 5.14), da Mecânica Quântica e da criação e aniquilação de partículas (seção 5.15). Através da teoria da interação fraca, demonstrou que poderia descrever o espectro de energia do decaimento  $\beta$ , considerando-se o neutrino como uma partícula de massa nula ou muito pequena em relação à massa do elétron.

Como já foi dito anteriormente, Fermi pressupunha que o decaimento  $\beta$  era devido à interação de uma força ainda não identificada, a interação de Fermi. Mesmo com um trabalho muito bem elaborado, Fermi ainda enfrentava alguns problemas quanto à aceitação de suas ideias, pois sua teoria falava de uma partícula ainda não detectada. Por isso, a etapa seguinte do trabalho foi tentar identificar o neutrino [65].

Chadwick mostrou que o neutrino poderia atravessar, pelo menos, cento e cinquenta quilômetros de ar antes de interagir com algum átomo, valor esse que foi logo corrigido para trinta e um mil quilômetros. Verificando a dificuldade de detecção do neutrino, na natureza, os físicos, o germano-norte-americano Hans Bethe (1906-2005)

<sup>91</sup> A meia-vida é o tempo necessário para que se reduza à metade a quantidade inicial de átomos radioativos de um elemento radioativo.

<sup>92</sup> Aparato no qual se induz, de forma controlada, uma fissão nuclear em cadeia, para aproveitamento dos nêutrons ou da energia despendida [24, p. 195].

e o germano-inglês Rudolf Peierls (1907-1995) sabiam que o neutrino poderia ser criado no processo de decaimento do nêutron, onde também seria gerado um próton e um elétron. Mas também se questionaram sobre a existência de um processo inverso, onde o neutrino seria absorvido por um próton, gerando um nêutron e um pósitron; posteriormente, esse processo foi conhecido como *decaimento  $\beta$  inverso*. Tentando certificar-se de sua proposta, Bethe e Peierls, utilizando a teoria de Fermi, calcularam a probabilidade de ocorrência desse processo. Contudo, encontraram uma probabilidade tão baixa que consideraram praticamente impossível observar um neutrino [65].

Em 1938, Fermi recebeu o Prêmio Nobel de Física pelos seus trabalhos com a irradiação de núcleos com nêutrons.

### 5.17. Os nucleons e a força forte

Após a detecção do nêutron (seção 5.14) foi proposto que ele faria parte do núcleo atômico junto com os prótons (seção 5.12). Contudo, essa nova proposta ainda não contemplava a ideia da estabilidade atômica, pois o nêutron não tinha carga elétrica, logo não iria interagir com os prótons, que com sua carga positiva acabariam por se repelir mutuamente. Para tentar explicar porque o núcleo não colapsava, os físicos, o russo Dimitrij Iwanenko (1904-1994), o alemão Werner Heisenberg (1901-1976) e o italiano Ettore Majorana (1906-1938), propuseram, independentemente, em 1932, que os prótons e nêutrons que constituíam o núcleo atômico se comportavam como partículas únicas, denominadas *nucleons*. Os prótons e nêutrons quando formavam os nucleons interagiriam por meio de uma força atrativa que era capaz de superar a força repulsiva coulombiana. Heisenberg, influenciado pela proposta de Fermi sobre o decaimento beta ( $\beta$ ) –ver 5.16 –sugeriu que essa força entre os nucleons era devido à troca de elétrons e neutrinos entre eles. Contudo, o cálculo detalhado dessa força mostrou que ela era muito fraca [6]. Também propôs que para explicar o comportamento idênticos duas partículas, era necessário introduzir um novo conceito, o *spin isotrópico* ou *isospin*<sup>93</sup>, pois não era possível caracterizá-las apenas com suas cargas elétricas. A introdução desse novo conceito foi importante porque as partículas puderam ser tratadas como pertencentes a uma mesma família, com propriedades idênticas. Também foi muito importante porque se atribuiu a uma partícula um número abstrato que representava uma propriedade física. Esta proposta foi muito importante para a Física, pois introduziu um novo modo de pensar, inaugurou caminho para propostas de novos conceitos [42].

Tentando resolver o problema da instabilidade atômica, o físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981) sugeriu algumas modificações no modelo proposto por Heisenberg. Segundo Yukawa, a proposta de Heisenberg deveria estar correta, mas as partículas que seriam responsáveis pela mediação dessa força não seriam os elétrons ou os neutrinos; para Yukawa essas partículas ainda não haviam sido identificadas, mas deveriam ter uma massa com um valor intermediário entre a massa do próton e do elétron, e por essa razão foram inicialmente chamadas de *mésons*<sup>94</sup>. [6]. Esta força ficou conhecida como *força forte* e, atualmente, é denominada *interação forte*. Por esse trabalho, Yukawa recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1949.

A proposta foi recebida, inicialmente, com um pouco de ceticismo, mas, em 1937, a credibilidade dessa teoria foi alavancada através do trabalho de Anderson e seu assistente Seth Neddermeyer (1907-1988), que identificaram, nos raios cósmicos, partículas altamente ionizantes e com massa aproximadamente igual à prevista por

<sup>93</sup> Número quântico que serve para distinguir partículas, prótons e nêutrons, posteriormente chamadas de hádrons, de cargas elétricas diferentes nas interações fortes [24].

<sup>94</sup> Atualmente o conceito de méson não depende mais de sua massa. Um méson é uma partícula que não se desintegra em um próton ou nêutron.

Yukawa. Contudo, ainda faltava a confirmação de que a partícula prevista por Yukawa era a mesma detectada por Anderson e Neddermeyer. Assim, foram estabelecidas duas linhas de trabalho: uma procurava estabelecer a natureza dessa força e a outra verificar se o méson detectado por Anderson era o mesmo previsto pela teoria de Yukawa [6].

Quanto à natureza dessa força ela já vinha sendo estudada, desde 1933, pelo físico húngaro-norte-americano Eugene Wigner (1902-1995). Em 1935, vários físicos realizaram trabalhos, experimentais e teóricos, sobre o espalhamento de nucleons. Como resultados desses trabalhos, pode-se citar a propriedade da *independência da carga elétrica*<sup>95</sup> e a proposta de um novo número quântico, por Wigner, em 1937, que corroborou a ideia proposta por Heisenberg, de 1932, de que os nucleons deveriam se caracterizar por um novo número quântico denominado spin isotópico ou isospin [6, p. 88].

E quanto à confirmação de que o méson detectado por Anderson era o mesmo previsto por Yukawa, os trabalhos desenvolvidos detectaram dois tipos de componentes nos raios cósmicos, a componente “*dura*” (*hard*) e a componente “*mole*” (*soft*), essa última conhecida como chuviros penetrantes (*cascade showers*). Em 1937, os físicos, o indiano Homi Bhabha (1909-1966) e o alemão Walter Heitler (1904-1981), independentemente dos norte-americanos Julius Oppenheimer (1904-1967) e J. F. Carlson, explicaram, utilizando a Eletrodinâmica Quântica (QED), as componentes dos raios cósmicos. Mais tarde, em 1938, Bhabha, independentemente dos físicos alemães, Hans Euler (1909-1941) e Heisenberg, explicaram essas componentes utilizando a teoria dos mésons [6, p. 92], proposta anteriormente por Yukawa.

Muitos trabalhos foram sendo desenvolvidos sobre os mésons, e, em 1947, os físicos italianos Marcelo Conversi (1917-1988), Ettore Pancini (1915-1981) e Oreste Piccioni (1915-2002) observaram que quando mésons eram detidos por absorvedores de carbono (C), eles não eram absorvidos e decaíam normalmente, evidenciando que essas partículas interagiam fracamente com a matéria, o que significava que o méson não poderia sofrer a força forte, logo, não poderia ser a partícula mediadora dessa força [6]. Assim, concluiu-se que a partícula observada por Anderson não poderia ser a mesma prevista por Yukawa [68].

Mesmo com o méson não fazendo parte da teoria da força forte de Yukawa, a investigação sobre ele continuou. Ele foi detectado após uma série de trabalhos que foram desenvolvidos em que se procurava explicar a produção de mésons em experimentos envolvendo raios cósmicos. Na verdade, foi detectada a presença de dois mésons na natureza, pelo grupo liderado pelo físico inglês Cecil Powell (1903-1969), do qual também fazia parte o físico brasileiro César Lattes (1924-2005), e o físico italiano Giuseppe Occhialini (1907-1993), pertencentes ao H. H. Wills Physical Laboratory, da Universidade de Bristol, em 1947 [6].

A participação de Lattes nessa pesquisa foi muito importante, pois ele desenvolvia experimentos expondo chapas fotográficas (emulsões nucleares) muito sensíveis, a altitude de cinco mil e seiscentos metros, nos Andes bolivianos e nos Pirineus. Ao voltar para o laboratório em Bristol, analisava, com o auxílio de um microscópio, as chapas fotográficas expostas; por meio dessas análises, ele concluiu que quando os raios cósmicos colidiam com núcleos de oxigênio (O) e nitrogênio (N), presentes na atmosfera, produziam dois tipos de mésons, o *méson*  $\pi$  (hoje, *píon*) e o *méson*  $\mu$  (hoje, *múon*). Assim, concluiu-se que os mésons  $\pi$  eram formados em grandes altitudes e que os mésons  $\mu$  eram formados ao nível do mar. Também foi

---

<sup>95</sup> Essa proposta, elaborada pelos físicos norte-americanos Benedict Cassen (1902-1972) e Edward Condon (1902-1974) em 1936, apresenta um formalismo que incorpora a igualdade entre as interações próton-próton, próton-nêutron e nêutron-nêutron [67].

detectado que o méson  $\mu$  era um produto do decaimento do méson  $\pi$  [6], concluindo-se que a partícula observada por Anderson havia sido o méson  $\mu$  [68].

Voltando a Bristol, Inglaterra, onde morava e trabalhava, Lattes escreveu um artigo em parceria com Powel, chefe do laboratório. Por esse trabalho Powel recebeu o Prêmio Nobel de Física de 1950 sozinho, apesar da parceria com Lattes [69].

Com os avanços na tecnologia dos aceleradores de partículas, o número de partículas detectadas aumentou bruscamente; neste momento, Lattes se transferiu para a Universidade de Berkeley, na Califórnia, onde já havia sido construído um novo acelerador de partículas. Em poucas semanas, produziu o méson  $\pi$  em laboratório. Também foram produzidos os *méson*  $\pi^-$ , a antipartícula do méson  $\pi$  e o *méson*  $\pi^0$  [69]. Essas foram as primeiras partículas produzidas com o auxílio de um acelerador de partículas [6].

*A busca pelo méson é um exemplo de como a ciência mudou seus métodos ao longo dos tempos. O diálogo constante entre teoria e experimento foi fundamental para o progresso científico.*

### **5.18. As partículas estranhas e a estranheza**

Também em 1947, na Universidade de Manchester, os físicos ingleses George Rochester (1908-2001) e Clifford Butler (1922-1999), trabalhando com uma câmara de nuvens, detectaram partículas chamadas por eles de *partículas estranhas* devido ao seu comportamento desconhecido. Esse experimento consistia em uma câmara de nuvens, exposta no topo da montanha Pic Du Midi, nos Pirineus franceses, que tinha em sua parte central uma placa metálica, imersa em um campo magnético, com contadores Geiger<sup>96</sup> acima e abaixo para assinalarem a passagem de partículas. Na placa metálica central foram produzidos chuviscos penetrantes; em dois eventos identificou-se uma partícula sem carga elétrica, que se desintegrava em duas partículas carregadas. Essas partículas neutras foram chamadas *partículas-V*, por que na fotografia as duas partículas carregadas resultantes da desintegração formavam um V. Posteriormente, passaram a ser chamadas *partículas estranhas* [42].

Essa denominação foi consequência da constatação de que elas eram produzidas muito mais frequentemente do que se poderia supor pela sua desintegração; em outras palavras, o processo de produção dessas partículas é diferente do processo de desintegração [40, p. 73].

Concomitante ao trabalho com os neutrinos foi desenvolvida a pesquisa sobre as partículas estranhas. No início da década de 1950, foi sugerido que as partículas estranhas eram produzidas aos pares, o que foi confirmado em 1954, em um experimento realizado no *Brookhaven National Laboratory* (Laboratório Nacional Brookhaven). A partir da década de 1950, os experimentos com partículas foram sendo transferidos para os aceleradores de partículas, onde havia a possibilidade de controle sobre as condições experimentais [42].

A identificação das partículas estranhas, cuja existência não havia sido prevista, causou uma grande surpresa. Blackett disse sobre a identificação:

“...o que é que essas partículas estão fazendo na Natureza? A Natureza está nos enviando uma mensagem que nós ainda não compreendemos.” [42, p. 68].

---

<sup>96</sup> Contador que consiste em um cátodo cilíndrico e oco contendo um gás mantido a baixa pressão e num fino ânodo ao longo do eixo do cilindro. Quando uma partícula ou radiação penetra no contador, produz no gás íons e elétrons livres que, acelerados pelo campo elétrico, produzem outros íons e elétrons livres; estes, capturados pelo ânodo, geram um impulso elétrico [24, p. 51].

Outros trabalhos buscaram verificar estas reações na natureza. Observou-se que algumas reações previstas teoricamente não aconteciam, o que evidenciou que na natureza, havia algumas regras de seleção [42].

Tentando compreender essas regras de seleção, muitas propostas foram feitas, mas apenas a do físico norte-americano Murray Gell-Mann (1929- ), apresentada em 1953, teve sucesso. Segundo sua proposta, seria necessário introduzir o número quântico aditivo denominado *estranheza*, que deveria caracterizar as partículas estranhas. Essa regra deveria se aplicar às interações fortes, fracas e eletromagnéticas [42]. Gell-Mann também propôs que as partículas poderiam ou não carregar estranheza, e que essa poderia ser violada, mas apenas em processos que ocorressem devido à interação fraca. Nos demais processos a estranheza deveria se conservar [40].

Assim, Gell-Mann propôs que, nas observações onde haviam sido detectadas as partículas estranhas (raios cósmicos ou aceleradores de partículas), estavam envolvidas partículas que não carregavam estranheza em seu estado inicial, como os prótons e os píons. Mas, como a produção de partículas estranhas ocorre via interação forte, o estado final deveria possuir estranheza nula. Por esse motivo as partículas estranhas eram produzidas aos pares, uma com estranheza positiva e outra com estranheza negativa, o que asseguraria que, no final do processo, haveria a conservação da estranheza [40]. Contudo, depois de produzidas, essas partículas poderiam se desintegrar devido à interação forte, mas apenas quando o estado final possuísse a mesma estranheza. Caso fossem as partículas mais leves que carregassem estranheza, esse processo seria proibido, pois não haveria energia suficiente para realizá-lo. Assim, a interação fraca atua, resultando na desintegração das partículas estranhas, com violação de estranheza, em partículas que não carregam estranheza, formando as trajetórias em  $v$  [40, p. 77]. Como esse processo demorava muito mais tempo do que o processo realizado via interação forte, essas partículas tinham uma meia-vida maior. O que colaborou para a identificação de novas partículas que carregavam estranheza nos aceleradores de partículas [40].

*Mesmo com o passar dos séculos, um princípio muito antigo, o da simetria, exaltado na Grécia antiga ainda é muito importante na elaboração de teorias científicas.*

### **5.19. Classificando as partículas**

Em 1958, o físico russo Lev Okun (1929- ) denominou as partículas que são sensíveis à interação forte de *hádrons* (do grego, grande, massivo) que por sua vez, são compostos de dois grupos: os *mésons* (partículas de massa intermediária), de spin inteiro (píons), e os *bárions* (do grego, pesado) de spin fracionário (nucleons) [6].

### **5.20. Ainda a busca pelos neutrinos**

Após a Segunda Guerra Mundial, os físicos norte-americanos Frederick Reines (1918-1998) e Clyde Cowan (1919-1974), que faziam parte do grupo que trabalhou em Los Alamos (seção 5.16), começaram a pesquisar uma forma de detectar os neutrinos liberados durante testes nucleares [65].

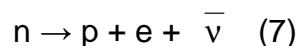
Nessa época, foi identificada a capacidade de cintilação de alguns líquidos orgânicos, o que levou Reines e Cowan a utilizar essa nova técnica em seu experimento de detecção dos neutrinos. Eles pensaram em utilizar um grande tanque com cintilador líquido; assim, quando o neutrino fosse absorvido por um próton, por meio do processo beta ( $\beta$ ) inverso (seção 5.16), o pósitron gerado na colisão iria aniquilar-se com os elétrons do meio e geraria raios gama ( $\gamma$ ). Com sua grande capacidade de ionização, os raios  $\gamma$  provocariam a emissão de luz pelo líquido



cintilador, e essa poderia ser detectada por meio de fotocélulas colocadas nas paredes do tanque. Contudo, este experimento deveria ser feito no subsolo a fim de minimizar os efeitos da interação com os raios cósmicos, pois esses também poderiam ionizar o líquido cintilador [65].

A primeira experiência realizada por Reines e Cowan aconteceu 20 m abaixo da superfície, mas o efeito dos raios cósmicos pôde ser percebido no cintilador. Para minimizar esses efeitos, os tanques com o líquido cintilador foram intercalados com tanques de cloreto de cádmio ( $\text{CdCl}_2$ ) diluído em água; desta forma, o nêutron liberado, quando o neutrino é absorvido pelo próton no processo  $\beta$  inverso, movimenta-se através do líquido colidindo com os núcleos, e vai perdendo energia nessas colisões até que tenha a energia adequada para ser capturado por um núcleo de cádmio (Cd). Por sua vez, esse núcleo ficaria num estado excitado, e logo decairia, emitindo mais raios  $\gamma$  [65, p. 198].

Assim, em 1953, Reines e Cowan detectaram o neutrino ao estudarem a colisão de um fluxo de neutrinos oriundos do decaimento  $\beta$ , produzidos pelo reator do *Hanford Engineering Works* em Whashington [6, p. 85]. Pela detecção do neutrino, Reines<sup>97</sup> recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1995 [70]. Naquele mesmo ano, os físicos norte-americanos, Enil Konopinski (1911-1990) e Hormoz Mahmoud (1918- ) identificaram essa partícula como um *antineutrino*, representado por  $\bar{\nu}$  [71]. Assim, o decaimento  $\beta$ , ficou expresso pela Equação 7:



Os trabalhos com essas partículas constataram algumas semelhanças entre elétrons, múons e neutrinos, o que fez com eles fossem reunidos em um mesmo grupo, o grupos dos *léptons* (do grego, leve), que são as partículas que não interagem por meio da força forte. Esse grupo recebeu essa denominação durante a investigação da partícula mediadora da teoria de Yukawa (seção 5.17).

*A introdução deste conceito levou a implicações importantes para a evolução da teoria, por exemplo, quando se reúnem essas partículas em um grupo, resgatam-se, novamente, antigos vínculos com o conceito de simetria que, na verdade, sempre esteve presente na Física.*

Também surge uma nova classificação que se mostrará importante, junto com o conceito de simetria, para a evolução do estudo das partículas elementares: os léptons são classificados em *famílias* ou *gerações*.

### **5.21. Completando a classificação**

A identificação do grupo dos léptons completou a classificação anterior, com a formação de dois grupos de partículas: os hádrons, que interagem devido à interação forte; e os léptons que não interagem por meio da interação forte.

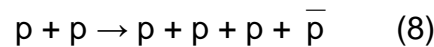
Até aquele momento, as partículas pertencentes ao grupo dos hádrons eram: prótons, nêutrons e píons; e ao dos léptons, elétrons, múons e neutrinos.

### **5.22. E Dirac tinha razão**

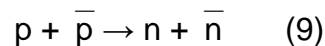
Em 1954, foi detectada a antipartícula do próton, o *antipróton*, representado por  $\bar{p}$ . A obtenção foi feita por Segré (seção 5.16) e pelos físicos norte-americanos Owen Chamberlain (1920-2006), Clyde Weigand (1915-1996) e Thomas Ypsilantis (1928-2000), por meio de um acelerador de partículas, chamado BEVATRON, do *Lawrence*

<sup>97</sup> Reines dividiu o Prêmio Nobel, em 1995, com Martin L. Perl. Perl recebeu o a referida premiação pela identificação do *tau*, partícula elementar integrante do grupo dos *léptons*.

*Berkeley National Laboratory*, na Universidade de Berkeley. O antipróton foi detectado na reação descrita abaixo (Equação 8), na qual a colisão entre dois prótons gerou três prótons mais um antipróton:



Em 1956, os físicos, os norte-americanos Bruce Cork (?-1994), Glen R. Lambertson (1941- ), William Wenzel e o italiano Oreste Piccioni (1915-2002) anunciaram a produção do *antinêutron*, representado por  $\bar{n}$ , por meio da colisão do antipróton com a matéria, colisão essa que pode ser descrita pela equação abaixo (Equação 9), na qual foram obtidos um nêutron e um antinêutron.



Mas, apenas em 1958 sua existência foi confirmada por um grupo de cientistas, do qual Segré fazia parte [59]. Observe que as antipartículas costumam ser representadas por uma letra, que representa a partícula, com uma barra em cima.

A detecção dessas duas antipartículas confirmou a existência da antimatéria prevista por Dirac (seção 5.15). Assim, admitiu-se que a matéria era constituída por partículas e a antimatéria por antipartículas [42].

A proposta de Dirac abriu caminho para que um grande número de partículas elementares fossem observadas, graças à possibilidade de fazer interagir matéria e antimatéria em grandes aceleradores [6].

### **5.23. Uma nova proposta sobre a Interação Fraca**

Durante a pesquisa de Reines e Cowan, dois físicos sino-norte-americanos, Tsung Dao Lee (1926- ) e Chen Ning Yang (1922- ), que trabalhavam na Universidade de Columbia em Nova Iorque, fizeram uma proposta para modificar a teoria de Fermi (seção 5.16), assim conseguiriam explicar o comportamento de outras partículas conhecidas. Essa proposta violava um princípio da Física, nesse caso a simetria de paridade<sup>98</sup>. A mudança na teoria de Fermi, unida às ideias de Dirac sobre criação e aniquilação de partículas, os levaram a concluir sobre a existência de neutrinos e antineutrinos, e mais ainda, que o neutrino é uma partícula de mão esquerda e o antineutrino, de mão direita [65, p.198]. Para a compreensão dessa denominação é necessário retomar-se o conceito de spin. O spin é um número que indica como a partícula elementar gira em torno de si própria. É claro que se uma partícula é chamada de elementar, e para todos os efeitos é apenas um ponto, pode-se perguntar como um ponto gira em torno de si mesmo. Isto é uma visão simplificada de uma propriedade que pode ser verificada, por exemplo, para os elétrons, os quais, próximos a um ímã, possuem um comportamento diferente conforme o spin seja um dos valores possíveis (+1/2 ou -1/2). Se a direção do spin, ou do giro, estiver na direção do movimento das partículas, dizemos que ela é de mão direita; se a direção do spin for contrária ao movimento, dizemos que ela é de mão esquerda [65].

Segundo a proposta de Lee e Yang, um antineutrino emitido no decaimento  $\beta$  deveria se de mão direita, nunca um antineutrino de mão esquerda. Em 1958, o grupo do físico austro-húngaro Maurice Goldhaber (1911- ) verificou essa proposta experimentalmente. Ainda hoje essas propriedades são estudadas e parecem

<sup>98</sup> A simetria de paridade também é conhecida como simetria de direita esquerda. Esse princípio dizia que em toda a equação da Física, se trocássemos a coordenada de posição (x) por sua imagem especular (-x), a equação permaneceria inalterada [65, p. 198].

relacionadas ao fato do neutrino não ter massa, contudo, esta proposta ainda não foi confirmada [65]. Outros experimentos tentaram medir a massa dos neutrinos, verificando se o espectro do elétron no decaimento  $\beta$  possuiria um pequeno desvio caso a massa fosse nula. Com esse tipo de experiência resultaram os melhores limites superiores para a massa do neutrino, emitido no decaimento  $\beta$  estimada em dezenas de elétron-volts. Este tipo de experiência é extremamente delicado, pois até o movimento nuclear do elemento que está sofrendo decaimento  $\beta$  deve ser conhecido com muita precisão, às vezes limitando o próprio resultado que a experiência pode fornecer [66, p. 199]. Lee e Yang receberam o Prêmio Nobel de Física, em 1957, pelo seu trabalho sobre a violação da simetria de paridade.

Ao propor a existência do neutrino, é provável que Pauli não pudesse imaginar suas implicações. Ainda hoje existem perguntas sem respostas sobre essa partícula [65].

#### **5.24. Mais neutrinos, a Interação Fraca e a unificação**

A identificação de que o neutrino era a única partícula que interagia por meio da interação fraca, além da interação gravitacional que afeta todas as partículas, viabilizou o estudo dessas interações. Essa ideia foi sugerida, em 1956, pelo físico norte-americano Melvin Schwartz (1932-2006) que a realizou em parceria com os físicos norte-americanos Leo Lederman (1922- ), Jack Steinberger (1921- ). Schwartz sugeriu que fosse usado um feixe de neutrinos, produzido a partir de um feixe de píons resultantes da colisão de prótons com núcleos. Esse feixe seria freado por um anteparo, que provocaria o decaimento do feixe de píons, gerando o feixe de neutrinos. O objetivo dos físicos era identificar a colisão dos neutrinos com o detector, e verificar se eram produzidos múons ou elétrons. Contudo, apenas múons foram observados no detector, num processo similar ao processo beta ( $\beta$ ) inverso. Como resultado desse experimento, foram identificados dois tipos de neutrinos, o neutrino associado ao elétron, denominado *neutrino do elétron*, e representado por  $\nu_e$ , já detectado anteriormente (seção 5.20), e o neutrino associado ao múon, denominado *neutrino do múon*, e representado por  $\nu_\mu$  [65].

Schwartz, Lederman e Steinberger receberam o Prêmio Nobel de 1988, pelo trabalho na detecção do neutrino do múon. Assim, o elétron ( $e$ ) e seu neutrino ( $\nu_e$ ) foram classificados como integrantes da primeira geração de léptons, e o múon ( $\mu$ ) e seu neutrino ( $\nu_\mu$ ) como integrantes da segunda geração de léptons.

Considerando os experimentos realizados em 1956 pelo grupo de Schwartz, Lederman e Steinberger, Gell-Mann e Feynman, em 1958, incorporaram à teoria de Fermi os resultados sobre a violação de paridade e sobre a helicidade<sup>99</sup> dos neutrinos e elaboraram uma nova teoria que ficou conhecida como *Teoria V-A*<sup>100</sup>. Essa teoria descreve a probabilidade e ocorrência de interação fraca para o múon, o elétron e seus respectivos neutrinos. Com ela também foi possível calcular muitas propriedades das interações fracas, contudo ela se mostrou inadequada no limite de energias mais altas. Para a elaboração dessa teoria, como já ocorria experimentalmente, houve a colaboração de vários físicos, tais como: o norte-americano John A. Wheeler (1911-2008), o brasileiro Jayme Tiomno (1920-2011), o russo George Gamow (1904-1968), o húngaro Edward Teller (1908-2003), o russo Lev Davidovich Landau (1908-1968), o

---

<sup>99</sup> A helicidade é uma característica apresentada no decaimento  $\beta$ , segundo a qual existe uma correlação entre o momentum linear e o spin das partículas que participam de decaimento. Assim, se o momentum linear e o spin de uma partícula são paralelos e têm o mesmo sentido, a helicidade é positiva e tem valor igual a 1. Mas se o momentum linear e o spin têm valores opostos, a helicidade é negativa e tem valor igual a -1 [72, p. 257].

<sup>100</sup> Leia-se V menos A. Esse nome vem da distinção entre vetores polares e axiais [72, p. 259].

norte-americano Robert Eugene Marshak (1916-1992), o indiano Ennackal Chandy George Sudarshan (1931- ), o japonês J. J. Sakurai (1933-1982) e brasileiro José Leite Lopes (1918-2006) [72].

Essa teoria, além de universalizar a interação fraca, proporcionou alguns desdobramentos importantes, como a sugestão de Feynman e Gell-Mann sobre a possibilidade de que essa interação fosse mediada por *bósons virtuais*<sup>101</sup>, denominados por  $W^+$  e  $W^-$ . Ao ler esse trabalho, Leite Lopes sugeriu que esses bósons e os fótons deveriam pertencer à mesma família [6].

A proposta de que esses bósons teriam carga elétrica, estava embasada em resultados experimentais, que também demonstravam que eles deveriam ser partículas que possuíam uma massa muito grande, da ordem de cerca de 60 vezes a massa do próton. Assim, considerando esses resultados experimentais, Leite Lopes e os norte-americanos Julian Schwinger (1918-1994) e Sheldon Glashow (1932- ), por razões de simetria, apresentaram a proposta de partículas mediadoras massivas e sem carga elétrica, os bósons  $Z^0$  [72].

Assim, a unificação das forças eletromagnética e fraca, foi formalizada em 1967, pelo físico norte-americano Steven Weinberg (1933- ) e, independentemente, em 1968, pelo físico paquistanês Abdus Salam (1926-1996). Hoje é conhecida por *teoria eletrofraca*. Segundo essa teoria, a força eletrofraca é mediada por quatro bósons: o fóton e as partículas  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ . Essa unificação é baseada na *teoria de gauge*, proposta pelos físicos, o sino-norte-americano Chen Ning Yang (1922- ) e pelo norte-americano Robert Mills (1927-1999), em 1954, através de um mecanismo chamado de *quebra espontânea de simetria*<sup>102</sup>. Esse mecanismo é importante para essa unificação, pois a teoria de Yang-Mills não é renormalizável para bósons massivos [6, p. 99]. No entanto, os trabalhos de J. Goldstone (1961), P. W. Higgs (1964), F. Englert e R. Brout (1964), G. S. Guralnik, C. R. Hagen e T. W. B. Kibble (1964) mostraram que os bósons não-massivos de Yang-Mills, poderiam adquirir massa através daquele mecanismo (via o chamado *bóson de Higgs*, de spin 0), sem perder, contudo, o caráter de renormalizabilidade daqueles bósons. O bóson de Higgs, contudo, ainda não foi detectado [6, p. 100].

A unificação eletrofraca, além de acomodar as hipóteses e os resultados de experimentos, além de teorias fenomenológicas sobre as interações fracas, ao longo de 35 anos, sintetizou as leis que regem os fenômenos que envolviam as interações eletromagnéticas e fracas [72, p. 261].

*A unificação da teoria eletrofraca, assim como os trabalho de Newton (seção 3.2) corroboram a proposta de Galileu (seção 3.1) sobre a importância de um teoria unificada para a Física.*

## 5.25. Os quarks

Mesmo com o sucesso das ideias de Gell-Mann, a origem da estranheza só foi conhecida em 1961, após o trabalho desenvolvido por Gell-Mann e, independentemente, pelo físico israelense Yuval Ne'eman (1925- ), que desenvolvera um novo método de classificação das partículas até então conhecidas [40].

Tanto o conceito de spin isotópico, como o de estranheza, em 1956, causaram um grande impacto na Física, pois sugeriam que deveria existir uma ordem de classificação entre as partículas já detectadas e de previsão de existência de novas partículas [42].

<sup>101</sup> São partículas de spin inteiro para os quais vale a estatística de Bose-Einstein. Aos bósons não se aplica o princípio da exclusão de Pauli; não há, portanto, limite para o número de bósons que ocupam o mesmo nível de energia. A temperaturas muito baixas, os bósons podem formar o estado da matéria chamado de condensado de Bose [24, p. 29].

<sup>102</sup> Esse mecanismo é importante para essa unificação, pois a teoria de Yang-Mills não é renormalizável para bósons massivos [6].

No início da década de 1960, o físico norte-americano Robert Hofstadter (1915-1990) bombardeou núcleos atômicos com elétrons de alta energia, observando que, ao se chocarem com o núcleo, os elétrons eram espalhados, o que levou a propor que o núcleo teria uma estrutura. Experimento semelhante havia sido proposto por Rutherford (seção 5.8) quando ele concluiu que os átomos teriam uma determinada estrutura. O padrão de espalhamento detectado indicava a presença de centros de espalhamentos no interior dos núcleons; ou seja, os prótons e nêutrons que formavam o núcleo atômico eram compostos por estruturas menores, e assim deixavam de ser classificados como partículas elementares [35].

Após a construção dos aceleradores de partículas, na década de 1960, um grande número de novas partículas foi detectado; contudo, a maioria delas não foi considerada elementar. Tentando estabelecer uma ordem nesse caos, denominado por Oppenheimer de “zoológico subatômico”, Gell-Mann propôs uma nova forma de classificação, baseada na simetria entre as partículas. Para compreender essa classificação, toma-se como exemplo a análise feita para o próton e o nêutron. O próton e o nêutron são partículas muito parecidas, suas massas são praticamente iguais, possuem as mesmas propriedades com relação à interação forte, mas a interação eletromagnética consegue distingui-los, pois eles têm cargas elétricas diferentes. Essa é a única característica que impede de classificá-los como idênticos, mas mesmo assim pode-se dizer que eles têm uma simetria aproximada. Essas características os qualificaram a estarem juntos no mesmo grupo na classificação de Gell-Mann [40].

Em seu esquema de classificação das partículas, Gell-Mann classifica os hádrons em grupos com três, oito e dez “lugares”, matematicamente conhecidos como *tripletos*, *octetos* e *decupletos*. Os bárions e mésons conhecidos até 1961 encaixavam-se perfeitamente no *octeto*. Assim, esses grupos poderiam ser representados por meio de suas cargas elétricas e de sua estranheza [73].

A simetria utilizada por Gell-Mann para essa classificação é conhecida como  $SU(3)^{103}$ . Para Gell-Mann a “Via dos Oito Preceitos” (“*The Eightfold Way*”), nome atribuído por ele ao seu esquema de classificação das partículas, foi inspirado nos ensinamentos budistas:

“Essa é a nobre verdade que leva ao fim da dor, a nobre Via dos Oito Preceitos: visão correta, intenção correta, discurso correto, ação correta, esforço correto, pensamento correto, concentração correta.” [40, p. 86].

Como foi dito anteriormente, Ne’eman, independentemente de Gell-Mann, também chegou à conclusão de que os hádrons poderiam ser organizados em octetos de acordo com a simetria  $SU(3)$  [40]. Em 1962, novos hádrons foram identificados e classificados em decupletos. Contudo ainda faltava detectar uma partícula, denominada *ômega*, representada por  $\Omega$ ; o que ocorreu, em 1964, no laboratório *Brookhaven*, após a análise de fotografias tiradas de uma câmara de nuvens. Essa detecção corroborou o esquema de classificação de Gell-Mann e Ne’eman [40].

Percebeu-se que os octetos e os decupletos já haviam sido preenchidos, mas os tripletos ainda eram uma hipótese. Ne’eman havia percebido que os hádrons poderiam ser constituídos a partir de partículas pertencentes aos tripletos, contudo essas deveriam apresentar *carga elétrica fracionária* da carga do elétron e até esse momento tais partículas não haviam sido observadas na natureza [40].

---

<sup>103</sup> Essa simetria é responsável pela descrição da carga cor [74].

Gell-Mann, mesmo sem essa detecção usou o termo *quarks* para designá-las. Sua escolha se deu porque ao folhear o livro “*The Finnegans Wake*” (*O despertar de Finnegans*), do escritor irlandês James Joyce, que continha muitas palavras inventadas, leu: “*Tree quarks for Muster Mark!*”, cujo significado exato é desconhecido. É provável que pela frase se referir a três, como no tripleto, e por ter o som parecido com o da palavra escolhida anteriormente para designar essas partículas, *quirks*<sup>104</sup>, tenham influenciado sua escolha [75].

Segundo essa proposta, os bárions seriam compostos de três quarks, que apresentavam três *sabores*<sup>105</sup>, postulados por ele como *up* (*u*), *down* (*d*) e *estranho*<sup>106</sup> (*s*) e suas respectivas antipartículas. Assim, para que se forme um próton são necessários dois quarks up e um quark down (uud). Para um nêutron são necessários dois quarks down e um quark up (ddu). Os mésons seriam formados por um par *quark-antiquark*; por exemplo, um pión seria formado por um quark up e um antiquark down (u  $\bar{d}$ ) [6].

Paralelamente aos trabalhos de Gell-Mann, o físico norte-americano George Zweig (1937- ) desenvolveu um modelo semelhante, no qual os componentes dos tripletos foram denominados *aces* (do inglês, ases). Contudo, essa denominação não foi adotada [40].

Ao propor este modelo, Gell-Mann estava propondo apenas um modelo matemático para classificação de partículas. Contudo, após fazer essa proposta ele se deparou com a pergunta: os quarks eram reais ou entidades matemática? Gell-Mann nunca deu uma resposta direta a essa pergunta. Mas em duas ocasiões manifestou sua opinião sobre a busca que físicos experimentais faziam nos aceleradores de partículas. Em 1964, publicou um trabalho em que falava sobre esses experimentos:

“nos ajudaria a reafirmar a inexistência dos quarks reais.” [40, p. 88].

Ainda sobre esse assunto, Gell-Mann disse em uma entrevista concedida a uma rede de televisão:

“... há físicos procurando os quarks; está havendo um horrível mal-entendido, eu nunca disse que quarks existem.” [42, p. 226].

A resposta dessa pergunta foi reformulada em 1978, quando Gell-Mann passou a acreditar que os quarks existiam [42]. Em 1969, Gell-Mann recebeu o Prêmio Nobel de Física pelo seu trabalho de classificação das partículas.

No final da década de 1960, com os mesmos princípios propostos por Rutherford no início do século, quando identificou o núcleo atômico, buscava-se saber se o próton era uma partícula elementar ou não, como previsto na teoria de Gell-Mann. Assim, no *Stanford Linear Accelerator Collider (SLAC)* (*Acelerador Linear de Colisão de Stanford*), foram usados elétrons acelerados para investigar a estrutura do próton. Os resultados confirmaram a teoria dos quarks, pois foi detectado que os prótons eram compostos por três partículas e que essas apresentavam carga elétrica fracionária. Em 1968, quando Feynman visitava o *SLAC*, tomou conhecimento do resultado destes experimentos, o que levou a sugerir uma explicação teórica, na qual denominava de *pártons*, as partículas que compunham o próton [40].

<sup>104</sup> Em inglês esse termo significa algo peculiar, fora do comum.

<sup>105</sup> Algumas palavras, como sabor, quando usadas em Física de Partículas, não têm o mesmo significado que atribuímos no dia a dia; nesse caso, representa qualquer um dos números quânticos utilizados para distinguir os quarks [24].

<sup>106</sup> O quark estranho tem como símbolo a letra s porque sua denominação em inglês é *strange*.

Pouco tempo depois, os pártons propostos por Feynman foram identificados como os quarks propostos por Gell-Mann. Contudo, essas conclusões não foram aceitas imediatamente, pois como já foi dito anteriormente, por resistência do próprio Gell-Mann, que não tinha cogitado a hipótese de que os quarks seriam reais [40].

Mas uma dúvida ainda perturbava a comunidade científica: buscava-se saber por que não eram detectados quarks livres, ou seja, fora dos prótons. Para isso era necessário compreender que tipo de força agia dentro dos prótons, capaz de confiná-los. Era conhecido que os quarks tinham carga elétrica, logo, deveriam sentir a força elétrica, descrita pela Eletrodinâmica Quântica (QED) [40]. No entanto, a força elétrica era sobrepujada pela força investigada, então, provavelmente, estas partículas deveriam estar submetidas à *interação forte* (seção 5.17).

Devido a dificuldades apresentadas em relação a alguns hádrons e ao princípio da exclusão de Pauli, os físicos, o norte-americano Oscar Wallace Greenberg (1932- ), em 1964 e, independentemente, o coreano Moo-Young Han (1934- ) e norte-americano Yoichiro Nambu (1921- ), em 1965, apresentaram a proposta de um novo número quântico, a *cor*<sup>107</sup>. Assim, os três quarks foram caracterizados pelas três cores primárias, *vermelho*, *verde* e *azul*. E os antiquarks caracterizados pelas cores complementares desse mesmo espectro. Assim cada quark apresentava uma cor; contudo, os bárions foram apresentados “brancos”, pois para os bárions a soma deste número quântico era nula, por isso foram denominados “brancos” [6].

Com as pesquisas desenvolvidas, tanto os quarks como os léptons foram considerados elementares e importantes para a constituição da matéria. Assim, o conceito de simetria foi sendo adotado para essas partículas. Na década de 1960, já eram conhecidos quatro léptons ( $e$ ,  $\bar{\nu}_e$ ,  $\mu$ ,  $\bar{\nu}_\mu$ ) e apenas três quarks, o que sugeriu a existência de, pelo menos, mais um quark. Baseado neste conceito, um quarto quark foi proposto, em 1964, pelos físicos norte-americanos James Bjorken (1934- ) e Sheldon Glashow (1932- ), o *quark charme* ( $c$ ). [76]. A teoria do charme foi desenvolvida por Glashow, juntamente com os físicos, o grego John Iliopoulos (1940- ) e o italiano Luciano Maiani (1941- ), em 1970, e ficou conhecida como *teoria GIM*. Mas só começou a se fortalecer em 1974, quando os pesquisadores do *Stanford Positron-Electron Asymmetric Ring (SPEAR) (Anel Assimétrico de Colisão Elétron-Pósitron de Stanford)*, liderados pelo físico norte-americano Burton Richter (1931- ) e os pesquisadores do acelerador de prótons *Alternating Gradient Synchrotron (AGS) do Brookhaven National Laboratory*, liderados pelo físico sino-norte-americano Samuel Chao Chung Ting (1936- ) detectaram uma nova partícula denominada  $J/\Psi$  (*gionpsi*). Para explicar a distribuição de massa dessa partícula foi necessário considerar a proposta de Bjorken e Glashow sobre a existência do quark charme, pois essa partícula era composta por um quark charme e sua antipartícula ( $c \bar{c}$ ) [77]. Em 1976, Richter e Ting dividiram o Prêmio Nobel de Física pela detecção do quark charme.

*Confirmando o que foi dito anteriormente, os princípios de simetria mostram-se importantes no desenvolvimento da ciência.*

Ao adotar o número quântico cor, os físicos norte-americanos David Politzer (1949- ) e, independentemente, Frank Wilczek (1951- ) e David Gross (1941- ) elaboraram a teoria da *Cromodinâmica Quântica*<sup>108</sup> (QCD), teoria essa baseada na QED. Segundo a QCD, a interação forte entre os quarks seria mediada por partículas denominadas *glúons* (do inglês *glue*, cola). Essas partículas seriam as responsáveis

---

<sup>107</sup> Novamente, essa palavra tem outro significado quando abordada no contexto da Física de Partículas. Na Física de Partículas, a cor é uma propriedade dos quarks e glúons que, na Cromodinâmica Quântica (QCD), tem um papel análogo ao da carga elétrica [24, p. 52].

<sup>108</sup> Teoria que busca descrever a interação forte por meio das interações entre quarks, antiquarks e glúons [24].

pela cor dos quarks. Os glúons, assim como os fótons, são bósons e não apresentam massa. Contudo, existe apenas um tipo de fóton, já os glúons são oito, que são formados por pares cor-anticor [6]. Assim, um quark ao emitir ou absorver um glúon, muda de *cor* e não de *sabor*. Por outro lado, para que os quarks se mantenham sempre juntos sem violar o Princípio de Exclusão de Pauli, deverão constantemente trocar glúons entre si, a fim de mudarem de cor. Por exemplo, um quark vermelho para se transformar em azul, emite um glúon vermelho-amarelo, pois o amarelo é o antiazul [6, p. 118].

### 5.26. Mais um lépton

Como já foi dito anteriormente, o grupo dos léptons era formado pelo elétron ( $e$ ), neutrino de elétron ( $\bar{\nu}_e$ ), múon ( $\mu$ ), neutrino do múon ( $\bar{\nu}_\mu$ ). Até 1975, imaginava-se que a simetria quatro léptons quatro quarks explicaria a origem de toda a matéria que compõe o Universo. Contudo, em 1975, surgiram indícios de que essa simetria poderia ser quebrada, em um experimento realizado no *SPEAR*, em Stanford, em que o físico norte-americano Martin Perl (1927- ) analisou a colisão elétron-pósitron, e detectou a produção anômala de elétrons e múons, devido ao decaimento de uma nova partícula. Essa nova partícula foi identificada como um lépton, e denominado *tau* ( $\tau$ ) (referindo-se a *triton*, terceiro em grego) [6]. Devido a essa identificação, Perl dividiu o Prêmio Nobel de Física de 1995 com Reines (seção 5.20).

Com já foi dito anteriormente (seção 5. 24), os léptons apresentam-se em duplas, compostas por uma partícula e seu respectivo neutrino. Para o *tau* não se esperava nada diferente, assim era só uma questão de tempo a detecção do *neutrino do tau*. O *tau* também introduziu a terceira geração de léptons. A detecção dessa partícula causou a quebra da simetria entre léptons e quarks e gerou uma busca por novos quarks e pelo neutrino do tau.

### 5.27. Mais quarks

A primeira evidência da existência de mais um quark foi detectada em um experimento realizado no *Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab)*, em 1977. O grupo era liderado por Lederman e o experimento consistiu na colisão de um próton com um núcleo de cobre (Cu) ou de chumbo (Pb), que resultou em dois múons ( $\mu, \mu^+$ ) e mais “alguma coisa”. Essa partícula desconhecida seria formada por um novo par quark/antiquark, respectivamente denominados de *bottom* ( $b$ ) e *antibottom* ( $\bar{b}$ ) [6].

A identificação do quark bottom confirmou a existência de uma terceira geração de quarks, assim como também previu a existência de mais um quark, o *quark top* ( $t$ ) [78].

Quando o *quark bottom* foi detectado, foi possível prever características para o quark top: os pesquisadores já sabiam que esse novo quark deveria ter uma massa muito grande, da ordem de 30 a 60 GeV [6], o que corresponde a, aproximadamente, um átomo inteiro de ouro (Au). Essa partícula só teria existido, em condições naturais, na época do *Big Bang*. Devido ao resfriamento do Universo ela teria deixado de existir. Atualmente, para detectá-la, são utilizados aceleradores de partículas. Na década de 1980, quando a busca pelo *quark top* havia começado, o único acelerador capaz de atingir a energia necessária para recriá-la (2 TeV) era o *Tevatron*, do *Fermilab*. O *Tevatron* é um acelerador subterrâneo de 6 km de diâmetro. Acoplado a ele existem dois detectores, o *Collider Detector at Fermilab* (CDF) e o *DZero*, esse instalado em 1992 [76]. Em um experimento onde um próton e um antipróton colidiram foi detectado o quark top, em 1994. Esse experimento foi realizado com a colaboração de um grande número de cientistas de vários países, inclusive do Brasil, esse representado pelo físico



Alberto Santoro, da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), que atuava no detector *DZero* [79].

### **5.28. A confirmação dos bósons**

Os bósons  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  foram detectados em 1983, no *European Organization for Nuclear Research (CERN) (Organização Européia para Pesquisa Nuclear)*, pelo grupo do físico italiano Carlo Rubbia (1934- ), e do engenheiro holandês Simon van der Meer (1925- ) ao estudarem a aniquilação próton-antipróton, no *Super Proton Synchrotron (SPS) (Super Síncrotron de Prótons)* [76]. Alguns anos antes, em 1979, surgiu a primeira evidência sobre a existência dos glúons<sup>109</sup> por meio da aniquilação elétron-pósitron [6].

### **5.29. E no final do século XX**

Para Bachelard, o ano de 1905 foi o início da era do novo espírito científico. Ao propor a Teoria da Relatividade, Einstein provocou uma revisão em conceitos tidos como verdades absolutas para a Física. Assim como Einstein, outros físicos também lançaram propostas ousadas para o pensamento científico vigente no início do século XX, como a proposta do quantum, feita por Planck, que também provocou uma mudança nas bases das teorias vigentes. A abstração tomou conta da Física e obrigou os cientistas a desenvolverem novas habilidades para compreenderem a “nova Física” que surgia [45].

Para desenvolver estas novas habilidades, Bachelard propôs que seria um equivoco considerar o conhecimento comum e as generalizações. Segundo sua proposta, a “nova Física” criaria novas situações que não estão disponíveis na natureza. Isso poderia acontecer por meio de um experimento ou pelo uso da Matemática [1].

Assim, a “nova Física” foi analisada por meio de uma base filosófica dialética e plural, na qual racionalismo e empirismo são complementares [1].

Para isso Bachelard, empregou um empirismo técnico, que vê o que a experiência é capaz de criar; ou seja, recomeçar dentro do laboratório. Assim, como o empirismo que, a priori, estabelece hipóteses que não necessariamente foram experimentadas, mas que nem por isso são, de imediato, refutadas. A geometrização e a matematização do racionalismo são responsáveis por definir a extensão de um fenômeno, e, a posteriori, criam-se situações experimentais dessas hipóteses, que extrapolam o limite da natureza [1, p. 12].

Dessa forma, Melo [1] cita Bachelard sobre o emprego de uma filosofia dialética e plural:

“... percebe-se que o realismo e o racionalismo permutam sem fim seus pareceres. Nem um nem outro isoladamente é suficiente para construir a prova científica; no reino das ciências físicas, não há lugar para uma intuição do fenômeno que revelasse de uma só vez os fundamentos do real; tampouco há lugar para a convicção racional-absoluta e definitiva – que impusesse categorias fundamentais aos nossos métodos de pesquisas experimentais. Existe aí uma razão de novidade metodológica que teremos à luz; as relações entre a teoria e a experiência são de tal modo estreitas que nenhum método, seja experimental seja racional, está seguro de manter seu valor. Pode-se mesmo ir mais longe: um método excelente termina por perder sua fecundidade se não se renova seu objeto.” [80, p. 12].

---

<sup>109</sup> Partículas mediadoras da interação forte.

*Podemos perceber que o novo espírito científico exige um olhar diferente para a ciência; Bachelard propõe um complemento muito importante para esse novo olhar que a ciência necessita, denominando-o fenomenotécnica. As mudanças ocorridas na Física do século XX também estão refletidas nos seus experimentos. Anteriormente, esperava-se que a natureza fornecesse os fenômenos a serem observados; atualmente a ciência reconstrói as condições naturais, utilizando-se de ferramentas instrumentais e técnicas. E é nesses momentos que se verifica o diálogo entre a razão e a experiência [19].*

*Um exemplo deste tipo de análise pode ser visto nas investigações sobre Física de Partículas, na qual o objeto científico, a partícula a ser detectada, é criada por meio da técnica, em um acelerador de partículas. A análise de um experimento deste tipo necessita de um diálogo constante entre teoria e experiência. Assim, a proposta de análise feita por Bachelard permaneceu atual, pois a teoria é materializada por meio dos experimentos [19].*

*Outro ponto importante da epistemologia de Bachelard, os chamados períodos de rupturas e descontinuidades, também são bem retratados no início do século XX, principalmente quando são abordados pontos polêmicos para a ciência da época, como a proposta do quantum ou as propostas dos modelos atômicos. Segundo Lopes [7], a marca central da filosofia de Bachelard é o eterno recomeçar. Segundo Bachelard as rupturas e descontinuidades são características fundamentais para a evolução da ciência. Essa proposta é oposta a noção de que o conhecimento é elaborado de forma cumulativa e contínua.*

*Segundo Lopes [7], essas rupturas também devem se estender para a relação entre conhecimento comum e conhecimento científico. Erroneamente, muitas vezes a escola tenta relacioná-los, mascarando a ruptura entre eles. Esse tipo de atitude gera a vulgarização do conhecimento científico, pois o aluno pode interpretá-la como um simples refinamento do conhecimento comum. Essa proposta na filosofia de Bachelard é conhecida como a filosofia do não.*

*Existem momentos históricos em que essas transições são mais explícitas, como as primeiras ideias que impulsionaram a Mecânica Quântica. Ao propor que matéria e energia poderiam ser quantizadas, Planck mostrou as limitações da teoria mais aceita naquele momento, a física newtoniana, deixando claro que essa antiga teoria poderia explicar apenas um Universo restrito de fenômenos [1].*

*A mesma ideia vale quando pretendemos analisar a matéria por meio da física newtoniana. Percebemos que seu alcance é limitado, pois só podemos falar sobre suas características macroscópicas. Mas como estamos falando sobre Física de Partículas, nossa análise seria muito mais eficiente feita com o auxílio da Mecânica Quântica; afinal, ela se propõe a investigar a matéria em nível microscópico, nível esse restrito por nossos sentidos.*

*Assim, percebe-se que a transição entre a física newtoniana e a Mecânica Quântica apresenta-se como um exemplo de ruptura na filosofia de Bachelard [1].*

*Outro aspecto importante desta proposta de Bachelard pode ser compreendido por meio da análise dos diferentes modelos atômicos do início do século; percebe-se que, ao elaborar um novo modelo, o anterior não era completamente ignorado, pelo contrário, eles eram aperfeiçoados. Assim, não negavam sua importância, mas corrigiam suas falhas. Confirmando o que Bachelard dizia sobre a evolução do conhecimento científico, para que ocorra evolução do conhecimento científico, a nova proposta/experiência nega a anterior, mas não a rejeita [7]. Segundo suas próprias palavras:*

*“(...) as crises de crescimento do pensamento implicam uma reorganização total do sistema de saber. A cabeça bem feita deve ser refeita. Ela muda de espécie. Opõe-se a espécie anterior por uma função decisiva. Pelas revoluções espirituais que a invenção científica exige, o homem torna-se uma espécie mutante, ou melhor dizendo, uma espécie que tem necessidade de mudar, que sofre se não mudar. (...) Se considerarmos, por exemplo, a modificação psíquica que se verifica com a compreensão de doutrina como a Relatividade ou a da Mecânica Ondulatória, talvez não achemos tais expressões exageradas...”. [45, p. 20].*

*Assim, as rupturas são importantes para a evolução do conhecimento científico e o que gera essas rupturas também contribui para essa evolução. Dessa forma, Bachelard considera o erro como um aspecto positivo desse processo, pois é por meio da retificação dos erros que a ciência avança [7].*

*A interpretação de Bachelard sobre o erro nos leva a um aspecto muito importante para que possamos compreender a evolução da ciência; transmite a ideia de transitoriedade das teorias científicas. Assim citando Lopes [7]:*

*“Não podemos mais nos referir à **verdade**, instância que se alcança em definitivo, mas apenas às **verdades**, múltiplas, históricas, pertencentes à esfera de **veridicidade**, da capacidade de gerar credibilidade e confiança. As verdades só adquirem sentido ao fim de uma polêmica, após a retificação dos erros primeiros.” [7, p. 253].*

*As “verdades científicas” devem ser relacionadas aos seus momentos históricos e interpretadas como transitórias e provisórias. Um exemplo dessa transitoriedade são os diferentes modelos atômicos propostos no início do século XX. Cada um deles teve sua validade que variou com o avanço dos métodos científicos, demonstrando que as teorias são provisórias e não faz sentido tentar caracterizar um modelo como certo ou como errado, mas sim como provisório. Desta forma, o pensamento científico é caracterizado como sendo constantemente renovado.*

*Esta constante renovação do conhecimento deve ficar muito clara para os estudantes. Colocar as teorias científicas em constante movimento é fundamental para que os estudantes possam compreender as constantes renovações que ocorrem na ciência. Assim como é importante que percebam o seu papel nas mudanças que ocorrem no mundo, identificando-se como agentes na transformação e não como meros espectadores [7].*

*A renovação do pensamento científico também pode ser constatada na noção de recorrência histórica de Bachelard. Segundo essa proposta a história da ciência deve ser constantemente refeita e analisada à luz da história atual [7]. Por estas ideias, Bachelard é conhecido como o filósofo da desilusão, pois, segundo ele, somos fruto de constantes retificações do que julgávamos saber.*

*Ao mesmo tempo em que Bachelard considera alguns erros como positivos para a evolução do conhecimento científico, ele também propõe que alguns erros devam ser combatidos. Esses são os denominados obstáculos epistemológicos.*

*Os obstáculos epistemológicos são os responsáveis pela estagnação do pensamento científico. Eles podem ser de ordens diversas, como uma construção da própria natureza humana ou podem ter causas sociais.*

Segundo Melo [1], para Bachelard os obstáculos a serem superados são: a experiência primeira, o conhecimento geral, o obstáculo verbal, o obstáculo animista e o conhecimento utilitário e pragmático.

A experiência primeira está ligada ao concreto, ao natural. Apresenta-se repleta de imagens, e, em um primeiro momento, parece que a compreendemos. No entanto, esta primeira observação deve ser interpretada como provisória, pois, segundo Bachelard [45] não existe uma continuidade entre a observação e a experimentação. A observação é apenas um estágio do avanço científico.

Um exemplo de como a experiência primeira pode ser um obstáculo para a compreensão de um fenômeno foi a detecção dos raios X. Esse fenômeno foi tratado, inicialmente, como um espetáculo. As demonstrações tinham como objetivo apenas atrair a atenção do público, e a explicação científica do fenômeno ficou em segundo plano.

Quanto ao conhecimento geral, Bachelard relata que esse obstáculo surge da ação de um pesquisador precipitado, em relatar conclusões e chegar a uma lei científica geral. Contudo, a Física Contemporânea está baseada no conhecimento específico; que na filosofia de Bachelard caracteriza a solidez do conhecimento atual.

O obstáculo verbal, relatado por Bachelard refere-se ao uso de imagens familiares, que acabam por refletir o pensamento no seu estágio inicial; assim como o uso de metáforas para a descrição de uma observação. Ambos podem dificultar a visão abstrata de um fenômeno, reforçando que todas as situações devem ser analisadas por meio de imagens concretas. Um exemplo dessa situação é o ensino da Física Contemporânea, particularmente a Física de Partículas. Os componentes de estudos nesta área da Física não são observáveis pelos nossos sentidos, dessa forma é mais conveniente propor aos estudantes que elaborem uma visão abstrata daquele componente; ao descrevermos uma partícula elementar não é necessário dizer que ela é uma “bolinha”, podemos propor uma abstração, como uma membrana, como considerado na teoria das cordas.

Além disso, o conceito de partícula elementar mudou muito desde a Grécia antiga; o número de pesquisadores, o compartilhamento do conhecimento, o avanço tecnológico, todos foram fatores decisivos para esta mudança. A mudança primordial diz respeito a interpretar os átomos como pequenos corpos sólidos, pois uma das características mais importantes dessa interpretação era o conceito de indivisibilidade, que já não existe, pois o átomo é divisível [44].

Segundo Moreira [73], a teoria atômica tem como característica “coisificar” conceitos como o conceito de átomo, por exemplo. Essa “coisificação” nos induz a associar uma imagem para o conceito, o que não é adequado ao falarmos de partículas elementares. Não podemos descrever o que não podemos ver, e, além disso, ao adotarmos uma representação para uma partícula podemos dificultar a compreensão de sua natureza. Desta forma, para compreendermos o mundo das partículas elementares precisamos negar as representações clássicas, pois isso só dificultará a compreensão do seu caráter quântico.

Outro exemplo das dificuldades que se podem gerar com o uso excessivo de imagens, metáforas ou analogias é relacionar o modelo atômico de Rutherford ao sistema planetário. As escalas dos dois entes relacionados, o átomo e o sistema planetário, são incompatíveis. Enquanto utilizamos uma escala microscópica para analisar o átomo, utilizamos uma escala macroscópica para a análise do sistema planetário. Isso pode induzir ao erro, pois o estudante tentará relacionar as características presentes no sistema macroscópico com as características do sistema microscópico.

Contudo, Bachelard não veta a utilização de metáforas e imagens. Sugere que devemos avaliar os momentos em que é possível fazer o uso ou não das metáforas e analogias no ensino de ciências. Essas metáforas ou imagens devem ser interpretadas pelo estudante como uma mera representação, que pode ser desconstruída ao longo do processo de aquisição do conhecimento [7].

Outro obstáculo relatado por Bachelard, mas não tão presente no século XX, é o obstáculo animista. O animismo atribui a objetos um princípio vital. Isso foi mais comum nos primeiros estudos sobre Eletricidade e Magnetismo.

O conhecimento unitário e pragmático é relatado por Bachelard como a resistência ao dinamismo e a complexidade do pensamento. Como ilustração, pode-se citar a dificuldade na aceitação de uma proposta como a da natureza dual dos elétrons e da luz.

Ao alertar-nos sobre estes aspectos, Bachelard invoca a necessidade de estarmos atentos, de identificar e superar tais obstáculos epistemológicos, caso contrário, pode haver a estagnação do conhecimento científico.

O ponto central da filosofia de Bachelard, a constante renovação do conhecimento, é a característica principal da Física Contemporânea, em especial da Física de Partículas. Suas constantes reflexões e renovações demonstram como o conhecimento científico foi se desenvolvendo ao longo do tempo, com isso ressaltando o caráter mutável e plural do conhecimento científico [7].

No final do século XX, a Física de Partículas apresenta uma das maiores sínteses sobre as partículas e suas interações, o Modelo Padrão. Dele fazem parte os léptons e quarks, e as interações fundamentais (interação forte, fraca, gravitacional e eletromagnética). Contudo, o modelo ainda não está completo, o neutrino do tau, um lépton, ainda não foi detectado. Ainda existem algumas perguntas não respondidas, por exemplo, se o Modelo Padrão preza pela simetria entre seus componentes, porque existe mais matéria do que antimatéria no Universo?; E quanto à massa das partículas elementares, porque algumas partículas têm massa e outras não?. Segundo Bachelard, são essas as hipóteses que promovem a evolução do conhecimento científico. E é assim que o século XXI começa, com a busca por respostas para estas perguntas.

## 6. Século XXI

O século XXI tem como metas compreender muitas das hipóteses lançadas no século XX. Espera-se detectar o bóson de Higgs e o gráviton. Compreender e talvez expandir o Modelo Padrão. Para isso a ciência e a tecnologia tiveram um desenvolvimento jamais visto em qualquer época. O Large Hadron Collider (LHC) (Grande Colisor de Hádrons) é o maior empreendimento já construído pelo homem. Espera-se que ele nos forneça as respostas necessárias para entendermos o Universo, mas também que ele nos proponha novas perguntas.

### 6.1. Mais um lépton

O neutrino do tau ( $\nu_\tau$ ), também foi detectado por pesquisadores do Fermilab em 2000. Para isso foi usado um feixe intenso passando por um alvo de 15 m de comprimento, feito de placas de ferro (Fe) e camadas de emulsão adequadas aos registros dessas interações; o aparato foi chamado *Direct Observation of the Nu Tau* (DONUT). Apenas um neutrino, de um trilhão deles, interage com um núcleo de ferro (Fe) e se transforma em um tau que vive só 300 femtosegundos ( $300 \times 10^{-15}$ s), deixando registrado na emulsão um minúsculo rastro de um milímetro, mas suficiente para garantir a existência da partícula. O DONUT registrou seis milhões de eventos, dos

quais mil foram selecionados pelos computadores – 4 deles exibiam evidências concretas da existência do *neutrino do tau* [76, p. 43].

## 6.2. O Modelo Padrão

O Modelo Padrão é a teoria atual capaz de explicar a natureza da matéria. Para isso ele agrega as partículas elementares e suas interações fundamentais, itens que veremos a seguir.

### 6.2.1. As partículas fundamentais

O Modelo Padrão começou a ser discutido na década de 1960 e vem sendo implementado até os dias de hoje [81]. Essa teoria é a responsável por explicar a natureza da matéria; segundo Moreira [82], o físico Gordon Kane a considera como uma das melhores teorias já elaboradas:

“...o Modelo Padrão é, na história, a mais sofisticada teoria matemática sobre a natureza. Apesar da palavra ‘modelo’ em seu nome, o Modelo Padrão é uma teoria compreensiva que identifica as partículas básicas e especifica como interagem. Tudo o que acontece em nosso mundo (exceto os efeitos da gravidade) resulta das partículas do Modelo Padrão interagindo de acordo com suas regras e equações.” [83, p. 1].

Segundo esta teoria, os *quarks* e *léptons*, são as partículas elementares constituintes da matéria, pois não possuem estrutura interna. Temos seis quarks e seis léptons, seguindo as já comentadas regras de simetria. Os *quarks* são: *up* (*u*), *down* (*d*), *estranho* (*s*), *charme* (*c*), *bottom* (*b*) e *top* (*t*). Como foi dito anteriormente, toda partícula tem sua antipartícula, assim todos os *quarks* tem *antiquarks*. Essas são as partículas responsáveis pela estrutura dos *hádrons*, que podem ser de dois tipos: os *bárions*, formados por *três quarks* ou *três antiquarks*; e os *mésons*, formados por *um quark* e *um antiquark*. *Quarks* também apresentam uma propriedade, já comentada anteriormente, a *cor*. Cada *quark* pode ter três cores diferentes: *vermelho*, *verde* e *azul* [82]. Assim, cada um dos seis *quarks* pode se apresentar em cada uma das três cores, o que faz com que eles sejam dezoito *quarks* (seis *quarks* x três cores) e, como foi dito anteriormente, para cada uma dessas partículas está associada uma antipartícula, ou seja, os quarks são, ao todo, trinta e seis. Os *léptons* são: *elétron* (*e*), *neutrino do elétron* ( $\nu_e$ ), *múon* ( $\mu$ ), *neutrino do múon* ( $\nu_\mu$ ), *tau* ( $\tau$ ) e *neutrino do tau* ( $\nu_\tau$ ). Existem seis *léptons* e mais seis antipartículas, ou seja, ao total os léptons são doze. Assim, as partículas elementares do Modelo Padrão são trinta e seis *quarks* e doze *léptons*. Abaixo temos duas tabelas, uma com características dos quarks (Tabela 1) e a outra com as características dos léptons (Tabela 2).

Sabor	Símbolo	Massa de repouso (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga (q)	Antiquark
Up	u	5	+2/3	$\bar{u}$
Down	d	10	-1/3	$\bar{d}$
Charme	c	1500	+2/3	$\bar{c}$
Estranho	s	150	-1/3	$\bar{s}$
Top	t	174000	+2/3	$\bar{t}$
Bottom	b	4700	-1/3	$\bar{b}$

Tabela 1: Os quarks<sup>110</sup> e suas propriedades.

Fonte: [84]

<sup>110</sup> Todos os quarks e antiquarks têm spin  $\frac{1}{2}$  e, portanto, são férmions.

Família	Partícula	Símbolo	Massa de repouso (MeV/c <sup>2</sup> )	Carga (q)	Antipartícula
Elétron	Elétron	e <sup>-</sup>	0,511	-1	e <sup>+</sup>
	Neutrino do elétron	ν <sub>e</sub>	0	0	$\bar{\nu}_e$
Múon	Múon	μ <sup>-</sup>	107	-1	μ <sup>+</sup>
	Neutrino do múon	ν <sub>μ</sub>	0	0	$\bar{\nu}_\mu$
Tau	Tau	τ <sup>-</sup>	1777	-1	τ <sup>+</sup>
	Neutrino do tau	ν <sub>τ</sub>	<70	0	$\bar{\nu}_\tau$

Tabela 2: os léptons<sup>111</sup> e suas propriedades.

Fonte: [84]

### 6.2.2. As interações fundamentais

As interações entre as partículas elementares ocorrem devido às quatro interações fundamentais: *forte*, *fraca*, *gravitacional* e *eletromagnética*. Cada uma delas é devida a uma propriedade fundamental da matéria: a *interação forte* é devida à *cor*, a *fraca* devida à *carga fraca*, a *gravitacional* à *massa* e a *eletromagnética* à *carga elétrica* [82]. Cada interação tem sua partícula mediadora, que pode não ter massa, mas tem energia<sup>112</sup>, ou seja, são pulsos de energia e por isso são chamadas de *partículas virtuais* [82, p. 2]. A função dessas partículas é mediar a interação, o que significa que a interação existente entre as partículas interagentes do processo resulta de uma “troca” (emissão e absorção) das partículas virtuais [85]. Assim, a partícula mediadora da *interação forte* é o *glúon*, descrito pela Cromodinâmica Quântica (QCD); a da *interação fraca* são as *partículas Z e W*, da *gravidade*, possivelmente o *gráviton* e da *interação eletromagnética*, os *fótons*.

Aqui surge uma partícula mediadora que ainda não havia sido discutida: o *gráviton*. Se toda interação fundamental tem uma partícula mediadora, então a *interação gravitacional*, também deve ter a sua, que foi chamada de *gráviton*. Contudo, o *gráviton* ainda não foi detectado, apesar de ser previsto pelo Modelo Padrão. Este fato faz lembrar a proposta do *pósitron* feito por Dirac, que foi previsto teoricamente e, anos mais tarde, foi detectado, assim como outras partículas.

A seguir discutiremos um pouco sobre cada uma das interações fundamentais e suas respectivas partículas mediadoras, iniciando pela interação gravitacional.

A interação gravitacional foi descrita por Newton, em 1687, e diz que todos os corpos que possuem massa atraem-se mutuamente, e essa atração diminui sua intensidade quanto maior for a distância entre esses corpos. Essa é a força responsável pelo movimento dos corpos celestes no Universo. Contudo, tem pouca relevância quando tratamos de Física de Partículas, pois a intensidade dessa interação para as partículas elementares é muito fraca [84]. Mas, a interação gravitacional não está descrita como as demais interações do Modelo Padrão. Apesar da previsão do *gráviton*, ele ainda não foi detectado, nem a descrição quântica da gravidade foi feita. Este é um dos problemas do Modelo Padrão.

A *interação eletromagnética* é descrita pela Eletrodinâmica Quântica (QED), que foi desenvolvida a partir da década de 1940. Essa interação gerada pela carga elétrica que os corpos possuem. Ela é a responsável pela formação dos átomos e pelas ligações moleculares. Assim como a *interação gravitacional*, a *interação eletromagnética* é de longo alcance. Sua intensidade depende da carga elétrica das

<sup>111</sup> Assim como os quarks, os léptons também têm spin ½ e também são férmions.

<sup>112</sup> Isso pode ser explicado pela relação E=mc<sup>2</sup>, que expressa uma equivalência entre massa e energia.

partículas envolvidas e da distância entre elas [84]. Como já foi dito, sua partícula mediadora é o *fóton*. Assim, considerando uma carga elétrica qualquer, ela gera um campo eletromagnético e interage com ele por meio da emissão e absorção de *fótons*. Segundo Menezes [86], podemos interpretar a carga elétrica como uma permanente fonte e sorvedouro de *fótons*. Feynman, por meio dos chamados *diagramas de Feynman* representou essas interações entre partículas e campos.

Tanto a interação gravitacional como a eletromagnética fazem parte do mundo macroscópico, e podem ser sentidas na escala humana [74].

A *interação fraca* é a responsável pelos decaimentos radioativos. Ela recebeu esta denominação devido à comparação com a intensidade da interação forte. Suas partículas mediadoras são os *bósons*  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ . Estas partículas têm uma massa muito grande (aproximadamente cem vezes maior que a massa do próton) o que limita o raio de ação dessa interação. Para saber se um processo envolve a interação fraca, basta procurar um *neutrino*. Eles são afetados apenas por essa interação fundamental, pois se possuírem massa ela seria muito pequena para sofrer a interação gravitacional, e como não tem carga elétrica não sofrem força eletromagnética. De um modo geral, os *léptons* e *hádrons* participam da interação fraca [74]. Como já foi dito, a interação fraca é a responsável pelos decaimentos radioativos, como o decaimento beta ( $\beta$ ) e pela transmutação de uma partícula em outra, como os quarks, que tem a propriedade de mudar seu sabor [84].

As interações eletromagnética e fraca foram unificadas e descritas pela *teoria eletrofraca*, conforme comentado anteriormente (seção 5.24). Essa descrição mostrou que mesmo essas interações apresentando características tão diferentes tem uma origem comum [74].

A *interação forte* é descrita pela Cromodinâmica Quântica (QCD), teoria essa que vem sendo elaborada desde 1973 e ainda apresenta desafios estimulantes para os físicos teóricos [74]. Como seu nome já sugere, ela é a mais intensa das quatro interações fundamentais [85]. Ela é a responsável pela coesão nuclear, ou seja, mantém prótons e nêutrons juntos no núcleo e também é a responsável pela união dos *quarks* dentro dos *hádrons*. Assim, ela afeta principalmente os *hádrons* [84]. Suas partículas mediadoras são os glúons, em número de oito [76]. Ela pode ser dividida em duas: a interação forte fundamental e a interação forte residual. A interação forte fundamental atua entre os *quarks* e a *carga cor* [85]. A interação forte residual ocorre de balanços imperfeitos das atrações e repulsões entre os quarks que constituem os *hádrons* [82, p. 2], através de troca de *mésons* [85].

Assim, de uma forma geral, as interações se dão via troca de partículas mediadoras, essas partículas também conhecidas como *bósons*, ou *bósons virtuais* ou ainda *partículas virtuais*. A ideia precursora na mudança de interpretação sobre esse conceito foi sugerida por Yukawa (seção 5.17), quando propôs tal interpretação para a interação forte. Segundo Menezes [86], podemos imaginar essas interações como se as partículas envolvidas fossem jogadores de vôlei, cada um no seu lado da quadra, e a partícula mediadora seria a bola de vôlei, que é jogada/trocada entre as partículas.

As interações que foram descritas acontecem em um *campo de força*. Os *quanta* desses campos são as partículas mediadoras das interações correspondentes; assim, o *fóton* é o *quantum* do *campo eletromagnético*; os *glúons*, do *campo forte*; as *partículas W e Z* do *campo fraco*; e o *gráviton*, do *campo gravitacional* [85].



### 6.3. O futuro

Mesmo com o aparente sucesso do Modelo Padrão, ele ainda não respondeu a algumas perguntas, tais como: por que as partículas têm massa numa certa hierarquia? Qual seria o mecanismo que privilegia a matéria suprimindo a antimatéria? Como incluir a força gravitacional de forma a atribuir o status de partícula ao *quantum* da interação gravitacional (*gráviton*)? Seriam as quatro interações da natureza simplesmente aspectos diferentes da mesma realidade? [76, p. 44].

A seguir, faremos alguns comentários sobre o que se espera para o futuro da Física de Partículas.

#### 6.3.1. O bóson de Higgs

O *bóson de Higgs* é uma partícula prevista teoricamente, em 1964, pelo físico inglês Peter Higgs (1929- ) e usada, posteriormente, em 1967, por Weinberg e, em 1968, por Salam (seção 5.24) para explicar porque outras partículas, os *bósons W e Z*, têm massa [82, p.5]. Esta proposta tenta resolver a contradição encontrada na teoria eletrofraca, na qual as partículas mediadoras não tinham reciprocidade em termos de massa, pois o *fóton* não apresentava massa, já as *partículas Z e W* são muito massivas. Assim, a teoria supõe que o *bóson de Higgs* seria a partícula responsável pela massa das demais partículas [87].

Assim, considera-se que o *bóson de Higgs* seria o *quantum* do *campo de Higgs*, e esse campo permearia toda a realidade. Com a detecção dessa partícula imagina-se que o Modelo Padrão será completado e ampliado [87].

Segundo esta proposta, a massa das partículas elementares é adquirida pela interação dessas com o *campo de Higgs*. O *campo de Higgs* é um campo quântico, assim como os descritos anteriormente, contudo, esse campo apresenta algumas peculiaridades, mas que fogem dos objetivos desse texto. Recomenda-se a leitura dos artigos das referências [76], [82] e [87].

Contudo, ainda existem muitas perguntas sobre o *campo de Higgs* e o seu bóson. O Modelo Padrão propõe apenas um *campo de Higgs*, mas alguns físicos não rejeitam a possibilidade de existir mais de um. Também se acredita que o Modelo Padrão possa ser estendido, e a teoria que é uma forte candidata é o *Modelo Padrão Supersimétrico (SSMs)*, cuja descrição será feita na seção seguinte (6.3.2). O modelo prevê que são necessários dois *campos de Higgs* para explicar como as partículas pertencentes ao Modelo Padrão e uma parte das partículas do *SSMs* adquirem massa. Considerando esta teoria, dois *campos de Higgs* surgirão com cinco tipos de *bósons de Higgs* (três eletricamente neutros e dois carregados) [87].

Você deve estar se perguntando, mas o que leva os físicos a acreditarem nisso? Sem as interações com o *campo de Higgs*, os *bósons Z e W* não teriam massa, e as interações fraca e eletromagnética teriam a mesma intensidade. Assim, a rejeição dessa teoria não seria uma escolha adequada, pois o Modelo Padrão e suas previsões vêm sendo confirmados há muito tempo e não seria fácil rejeitar uma teoria, ou parte dela, com tantas confirmações. Os cientistas reconhecem que esse é um mecanismo eficiente para explicar a massa de todas as partículas do Modelo Padrão, também concordam que o *SSMs* oferece uma teoria capaz de unificar a compreensão das interações fundamentais [87].

A proposta de unificação das leis da Física vem sendo feita desde o século XVII, com Galileu Galilei (seção 3.1). Foi concretizada parcialmente por Newton (seção 3.2), quando propôs a Lei da Gravitação Universal (1687), por Maxwell (ver 4.16) quando elaborou a Teoria Eletromagnética (1861) e mais recentemente por Weinberg (1967) e Salam (1968) – seção 5.24 – quando elaboraram a Teoria Eletrofraca. Contudo, ainda

não foi atingida a meta de reunir as quatro interações fundamentais, considerada condição fundamental pelos cientistas, para o êxito de uma teoria capaz de explicar a constituição da matéria.

A procura pelo bóson de Higgs está sendo feita no *Tevatron* do *FermiLab* assim como no *LHC* do *CERN* quando ele entrar em operação novamente [88]. A escolha desses dois aceleradores se deu porque eles operam no intervalo de energia esperado para essas partículas (espera-se que a massa do bóson de Higgs seja de  $110 \text{ GeV}/c^2$ ) [87], mas além de grandes aceleradores que operem com altos níveis de energia, também são necessários bons detectores [84]. Na verdade, o *Large Electron Positron (Grande Colisor Elétron-Pósitron) (LEP)* do *CERN*, já apresentou evidências indiretas da existência do bóson de Higgs. Essa partícula deixou pistas de que estaria no limite da energia de operação deste colisor. O *LEP* foi fechado em 2000 para dar espaço para a construção do *LHC*. A construção do *LHC* é importante, pois ele é o maior acelerador já construído, sete vezes mais energético que o *Tevatron* [87]. Mesmo com toda essa tecnologia utilizada para a detecção do bóson de Higgs, é provável que para estudar detalhadamente as interações nele produzidas, seja necessário um novo colisor além de *LHC* e do *Tevatron* [87].

### 6.3.2. O Modelo Padrão Supersimétrico (SSMs) ou Supersimetria

O Modelo Padrão é uma teoria eficaz para explicar o comportamento das partículas elementares. Também conseguiu unificar a interação fraca e a eletromagnética (interação eletrofraca); contudo as interações forte e gravitacional não foram incorporadas a essa unificação. E ainda existem algumas perguntas que não são satisfatoriamente respondidas por ele [89]. Com o intuito de completar e expandir o Modelo Padrão, foi proposto, em 1973, o *Modelo Padrão Supersimétrico (SSMs)*, prevendo a elaboração de uma teoria de unificação das quatro interações da natureza [74].

Segundo esta proposta do *SSMs*, *férmions* e *bósons* seriam tratados como uma classe de partículas únicas, sem distinção [74]. Para que isso seja possível, é proposto que *bósons* e *férmions* possam figurar no mesmo grupo de partículas degeneradas em massa, ou que, caso venham a ter massas muito próximas, que esta diferença possa ser reproduzida em termos de um mecanismo de violação da *supersimetria* [74, p. 46].

No *SSMs*, é esperado que, para cada bóson de uma certa massa corresponda um férmion com a mesma massa [74]. Desta forma, todas as partículas elementares teriam seu companheiro *supersimétrico*. Por exemplo, o companheiro supersimétrico do *elétron* seria o *selétron*, o do *fóton* seria o *fotoino*. Cada uma dessas partículas possuiria todas as características de uma partícula elementar, apenas o seu spin é alterado. Há previsão de que o *LHC* possa detectar partículas supersimétricas [90].

A *supersimetria* é um ingrediente essencial na elaboração da *Teoria das Cordas* ou *Supercordas* [89], cuja descrição será feita a seguir, na próxima seção.

Para aprofundar conhecimentos sobre *supersimetria*, recomenda-se as referências [74], [89] e [90].

### 6.3.3. A Teoria das Cordas ou Supercordas

Novamente a intenção dessa teoria é unificar as quatro interações da natureza. Seu mérito é a capacidade de propor uma solução para um impasse teórico, a falta de unidade entre as duas grandes teorias do século XX: a Mecânica Quântica e a

Relatividade Geral<sup>113</sup> [90]. Esta teoria sugere uma extensão para o Modelo Padrão, na qual deverá estar incluída a interação gravitacional no nível quântico [91].

A teoria das cordas envolve a Mecânica Quântica e a Relatividade Geral, como já foi mencionado, contudo, não modifica nenhuma dessas teorias, pois não há indícios dessa necessidade. Nessa teoria a interpretação para as partículas elementares é diferente. No Modelo Padrão, as partículas elementares são descritas como objetos pontuais; já na teoria das cordas, elas são descritas como objetos estendidos, como cordas, membranas ou objetos de dimensões maiores [91]. Para que a teoria das cordas possa existir ela necessita de outras simetrias além daquelas do Modelo Padrão; uma delas é a *supersimetria* [89, p. 14], tratada na seção anterior.

Foi na década de 1970 que identificou-se a possibilidade de que as partículas descritas pelo Modelo Padrão poderiam ser ressonâncias de uma corda fundamental. Essa identificação foi feita por meio da investigação de uma equação para o espalhamento de partículas. Verificou-se que essa equação só teria sentido se as partículas elementares fossem interpretadas como ressonâncias de uma corda vibrando. Como analogia podemos pensar que ressonâncias diferentes de uma corda de violão representam notas musicais diferentes. Foi investigando as ressonâncias de uma corda fundamental que se identificou a descrição do *gráviton* [91].

Uma corda aberta vibrando em estado de energia mais baixa pode descrever um *fóton* ou um dos *bósons* do Modelo Padrão; se for uma corda fechada, pode descrever um *gráviton*. As cordas também podem interagir entre si [89, p. 13].

Com a descrição do *gráviton* se pode calcular seu espalhamento, o que gerou uma *teoria quântica da gravitação* [89]. Contudo, essa teoria ainda não foi confirmada. Pois, o espalhamento de *grávítions* requer energias muito acima da capacidade dos aceleradores atuais e ainda não existe nenhum projeto de novo acelerador que alcance tais valores de energia [84]. Para aprofundamento sobre o tema, recomenda-se a leitura dos artigos das referências [74], [89], [90] e [91].

#### 6.3.4. A matéria escura

Quando se pensava que a ciência já teria condições de explicar a formação de toda a matéria presente no Universo, satélites forneceram informações que colocaram em dúvida o nível de conhecimento humano. Segunda essas informações apenas 4% da matéria presente em nosso Universo é formada por partículas pertencentes ao Modelo Padrão; 22% são formados por *matéria escura* e os 74% restantes são compostos por *energia escura* [89], tema que será tratado na próxima seção (6.3.5). Dessa forma é necessário reavaliar nossos conhecimentos, na tentativa de expandi-los compreender o que ainda não conhecemos.

Para compreendermos o que é a *matéria escura* devemos considerar o que foi dito anteriormente sobre o *bóson de Higgs* (seção 6.3.1) e a *supermimetria* (seção 6.3.2) que prevê que a *matéria escura* seria formada por novas partículas previstas por essa teoria [87]. Essa perspectiva é importante porque nenhuma das partículas do Modelo Padrão responde a esta questão [82].

Cosmólogos têm se deparado com imagens em que se tem representada a colisão de dois aglomerados de galáxias. Nessas, é possível identificar a distribuição de *matéria escura*, obtida pelo método das lentes gravitacionais, assim como o gás das galáxias emitindo raios X, este gás é formado pela matéria que conhecemos formado

---

<sup>113</sup> Teoria da gravitação proposta por Einstein estruturada em torno de um princípio fundamental chamado princípio de equivalência no qual não é possível distinguir os efeitos locais de um campo gravitacional dos de um referencial não-inercial animado de uma aceleração igual à aceleração local da gravidade [24, p. 221].

por *bárions (matéria bariônica)*. A interpretação desta imagem sugere que a *matéria escura* não interage, que ela seria de natureza diferente da *matéria bariônica*.

Como já foi dito anteriormente, a *matéria escura* representa 22% do conteúdo do Universo. Sabe-se que as galáxias apresentam uma massa maior do que aquela observada com o auxílio de telescópios. Essa constatação é importante, pois só assim podemos explicar seus movimentos. Dessa forma, essa massa que não percebemos deve ser formada por algum tipo de matéria que não absorve nem emite luz, também não interage com o campo eletromagnético e só pode ser detectado por seus efeitos gravitacionais. Por essa razão, esse tipo de matéria foi denominado matéria escura [89].

Existem experimentos que tentam detectar a *matéria escura* presente na Terra e nas proximidades. São detectores muito sensíveis localizados em minas profundas. Contudo, eles não apresentaram nenhum resultado satisfatório. Dessa forma, os efeitos da matéria escura continuam sendo observados apenas por meio de medidas astronômicas [89]. Recomenda-se a leitura dos artigos das referências [82], [87] e [89] para maiores esclarecimentos.

### 6.3.5. A energia escura

Em 1998, foram detectados os primeiros indícios de variação na velocidade de expansão do Universo. Esses dados estavam baseados na observação de supernovas<sup>114</sup> e que demonstraram que a taxa de expansão do Universo, no passado, era mais lenta, e hoje está mais acelerada. Para explicar essa diferença sugeriu-se a existência da *energia escura* [92].

A *energia escura* é uma substância gravitacionalmente repulsiva, o que explicaria a expansão do Universo. Contudo, ainda não sabemos muito sobre ela, apenas podemos dizer que ela está presente em todo o Universo. [82]. Para que possamos verificar seus efeitos, é preciso fazer observações à longas distâncias e por longos períodos de tempo [92].

Nenhum dos componentes presentes no modelo padrão é capaz de explicar a constituição da energia escura [93]. Mesmo assim, astrônomos buscam registros sobre sua existência e, aparentemente, estão convencidos de que a energia escura existe, mas as evidências ainda não são de todo convincente [93, p. 8]. Leituras complementares são recomendadas, identificadas pelas referências [92] e [93].

### 6.3.6. A antimatéria

Anteriormente, na seção 5.15, já havíamos comentado sobre o que é a *antimatéria*. Nessa seção discutiremos sobre mais uma das perguntas que ainda não foram respondidas pelo Modelo Padrão: por que existe mais matéria que antimatéria no Universo?

Tudo a nossa volta, os planetas, as estrelas, as árvores, são formados por matéria. Contudo, é muito raro encontrarmos antimatéria na natureza [82]. Esta constatação torna difícil aplicar a esse tema um conceito tão importante na história da Física: o conceito de simetria. É incontestável a assimetria entre matéria e antimatéria no Universo, contudo isso não é um problema para os cientistas – na verdade é uma solução; é só lembrar que, quando uma partícula de matéria interage com uma de antimatéria elas se aniquilam [82].

Então, considerando a interação entre matéria e antimatéria, é bem mais confortável a predominância de matéria. Dessa forma, conforme citado por Moreira:

---

<sup>114</sup> As supernovas são estrelas que explodiram. Elas são utilizadas para medir a expansão cósmica.

“...um universo composto da mesma quantidade de matéria e antimatéria seria hostil e instável, não o tipo de lugar onde grandes quantidades de matéria do tamanho de planetas poderiam existir em relativa paz e estabilidade durante bilhões de anos.” [82, p. 7].

O que os pesquisadores imaginam é que, em algum momento após o *Big Bang*, houve uma preponderância da matéria sobre a antimatéria. Estima-se que, para que essa assimetria tenha ocorrido, deveriam existir para cada bilhão de antipartículas um bilhão mais uma partícula de matéria. Atualmente existem experimentos que tentam encontrar uma resposta para essa assimetria, dentre eles o *LHC do CERN*.

O *Compton Gama Ray Observatory (Observatório Compton de Radiação Gama)* da *National Aeronautics and Space Administration (Nasa) (Administração Nacional do Espaço e da Aeronáutica)* detectou a emissão de radiação gama ( $\gamma$ ) produzida pela aniquilação de *elétrons* e *pósitrons* na Via Láctea [94].

Ainda tentando detectar antimatéria na Via Láctea, em 1998 o ônibus espacial *Discovery* levou a bordo um instrumento chamado *Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02) (Espectrômetro Magnético Alfa)*, com o objetivo de detectar núcleos de anti-hélio nos raios cósmicos; contudo, não houve sucesso. Um equipamento similar a esse pretendia ser enviado à Estação Espacial Internacional, em 2008, com o objetivo de continuar a busca pela antimatéria por três anos [94]. Informações sobre este tema podem ser encontradas em [82] e [94].

## 7. Considerações finais

Ao longo do relato, percebemos como nossa percepção do Universo mudou. E é provável que continue a mudar, pois a superação do Modelo Padrão é esperada pela filosofia de Bachelard. Esperam-se muitas respostas do *LHC*, mas também é fundamental que ele nos forneça novas perguntas para que possamos continuar a evoluir.

E assim como as teorias científicas mudaram o papel do professor também mudou ao longo do tempo. Passamos do professor detentor do conhecimento para o professor mediador do conhecimento. Essa mudança também implica em alterações na proposta didática. Propor aos estudantes atividades com temas contemporâneas, que demonstrem a integração de diversas áreas do conhecimento aproxima o estudante da Física e pode ressaltar como a compreensão dessa ciência é importante para compreender nossas origens e tudo que nos cerca.

A implementação de currículos mais atuais é uma proposta viável para que obtenhamos esse resultado. Ao inserirmos tópicos de Física Contemporânea propiciamos ao estudante a interação com o conhecimento atual, mostrando quanto a sua influência na sociedade transforma a ciência e o próprio homem.

A proposta desse texto foi motivar professores de Ensino Médio a inserirem o tópico Partículas Elementares e Interações Fundamentais em suas aulas, ressaltando a potencialidade desse conteúdo para tratar de temas como a evolução da história da ciência na perspectiva de Bachelard, na qual podemos perceber as constantes rupturas e reconciliações na evolução da ideias que ajudaram ou não a elaborar as diferentes teorias ao longo dos séculos. Esses períodos de rupturas também demonstram a transitoriedade da verdade, conceito importante na filosofia de Bachelard e fundamental para a compreensão do desenvolvimento científico atual. Esse tipo de análise é importante porque ajuda a promover uma contextualização do desenvolvimento científico. O estudante tem a possibilidade de perceber como o conhecimento científico foi elaborado, de que não é necessário ser um gênio que em

um momento mágico de um *insight* criou todo um corpo de conhecimento, desmistificando e, ao mesmo tempo, humanizando o trabalho científico.

Também não podemos nos esquecer que o tema tratado nesse texto nos conduz para questões que nos remetem às nossas origens e como a busca por respostas oportunizou um dos maiores empreendimentos científicos realizados até hoje pela humanidade: o *LHC*.

A ciência do século XXI tem um novo formato, ela é dinâmica e os estudantes precisam conhecê-la.

## **8. Sobre a elaboração e utilização do texto “Do átomo grego ao modelo padrão: os indivisíveis de hoje”.**

Conforme foi mencionado no primeiro capítulo, este texto pretende subsidiar e motivar professores de Física a introduzirem em suas aulas tópicos de Física Contemporânea, em especial Partículas Elementares e Interações Fundamentais. O texto se propõe a fazer uma exposição baseada na história da ciência, o que propicia uma análise, da evolução do conhecimento científico, baseada na epistemologia de Bachelard. A participação das demais ciências na evolução do conhecimento científico, também é contemplada, ressaltando que essa é resultado de uma construção humana. Desta forma pretende-se proporcionar uma visão mais crítica do desenvolvimento da ciência, contribuindo para desmistificar crenças equivocadas sobre a ciência, em geral.

Ao mesmo tempo, esta proposta de trabalho procura contemplar os Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio - PCNEM [95] assim como as Orientações Educacionais Complementares dos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio — PCN+ [96]. Em ambos os documentos, espera-se que a escola de nível médio contribua para a formação de um cidadão cientificamente alfabetizado, e, para que isso ocorra, a inserção de temas contemporâneos nos currículos escolares, em especial no currículo de Física, é imprescindível. Como sugestão, os referidos documentos, propõe a inserção da Física Moderna e Contemporânea nos currículos escolares, e, além disso, também propõem que estes temas contemporâneos sejam usados como meio para se discutir o desenvolvimento da ciência via História e Filosofia da Ciência. Esta nova proposta curricular possibilita uma alteração na seleção de conteúdos, que podem ser trabalhados com diferentes ênfases, de acordo com os objetivos propostos. Também propõe que esses conteúdos interajam com os demais, não só com outros conteúdos relacionados às Ciências, mas com todas as áreas do conhecimento.

Segundo Ostermann e Cavalcante [84], ao repensar o currículo utilizado na disciplina de Física, temos que enfatizar conteúdos potencialmente significativos, integrados com as demais áreas de conhecimento e contextualizados no mundo contemporâneo, e ao mesmo tempo, e minimizando a abordagem formalística da Física. Contudo, para aumentarmos a qualidade do ensino não basta apenas alterarmos o currículo; temos que rever as formas de avaliação utilizadas [97]. A avaliação tem que ser condizente com esta nova abordagem. Deve propor desafios aos estudantes, de forma que esses busquem recursos cognitivos e pessoais para resolvê-los. As atividades de avaliação devem proporcionar o desenvolvimento e o estabelecimento de conexões entre conceitos, do espírito cooperativo e de responsabilidade, sem deixar de considerar os conhecimentos prévios e a forma de pensar dos estudantes [98].

Assim, propõe-se a inserção de Física Moderna e Contemporânea (FMC), no Ensino Médio, por meio do tópico Partículas Elementares e Interações Fundamentais

na perspectiva do Modelo Padrão, minimizando ao máximo o formalismo matemático. Basicamente, a proposta baseia-se em um texto de referência, construído como uma das etapas de um trabalho de dissertação em um mestrado profissional em Ensino de Física, contendo aspectos históricos e epistemológicos para ser trabalhado com estudantes desse nível de escolaridade. Procurou-se utilizar uma linguagem acessível aos professores e aos estudantes, sem imagismos obstaculizadores, tal como imaginar uma partícula como uma bolinha, mas, principalmente, com uma proposta de formar um cidadão com uma cultura científica efetiva, aproveitando o entusiasmo característico do estudante em aprender assuntos atuais [99].

## **8.1 Os referenciais teóricos envolvidos**

A abordagem metodológica da presente proposta está pautada na teoria da mediação de Vygotsky [100; 101] complementada pela teoria da aprendizagem de Ausubel [102; 103]. Além disso, aspectos da história e da filosofia da ciência que foram criticamente comentados à luz da epistemologia de Gaston Bachelard [104; 105].

Justifica-se duplamente a escolha da teoria de Vygotsky como referencial teórico, tanto para a construção do texto como para a sua aplicação em sala de aula. Vygotsky [101] argumenta que o indivíduo aprende através da sua interação com os demais sujeitos no contexto social, cultural e histórico em que está inserido; ou seja, o indivíduo é amplamente influenciado pelo meio que o envolve. Nessa teoria, também é importante destacar que os mecanismos que serão responsáveis pelo desenvolvimento cognitivo do indivíduo também são de origem e natureza sociais, e peculiares ao ser humano. Esse é um dos pilares da teoria de Vygotsky que diz que os processos mentais superiores têm sua origem nos processos sociais. Assim, percebe-se que os trabalhos de Vygotsky exploram especialmente a interação entre indivíduo e o contexto que o cerca [99].

A teoria de aprendizagem significativa de Ausubel [102; 103] também foi utilizada como referência para a elaboração do texto. Segundo Ausubel, a aprendizagem significativa ocorre quando uma nova informação recebida pelo indivíduo interage com informações preexistentes na estrutura cognitiva. Ausubel atribui como fatores essenciais para a aprendizagem a identificação dos conhecimentos preexistente na estrutura cognitiva do estudante, a proposta de materiais potencialmente significativos pelo professor e a pré-disposição do estudante para aprender. A linguagem também tem uma grande importância nessa teoria, pois ela é considerada um facilitador da aprendizagem [99].

## **8.2 Sugestões de atividades**

As sugestões de atividades apresentadas fazem parte de uma unidade de aprendizagem sobre Partículas Elementares e Interações Fundamentais. A unidade de aprendizagem (UA) é uma metodologia de ensino que propõe envolver o aluno na construção do conhecimento de modo ativo e reflexivo. Esta proposta é condizente com as demais teorias de aprendizagem utilizadas, pois assim como na teoria da aprendizagem significativa de Ausubel, a elaboração de uma UA também considera os conhecimentos prévios dos estudantes como ponto de partida para a nova instrução. E o papel do professor, assim como na teoria da aprendizagem significativa, é o de mediador. Quanto aos alunos, este tipo de atividade desloca os estudantes da posição de meros receptores, como comumente acontece em metodologias tradicionais de ensino, para a posição de agente construtores do seu conhecimento.

Assim, a utilização de uma UA oportuniza aos estudantes momentos de questionamento e discussão. E assim como na teoria de Vygotsky, a interação social é

fundamental para estas atividades. Além disso, a elaboração de uma UA também proporciona a elaboração de uma proposta interdisciplinar.

### **8.2.1 O Discreto charme das partículas elementares: o organizador prévio.**

Segundo Ausubel [102], um dos fatores mais importantes ao se planejar uma instrução é identificar os conhecimentos prévios dos seus alunos; e a partir, destes conhecimentos, organizar a instrução. Isso pode ser feito de diversas maneiras, como uma discussão proposta pelo professor em sala de aula, respostas individuais a um pré-teste ou a divisão da turma em pequenos grupos para responder a algumas perguntas em forma de *quiz*<sup>115</sup>. No Apêndice 1, encontra-se uma sugestão de pré-teste sobre o referido tema. Esse pré-teste foi elaborado para ser respondido individualmente, mas é possível que o professor o organize em forma de *quiz* para ser respondido pelos alunos, organizados em pequenos grupos.

As informações coletadas nesta atividade inicial serão avaliadas pelo professor que decidirá se é possível começar a instrução ou se é necessário o uso de organizadores prévios para fornecer aos alunos os subsunçores necessários para a compreensão do tema a ser tratado. Se o professor detectar que é necessário o uso de organizadores prévios, sugere-se o filme “O discreto charme das partículas elementares” produzido pela TV Cultura de São Paulo [106], baseado no livro homônimo de Maria Cristina Batoni Abdalla [107]. O filme tem quarenta e três minutos de duração e é voltado ao público adolescente. Nele, são tratados os temas: o átomo, as partículas elementares, o acelerador de partículas *Large Hadron Collider (LHC)*, as galáxias, o mundo subatômico e a teoria do *Big Bang*.

Após o filme, propõe-se uma atividade para provocar a discussão sobre os novos conceitos apresentados; sugere-se que os alunos se dividam em pequenos grupos e que cada grupo fique responsável por responder algumas questões sobre o tema tratado. No Apêndice 2, são sugeridas vinte e nove questões; propõe-se que elas sejam distribuídas aleatoriamente entre os grupos de forma que não se repitam. Também se sugere que a última questão (nº 29) seja respondida por todos os grupos participantes da atividade [108].

Em todas as atividades, e em todas as atividades desenvolvidas, é importante que os estudantes tenham oportunidade de falar, de expressar suas ideias e dúvidas, enfim, de participar efetivamente do seu desenvolvimento.

### **8.2.2 Elaboração de uma “linha do tempo” a partir de uma análise crítica do texto “Do átomo grego ao modelo padrão: os indivisíveis de hoje”.**

O texto é dinâmico e pode ser trabalhado de diversas formas; é importante que o professor analise sua carga horária disponível para esta unidade. Ele pode ser trabalhado todo de uma única vez, ou pode ser dividido em pequenas partes que serão utilizadas em momentos pré-determinados da instrução, que inclusive pode ser dividida nos três anos que compõe o Ensino Médio. Isso é possível, pois o texto, que apresenta uma abordagem cronológica comentada, faz um apanhado histórico sobre a elaboração do conceito de partícula elementar, que começa na antiguidade grega e se estende até o século XXI. Para viabilizar este tratamento, os temas abordados foram desenvolvidos baseando-se na epistemologia de Gaston Bachelard, em especial a “*filosofia da desilusão*” [105]. Tendo o desenvolvimento histórico como pano de fundo, esta abordagem possibilitou uma análise crítica da evolução do conceito de partícula

---

<sup>115</sup> Jogo de perguntas e respostas, no qual o vencedor é o jogador que acerta um número maior de respostas.



elementar apresentado na Grécia Antiga até a elaboração da teoria do Modelo Padrão das Partículas Elementares aceite atualmente, enfatizando o papel do erro como elemento promotor do desenvolvimento do conhecimento científico [99].

O tratamento histórico-crítico, proporcionado pela epistemologia de Bachelard foi importante na elaboração do texto, pois promoveu a reflexão sobre os temas tratados. Considera-se importante esta análise crítica e contextualizada, pois é por meio dela que o aluno poderá compreender o real significado destes fatos para a história da ciência. Este tratamento também propiciou a desmistificação do método científico como um processo linear e cumulativo por meio da descrição do esforço humano, misturando concepções equivocadas com a evolução das teorias científicas na construção do conhecimento.

Outro fator importante, tanto na teoria de Vygotsky como na teoria de Ausubel, foi a importância atribuída à linguagem. Segundo Vygotsky, o uso dos signos, ou seja, palavras são fundamentais para a formação de conceitos. Também é importante apresentar aos estudantes que estes signos podem adquirir significados diferentes, que podem variar com o contexto histórico e cultural. Um exemplo que pode ser encontrado no texto é o significado da palavra *cor*. Mesmo sendo utilizada como um conceito ligado à Física, ela pode ter significados diferentes. Seu significado ao tratarmos da Física de Partículas é diferente do significado atribuído na Ótica. Assim, ao analisar este exemplo pode-se perceber a importância do uso adequado da linguagem ao se planejar uma instrução. As palavras tanto podem ser utilizadas como facilitadores ou como obstáculos epistemológico (obstáculo verbal), segundo Bachelard, para a compreensão do tema abordado.

Ao longo do texto também se procurou ressaltar a interdisciplinaridade presente no trabalho científico. A intenção deste tratamento foi a de desmistificar a separação de disciplinas que ocorre na escola. Muitos estudantes aparentemente interpretam as disciplinas escolares como pequenas “gavetinhas” nas quais armazenam seus conhecimentos. Assim existe a “gavetinha da História”, a “gavetinha da Química”, a “gavetinha da Física”. O problema é que os conhecimentos armazenados nestas “gavetinhas” não se misturam. Dessa forma, o texto desenvolvido tentou apresentar as diferentes contribuições de cada disciplina científica para a elaboração das ideias que culminaram com o Modelo Padrão.

Quanto ao conteúdo específico de Física de Partículas, os tópicos abordados foram: o Modelo padrão – léptons e quarks; bárions e mésons; partículas mediadoras/virtuais (fótons, glúons, W e Z, grávitons); interações fundamentais (gravitacional, eletromagnética, forte e fraca); propriedades fundamentais da matéria (massa, carga elétrica, carga cor e carga fraca); o “problema da gravidade”; a antimatéria; o bóson de Higgs. A abordagem escolhida não enfatiza “pontes” com a Física Clássica e, minimiza o uso de equações ou representações matemáticas [99].

Novamente, o professor é que deve julgar como o texto poderá ser utilizado de acordo com a sua realidade. Aqui, sugere-se que o texto seja dividido em duas partes; inicialmente, sugere-se a leitura do texto *Do átomo grego ao modelo padrão: os indivisíveis de hoje*, a versão de 80 páginas<sup>116</sup>. Os alunos fizeram a leitura da primeira parte do texto, aproximadamente 40 páginas, que compreendia as primeiras propostas sobre a constituição da matéria – desenvolvimento das ideias gregas – até os trabalhos realizados no final do século XIX.

Após a leitura do texto, a tarefa de cada grupo é identificar e relacionar os eventos e/ou propostas mais significativas para a elaboração do conceito de partícula elementar. E em um segundo momento, elaborar uma linha do tempo relacionando-as.

---

<sup>116</sup> Esta versão reduzida foi elaborada pela professora-pesquisadora; foi baseada no desempenho dos alunos no pré-teste.

Cada grupo deverá apresentar sua tarefa para os demais colegas, justificando a escolha de cada proposta e a sua relação com a elaboração do conceito atual de partícula elementar. Na avaliação desta atividade, é importante priorizar a coerência nos fatos apresentados pelos alunos, salientando a importância de apresentarem uma relação histórica adequada entre os eventos e/ou propostas escolhidas.

A intenção desta tarefa é propiciar aos estudantes um pouco de História da Ciência, além de instigá-los a desenvolver um olhar mais crítico sobre a evolução do conhecimento científico, identificando que as teorias científicas não se desenvolveram devido a um processo linear e cumulativo e, assim, iniciando um processo de desmistificação do conhecimento científico [108].

Como esta tarefa exigirá senso crítico dos alunos e a quantidade de conteúdo abordado é extensa, o Apêndice 3 sugere um pequeno roteiro de discussão, com o objetivo de motivar os estudantes a uma leitura atenta e crítica do texto.

### **8.2.3 Elaboração de mapas conceituais sobre partículas elementares**

Como foi dito anteriormente, o objetivo de uma UA, com relação ao desempenho dos alunos, é a sua efetiva participação em sala de aula. Assim, para atingir esse objetivo, optou-se pelo uso de mapas conceituais. O que se propõe é avaliar o que o aluno sabe em termos conceituais, isto é, como ele estrutura, hierarquiza, diferencia, relaciona, discrimina e integra conceitos de um determinado tema [103]. Segundo Moreira [103]:

*“Se entendermos a estrutura cognitiva de um indivíduo em certa área do conhecimento, como o conteúdo e organização conceitual de suas ideias nessa área, mapas conceituais podem ser usados como instrumento para representar a estrutura cognitiva do aprendiz [103, p. 55].”*

Além disso, o mapa conceitual também é uma boa alternativa quando se privilegia uma avaliação recursiva, pois seu processo de elaboração é composto de reconstruções e reflexões acerca dos conceitos e suas relações.

Assim, em relação à segunda parte do texto, sugere-se elaborar, apresentar, discutir e reformular mapas conceituais sobre partículas elementares. Como os mapas conceituais são uma construção pessoal que requer tempo, sugere-se que cada grupo elabore, de forma recursiva, pelo menos, três mapas conceituais consecutivos sobre partículas elementares.

Com esta atividade pretende-se identificar as concepções dos alunos sobre a estrutura da matéria, usando os mapas conceituais como recurso didático e de avaliação.

Para a avaliação dos mapas conceituais, sugere-se considerar, ao menos, os seguintes critérios:

- O mapa deve conter apenas conceitos relacionados ao tema tratado. E esses devem parecer apenas uma vez no mapa.
- Esses conceitos devem estar conectados de forma que reflitam suas relações com a estrutura conceitual do tema tratado.
- Considera-se importante o uso de palavras de ligação que expressem as relações de acordo com a estrutura conceitual do tema tratado. O ideal seria o uso de palavras para cada ligação.
- A relação de hierarquia entre os conceitos, assim como as relações cruzadas devem ser expressas no mapa.

Além disso, também é importante avaliar a apresentação do mapa pelo grupo, pois é neste momento o grupo tem a oportunidade de demonstrar compreensão em relação ao trabalho desenvolvido. No Apêndice 4 apresenta-se uma sugestão de instrução sobre a elaboração dos mapas conceituais.

#### **8.2.4 Considerações finais**

Considerando os referenciais teóricos adotados para a elaboração desta proposta, é fundamental que o aluno tenha a oportunidade de falar e ser ouvido, ou seja, é primordial que o professor proporcione momentos em que sejam favorecidas discussões entre os alunos e entre o professor e seus alunos. Inicialmente estas atividades podem ser difíceis, mas é importante lembrar que a maioria dos nossos alunos, teve como uma constante em sua vida escolar, apenas o papel de ouvinte. Assim, mudar de papel pode ser difícil, inicialmente, mas é importante motivá-los. Também é importante que o professor reveja o seu papel na sala de aula, este tipo de metodologia requer um professor com um perfil de mediador, mais do que provedor do conhecimento.

O ensino da Física Moderna e Contemporânea, à primeira vista, pode parecer muito interessante, mas é importante ter o cuidado para não cometermos os mesmos erros tão criticados na Física Clássica, como por exemplo, um ensino essencialmente voltado para a aplicação de fórmulas matemáticas sem nenhuma criticidade. Outro aspecto importante que esta proposta favorece é a possibilidade do uso da história e filosofia da ciência no Ensino Médio. Ao tratarmos de temas relacionados ao desenvolvimento científico é possível tentar modificar visões tão consagradas, e incorretas, sobre o desenvolvimento científico, como a de que a ciência foi desenvolvida por gênios trancados em seus laboratórios, que em momentos de iluminação “descobrem” uma lei fundamental da natureza; o uso da palavra *descobrir* na ciência reforça a concepção de que o cientista encontra uma lei que estava escondida, reforçando a ideia do cientista como um gênio, que tem um momento de iluminação em sua vida. É importante que o aluno reconheça que a ciência foi e é elaborada por seres humanos, passíveis de erros e acertos, e que ambos façam parte do trabalho científico. Esse tipo de discussão pode ser implementada pela análise que é feita no texto baseada na epistemologia de Bachelard. Não é preciso que o aluno conheça a epistemologia de Bachelard profundamente, apenas é preciso que o professor apresente estas ideias de uma maneira compreensível ao aluno de Ensino Médio.

Quanto ao trabalho com mapas conceituais; os mapas são uma ferramenta muito rica, mas que requer tempo e dedicação, tanto por parte do professor como por parte do aluno. Sugere-se que antes de utilizar os mapas conceituais como forma de avaliação o professor promova, como um exercício, a elaboração de mapas conceituais para que o aluno possa compreender a construção desta ferramenta. O melhor seria o seu uso em vários temas abordados ao longo do currículo, e em várias disciplinas. Como foi dito anteriormente, é necessário que o aluno tenha um tempo para se adaptar a esta nova atividade.

Mas um mapa conceitual não deve ficar apenas no papel, é fundamental proporcionar aos alunos um momento para a sua apresentação e discussão com os demais colegas, pois é neste momento que o aluno terá a oportunidade de externalizar como se deu a compreensão dos conceitos abordados. O mapa conceitual não é auto-explicativo, a explicação dada por seu autor é imprescindível.

Dessa forma,conclui-se dizendo que este tipo de proposta é muito envolvente, tanto para o professor como para os alunos, pois nos dá a oportunidade de dialogar com os alunos. Além disso, proporciona um olhar muito diferente da ciência que a maioria dos estudantes conhece; pois apresenta-lhes uma ciência viva e em constante crescimento.

Reiterando o que foi dito no início deste texto, espera-se que este trabalho possa ser um apoio aos professores para a formação científica dos estudantes de Ensino Médio.

## Bibliografia

[1] MELO, A.C.S. de (2005). *Contribuições da Epistemologia Histórica de Bachelard no Estudo da Evolução das Idéias da Óptica*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica – Universidade Federal de Santa Catarina.

[2] RONAN, C. A. (1983-1987). *História ilustrada da ciência*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar. 4 v.

[3] KIRK, G. S. RAVEN, J. E. *Os filósofos pré-socráticos*. In: CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor. *Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos*. 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006. 603 p.

[4] CARUSO, F.; OGURI, V. (2006). *Física Moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos*. Rio de Janeiro: Elsevier. 603 p.

[5] BUENO, A. Dez Lições de Filosofia Chinesa. Disponível em: <<http://filosofia-chinesa.blogspot.com/2007/07/sobre-o-pensar-chins-antigo.html>>. Acesso em: 19/06/08.

[6] BASSALO, J. M. F. Partículas Elementares: do átomo grego à supercorda. In: CARUSO, Francisco; SANTORO, Alberto (Orgs). *Do átomo grego à Física das interações fundamentais*. Rio de Janeiro: CBPF, 2000. P. 71-130.

[7] LOPES, A. R. C. (1996). Bachelard: o filósofo da desilusão. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 13(3): 248-273.

[8] OLIVEIRA FILHO, K. de S. Biografias de Tycho Brahe, Johannes Kepler e Galileo Galilei. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/bib/bibkepler.htm>>. Acesso em: 21/03/08.

[9] ROCHA, J. F. M.. Origens e Evolução do Eletromagnetismo. In: ROCHA, J. F. (Org). *Origens e evoluções das idéias da Física*. Salvador: EDUFBA, 2002. P. 182-281.

[10] KOYRÉ, A. (1991). *Estudos de História do Pensamento Científico*. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 388 p.

[11] PONCZEK, R. L. Da Bíblia a Newton: uma visão humanística da Mecânica. In: ROCHA, J. F. (Org). *Origens e evoluções das idéias da Física*. Salvador: EDUFBA, 2002. P. 18-135.

[12] HEISENBERG, W. K. (1987). *Física e Filosofia*. 2.ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 158 p.

[13] BASSALO, J. M. F.. Nascimentos da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.18, n.2, p.95-102, Jun. 1996.

[14] NEWTON, I. Sir (1947). *Óptica. Tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz*. Buenos Aires: Emecé Editores, 386 p.

[15] BASSALO, J. M. F.(1998). Nascimentos da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 20(1): 56-72.

- [16] PINHO, S. T. R. de; ANDRADE, R. F. S.. Evolução das idéias da Termodinâmica e da Mecânica Estatística. In: ROCHA, J. F. (Org). *Origens e evoluções das idéias da Física*. Salvador: EDUFBA, 2002. P. 136-181.
- [17] FILGUEIRAS, C. A. (1996). A espectroscopia e a Química. *Química Nova na Escola*, (3): 22-25.
- [18] MASON, S. F. (1996). *Historia de las Ciencias*. Madrid: Alianza Editorial. 5 v.
- [19] MELO, A. C. S.; PEDUZZI, L. O. Q. (2007). Contribuições da Epistemologia Bachelariana no Estudo da Óptica. *Ciência e Educação*, 13(1): 99-126.
- [20] FILGUEIRAS, C. A. (2004). Duzentos Anos da Teoria Atômica de Dalton. *Química Nova na Escola*, (20); 38-44.
- [21] BASSALO, J. M. F. A dispersão da luz e as séries (raias) espectrais. Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/folclore/folclore67.htm>>. Acesso em: 28/07/08.
- [22] BASSALO, J. M. F. Faraday e o efeito magnético-óptico (efeito Faraday). Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/folclore/folclore148.htm>>. Acesso em: 29/07/08.
- [23] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Física Moderna – A descoberta dos raios X. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m\\_s01.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s01.html)>. Acesso em: 29/09/08.
- [24] RODITI, I. (2005). *Dicionário Houaiss de Física*. Rio de Janeiro: Objetiva, 248 p.
- [25] DAHMEN, S. R. (2006). A obra de Boltzmann em Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 28(3): 281-295.
- [26] MOREIRA, I. de C. (1997). Conferência Nobel de Thomson sobre a descoberta do elétron. Tradução e notas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 199(3): 299-307.
- [27] BASSALO, J. M. F. (1980). Do átomo filosófico de Leucipo ao átomo científico de Dalton. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2(2): 70-76.
- [28] SANTOS, C. A. dos. Modelo atômico de Bohr: fatos históricos. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/modelobohr/modelobohrhist.html>>. Acesso em: 6/02/09.
- [29] BAZANINI, G.; LAWALL, I. T. (1995). Raias espectrais. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 12(3): 229-235.
- [30] MARTINS, R. de A. (1998). A descoberta dos raios X: O primeiro comunicado de Röntgen. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 20(4): 373-391.
- [31] BRENNAN, R. (2003). *Gigantes da Física: Uma História da Física Moderna Através de Oito Biografias*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 290 p.
- [32] TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. (2001). *Física Moderna*. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 515 p.
- [33] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Luminescência. Disponível em <<http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia2000/turmaA/grupo6/luminescencia.htm>>. Acesso em: 25/07/08.
- [34] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Física Moderna – A descoberta da Radioatividade. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m\\_s02.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s02.html)>. Acesso em: 29/09/08.
- [35] MOTTA, H. da. O próton. In: CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor; SANTORO, Alberto. (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P 123-131.
- [36] BASSALO, J. M. F.. Os processos radioativos. Disponível em: <<http://www.searadaciencia.ufc.br/folclore/folclore106.htm>>. Acesso em: 6/10/08.

- [37] BASSALO, J. M. F.. Os efeitos Zeeman (normal e anômalo), Back-Paschen e spin do elétron. Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/folclore/folclore150.htm>>. Acesso em 29/07/08.
- [38] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. *Cathode Rays*. Disponível em: <[http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/electron/electron1\\_1.htm](http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/electron/electron1_1.htm)>. Acesso em: 10/08/08.
- [39] UNIVERSITY OF CAMBRIDGE. *J.J.'s Experiment*. Disponível em: <[http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/electron/electron2\\_1.htm](http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/electron/electron2_1.htm)>. Acesso em: 10/08/08.
- [40] ROSENFELD, R. (2003). *Feynman e Gell-Mann: luz, quarks, ação*. São Paulo: Odysseus Editora, 121 p.
- [41] BASSALO, J. M. F.. As câmaras de “névoa” (Wilson) e de bolhas. Disponível em:<<http://www.seara.ufc.br/folclore/folclore14.htm>>. Acesso em: 5/12/08.
- [42] SALMERON, R.. Física Nuclear, raios cósmicos e as origens da Física de Partículas Elementares. In: CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A. (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P. 43-72.
- [43] RIBEIRO FILHO, A. Os quanta e a Física Moderna. In: ROCHA, José Fernando (Org). Salvador: EDUFBA, 2002. P. 298-372.
- [44] BACHELARD, G. (2006). *Epistemologia*. Lisboa: Editora Setenta, 220 p.
- [45] BACHELARD, G. (2005). *A Formação do Espírito Científico*. Rio de Janeiro: Contraponto, 341 p.
- [46] SALINAS, S. R.A. (2005). Einstein e a teoria do movimento browniano. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27(2): 263-269.
- [47] NOBEL PRIZE, *Alfred Nobel – The Man Behind the Nobel Prize*. Disponível em: <[http://nobelprize.org/alfred\\_nobel/](http://nobelprize.org/alfred_nobel/)>. Acesso em: 16/08/08.
- [48] EISBERG, R.; RESNICK, R. (1979). *Física Quântica: átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas*. Rio de Janeiro: Campus, 928 p. 13ªed.
- [49] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. *Medida da carga do elétron: de Thomson a Millikan*. Disponível em: <[http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m\\_s06.html#exp03](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s06.html#exp03)>. Acesso em: 19/08/08.
- [50] MEDEIROS, A. (1999). Aston e a descoberta dos isótopos. *Química nova na escola*, (10): 32-37.
- [51] STACHEL, J. (2001). *Albert Einstein, 1879-1955. O ano miraculoso de Einstein. Cinco artigos que mudaram a face da Física*. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ, 222 p.
- [52] SHELLARD, R. C.. Fótons. In: CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor; SANTORO, Alberto (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P. 91-121.
- [53] SEGRÈ, E. (1980). *From x-rays to quarks: modern physicists and their discoveries*. San Francisco: W. H. Freeman, 337 p.
- [54] SANTOS, C. A. dos (1995). A participação de Fletcher no experimento da gota de óleo de Millikan. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 17(1): 107-116.
- [55] SANTOS, C. A. dos; VILLANI, A.; BASSALO, J. M. F.; MARTINS, R. de A. (1998). *Da revolução científica à revolução tecnológica: tópicos de história da Física Moderna*. Porto Alegre: UFRGS, 228 p.
- [56] BASSALO, J. M. F.. Bohr, o modelo atômico, a experiência de Franck-Hertz e os princípios da correspondência e da complementaridade. Disponível em: <<http://www.searadaciencia.ufc.br/folclore/folclore130.htm>>. Acesso em: 7/02/09.

- [57] BOHR, N. H. D. (2006). Física atômica e o conhecimento humano: ensaios 1932-1957. In: SILVEIRA, F. L. da; PEDUZZI, L. O. Q. Três episódios de descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 23(1): 26-52.
- [58] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Física Moderna – A história do Modelo de Bohr. Disponível em: < [http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m\\_s04.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod06/m_s04.html)>. Acesso em: 12/01/09.
- [59] BASSALO, J. M. F. (1999). Nascimentos da Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 21( 2): 304-310.
- [60] UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Os raios X e a Tabela Periódica: A lei de Moseley. Disponível em: < [http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod05/m\\_s02.html](http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod05/m_s02.html)>. Acesso em: 29/09/08.
- [61] STUDART, N.; COSTA, R C. T. da; MOREIRA, I. de C. (2004). Theodoro Ramos e a Física Moderna no Brasil. *Física na Escola*, 5(2): 34-36.
- [62] BASSALO, J. M. F. (1981). As partículas constituintes do núcleo. *Revista brasileira de Ensino de Física*, 3(2): 86-102.
- [63] BASSALO, J. M. F.. A descoberta dos bárions. Disponível em: < <http://www.searadaciencia.ufc.br/folclore/folclore201.htm> >. Acesso em: 21/02/09.
- [64] BARRETO, J.L. V.. A descoberta do nêutron: uma saga científica. In: CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A.. (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P. 151-160.
- [65] GUZZO, M.; NATALE, A.. Introduzido os neutrinos. In: CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A.. (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P.193-208.
- [66] BASSALO, J. M. F.. Curiosidades da Física-17. Disponível em:<[www.bassalo.com.br/cfe\\_curiosidade159.swf](http://www.bassalo.com.br/cfe_curiosidade159.swf)>. Acesso em: 15/07/09.
- [67] BASSALO, J. M. F.. Spin isotrópico ou isospin. Disponível em:<[www.seara.ufc.br/folclore/folclore195.htm](http://www.seara.ufc.br/folclore/folclore195.htm)>. Acesso em: 21/07/09.
- [68] ALVES, G.. O múon: passado, presente e futuro. In: CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A.. (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P. 161-168.
- [69] MARQUES, A. (2005). César Lattes. *Ciência Hoje*,36(215): 44 –49.
- [70] NOBEL PRIZE, *Frederick Reines – Autobiography*. Disponível em:< [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1995/reines-autobio.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1995/reines-autobio.html) >. Acesso em: 24/02/09.
- [71] BASSALO, J. M. F.. Fermi a força fraca e a fissão nuclear. Disponível em:< <http://74.125.47.132/search?q=cache:IW8NgyP9p8oJ:www.searadaciencia.ufc.br/folclore/folclore128.htm+decaimento+beta,+enrico+fermi&cd=7&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>>. Acesso em: 31/03/09.
- [72] OGURI, V.. Os bósons intermediários W e Z. In: CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A.. (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P. 249-269.
- [73] MOREIRA, M. A. (2007). A Física dos quarks e a epistemologia, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(2): 161-173.
- [74] HELAYËL-NETO, J. A. (2005). Supersimetria e Interações fundamentais. *Física na Escola*, 6(1): 45-47.

- [75] BASSALO, J. M. F. (1981). Os primeiros quarks. *Revista brasileira de Ensino de Física*, 3(4): 13-26.
- [76] ABDALLA, M. C. B. (2005). Sobre o discreto charme das partículas elementares. *Física na Escola*, 6(1): 38-44.
- [77] BEGALLI, M.. A descoberta do  $J/\Psi$  e do charm. In: CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A.. (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P.231-248.
- [78] GREEN, D.. A descoberta do quark b. In: CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A.. (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P. 271-292.
- [79] SANTORO, A.. O quark top. In: CARUSO, F.; OGURI, V.; SANTORO, A.. (Orgs). Cem anos de Física de Partículas. Manaus: Editora da Universidade Federal do Amazonas, 2005. P. 293-304.
- [80] BACHELARD, G. *O Novo Espírito Científico*. In: MELO, A.C.S. de (2005). *Contribuições da Epistemologia Histórica de Bachelard no Estudo da Evolução das Idéias da Óptica*. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [81] OSTERMANN, F. *Partículas elementares e interações fundamentais*. Porto Alegre: Instituto de Física – UFRGS, 2001. 74 p. : Il. (Textos de apoio ao professor de física; n. 12).
- [82] MOREIRA, M. A. (2009). O Modelo Padrão da Física de Partículas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 1, 1306.
- [83] KANE, G. In: MOREIRA, M. A. (2009). O Modelo Padrão da Física de Partículas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 1, 1306.
- [84] OSTERMANN, F.; Cavalcante, C. (2001). Um pôster para ensinar Física de Partículas na escola. *Física na Escola*, 2(1): 13-19.
- [85] MOREIRA, M. A. (2004). Partículas e Interações. *Física na Escola*, 5(2): 10-14.
- [86] MENEZES, L. C. de (2005). *A matéria uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico*. 1ª Ed. São Paulo: Editora Livraria da Física.
- [87] KANE, G. (2005). Mistérios da massa. *Scientific American Brasil*: 101-107. Ago.
- [88] COLAS, P.; TUCHMING, B. (2003). Partículas elementares. *Mundo Científico/ La Recherche*, (247): 46-53.
- [89] RIVELLES, V. O. (2007). A teoria das cordas e a unificação das forças da natureza. *Física na Escola*, 8(1):10-16.
- [90] WEINBERG, S. (2005). À procura de um Universo unificado. *Scientific American Brasil*, Edição especial (8): 6-11.
- [91] BERKOVITS, N. J. (2004). Descobrimos a Teoria das Cordas. *Scientific American Brasil*: 48-51. Jan.
- [92] CONSELICE, C. J. (2007). A mão invisível do Universo. *Scientific American Brasil*: 34-41. Mar.
- [93] CLIFTON, T.; FERREIRA, P. G. (2009). Existe mesmo uma energia escura? *Scientific American Brasil*: 30-37. Jun.
- [94] JAYAWARDHANA, R. (2006). O jogo de espelho da matéria e antimatéria. *Astronomy Brasil*: 20-25. Dez.



- [95] MENEZES, L. C. (coord.) (1999). Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. In: Parâmetros Curriculares do Ensino Médio. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>> Acesso em: 23/05/10.
- [96] MENEZES, L. C. (coord.) (2002). Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. In: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio. Disponível em: <[http://www.sbfisica.org.br/arquivos/PCN\\_CNMT.pdf](http://www.sbfisica.org.br/arquivos/PCN_CNMT.pdf)> Acesso em: 23/05/10.
- [97] SILVA, E. de B. A qualidade no currículo. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/EuridesBritoS.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- [98] KAWAMURA, M. R. D.; HOSOUME, Y. (2003). A contribuição da Física para um novo Ensino Médio. *A Física na Escola*, 4(2), 22-27.
- [99] PINHEIRO, L.A.; COSTA, S.S.C.; MOREIRA, M.A. (2009). *Projetando o ensino de Partículas elementares e Interações Fundamentais no Ensino Médio*. XVIII Simpósio Nacional de ensino de Física – SNEF 2009 – Vitória, ES. Disponível em: <<http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snef/xviii/sys/resumos/T0797-1.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- [100] VYGOTSKY, L. S. (1991). *A formação social da mente*. 4 ed. São Paulo: Martins Fontes. 168p.
- [101] VYGOTSKY, L. S. (1993). *Pensamento e linguagem*. São Paulo: Martins Fontes. 135p.
- [102] AUSUBEL, D.; NOVAK, J.; HANESIAN, H. (1980). *Psicologia Educacional*. Rio de Janeiro: Interamericana. 626p.
- [103] MOREIRA, M. A. (2006). *A teoria da aprendizagem significativa e sua implementação em sala de aula*. Brasília: Editora da UnB. 185p.
- [104] BACHELARD, G. (1979). *A filosofia do não*. São Paulo: Abril Cultural. 354p.
- [105] LOPES, A. R. C. (1996). Bachelard: o filósofo da desilusão. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, 13(3): 248-273.
- [106] TV Cultura de São Paulo (2008). O discreto charme das partículas elementares. Disponível em <[www.tvcultura.com.br/particulas](http://www.tvcultura.com.br/particulas)> Acesso em: 10/01/11.
- [107] ABDALLA, M. C. B. (2006). *O discreto charme das partículas elementares*. São Paulo: Unesp, 352 p.
- [108] PINHEIRO, L.A.; COSTA, S.S.C. (2009). Relato sobre a implementação de uma unidade de aprendizagem sobre partículas elementares e interações fundamentais no ensino médio. *Experiências em Ensino de Ciências*, 4(3): 101-116.



## Apêndices

### Apêndice 1: Questionário sobre Partículas Elementares e Interações Fundamentais

#### Questionário sobre partículas elementares e interações fundamentais

Nome: \_\_\_\_\_ Turma: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_\_\_

Prezado Aluno,

Este questionário tem por finalidade identificar suas concepções a respeito do tema Partículas Elementares e Interações Fundamentais. Se você não souber a resposta para uma determinada questão, use a alternativa “Não sei”, mas não faça isso por comodidade. A ideia é que você escolha a alternativa que mais se ajuste às suas concepções sobre esse assunto. Portanto, pedimos que não “chute” para ver-se logo livre. Pense um pouco antes de responder.

<p>1. O que é um átomo?</p> <p>a) A menor porção de matéria que caracteriza um ser vivo.</p> <p>b) Uma partícula indivisível formada de prótons, elétrons e nêutrons.</p> <p>c) Uma partícula básica da matéria.</p> <p>d) A menor parte da matéria que caracteriza um elemento químico.</p> <p>e) Não sei.</p> <p>2. O que constitui os átomos?</p> <p>a) Prótons, elétrons e nêutrons.</p> <p>b) Léptons e quarks.</p> <p>c) Partículas alfa e beta.</p> <p>d) Partículas positivas e negativas.</p> <p>e) Não sei</p> <p>3. O que são prótons?</p> <p>a) Partículas elementares porque são constituintes dos átomos.</p> <p>b) Partículas elementares porque são indivisíveis.</p> <p>c) Partículas elementares porque possuem carga elétrica +e.</p> <p>d) Partículas constituídas por quarks.</p> <p>e) Não sei.</p> <p>4. O que são elétrons?</p> <p>a) Partículas elementares porque são indivisíveis.</p> <p>b) Partículas elementares porque possuem carga elétrica -e.</p> <p>c) Partículas elementares porque são constituintes dos átomos.</p> <p>d) Partículas elementares porque sua massa é muito pequena comparada com a do próton.</p> <p>e) Não sei.</p> <p>5. O que são nêutrons?</p> <p>a) Partículas elementares porque são indivisíveis.</p> <p>b) Partículas elementares porque sua carga elétrica é zero.</p> <p>c) Partículas elementares porque sua massa é aproximadamente a mesma massa do próton.</p> <p>d) Partículas constituídas por quarks.</p> <p>e) Não sei.</p> <p>6. O que é um modelo atômico?</p> <p>a) Uma representação, construída pelos cientistas, da estrutura dos átomos.</p>	<p>b) Um modelo tomado como referência para permitir cálculos matemáticos.</p> <p>c) Um modelo pensado para átomos de pequeno número atômico.</p> <p>d) Um modelo que pode ser pensado esquematicamente.</p> <p>e) Não sei</p> <p>7. Como um modelo atômico é construído?</p> <p>a) Por meio da imaginação dos cientistas.</p> <p>b) Por meio de observações da natureza.</p> <p>c) Por meio de observações experimentais.</p> <p>d) Integrando-se dados experimentais e teorias que se ajustam.</p> <p>e) Não sei.</p> <p>8. Qual é o modelo atômico mais aceito atualmente?</p> <p>a) Rutherford.</p> <p>b) Thomson.</p> <p>c) Bohr.</p> <p>d) Quântico.</p> <p>e) Não sei.</p> <p>9. O que é uma partícula elementar?</p> <p>a) O mesmo que um átomo.</p> <p>b) Um conjunto de prótons.</p> <p>c) A menor porção de matéria conhecida.</p> <p>d) Um conjunto de elétrons.</p> <p>e) Não sei.</p> <p>10. Como são detectadas as partículas elementares?</p> <p>a) Usando um microscópio.</p> <p>b) Por meio de sua observação direta na Natureza.</p> <p>c) Por meio de observações indiretas com o auxílio de aceleradores de partículas, câmaras de bolhas, detectores de raios cósmicos, etc.</p> <p>d) Com o uso de telescópios especiais.</p> <p>e) Não sei.</p> <p>11. O que é um quark?</p> <p>a) Uma partícula elementar que constitui a matéria.</p> <p>b) Um átomo ionizado.</p> <p>c) Uma característica das partículas elementares, assim como a carga elétrica.</p> <p>d) Um conjunto de prótons.</p> <p>e) Não sei.</p>
---	---

<p>12. Quantos quarks existem?</p> <p>a) 1 b) 4 c) 6 d) 8 e) Não sei.</p> <p>13. O que significa dizer que o quark tem cor?</p> <p>a) Que eles variam a sua coloração em função da luz que incide sobre eles. b) A cor é a propriedade que define a massa dos quarks. c) Esta é a propriedade que define a carga elétrica dos quarks. d) É uma propriedade dos quarks, assim como a carga elétrica. e) Não sei.</p> <p>14. O que é um lépton?</p> <p>a) Um átomo ionizado. b) Uma partícula elementar que constitui a matéria. c) Uma característica das partículas elementares, assim como a carga elétrica. d) Um conjunto de elétrons. e) Não sei.</p> <p>15. Quantos léptons existem?</p> <p>a) 1 b) 4 c) 6 d) 8 e) Não sei.</p> <p>16. O que é o Modelo Padrão?</p> <p>a) A teoria mais simples para explicar a natureza das partículas elementares. b) Uma teoria sobre as partículas elementares baseada na Física Clássica. c) Uma teoria baseada na intuição dos cientistas sobre o comportamento das partículas elementares. d) Uma teoria que representa o conhecimento atual sobre a natureza da matéria. e) Não sei.</p> <p>17. Qual (quais) é (são) a (s) partícula (s) elementar (es) de acordo com o Modelo Padrão?</p> <p>a) Prótons, elétrons e nêutrons. b) Léptons e quarks. c) Apenas o elétron. d) Apenas o fóton. e) Não sei.</p> <p>18. Quais as forças fundamentais existentes na Natureza?</p> <p>a) Força de atrito, força peso, força atômica e força molecular. b) Força eletromagnética, força nuclear forte, força nuclear fraca e força gravitacional. c) Força centrípeta, força centrífuga, força elétrica e magnética, força gravitacional. d) Força eletromagnética, força de atrito, força gravitacional e força nuclear. e) Não sei.</p> <p>19. Quais seriam as partículas mediadoras das interações fundamentais da Natureza?</p> <p>a) Partículas alfa e beta.</p>	<p>b) Prótons, elétrons e nêutrons. c) Glúons, fótons, partículas Z e W e o gráviton. d) Partículas positivas e negativas. e) Não sei.</p> <p>20. Que tipo de interação predomina no núcleo atômico?</p> <p>a) Interação nuclear forte. b) Interação eletromagnética. c) Interação gravitacional. d) Interação nuclear fraca. e) Não sei.</p> <p>21. O que são partículas virtuais?</p> <p>a) São as partículas mediadoras das interações dos campos de força. b) Partículas responsáveis pela carga elétrica dos prótons. c) Partículas responsáveis pela massa dos elétrons. d) Partículas responsáveis pela cor dos quarks. e) Não sei.</p> <p>22. O que seria o gráviton?</p> <p>a) Uma partícula elementar assim como o próton. b) Uma das partículas que compõem o nêutron. c) A partícula responsável pela carga elétrica dos átomos. d) A partícula mediadora da interação gravitacional. e) Não sei.</p> <p>23. O que é o bóson de Higgs?</p> <p>a) É uma partícula que interage fortemente com a matéria. b) É uma das partículas que formam os átomos. c) Especula-se que esta é a partícula responsável pela massa das demais partículas elementares. d) É uma partícula que forma os prótons. e) Não sei.</p> <p>24. O que são mésons?</p> <p>a) Partículas responsáveis pelas interações entre prótons e elétrons. b) Partículas mediadoras da interação forte residual. c) Uma das partículas que compõem o nêutron. d) Partículas com carga elétrica equivalente à metade da carga elétrica de elétrons e prótons. e) Não sei.</p> <p>25. O que são antipartículas?</p> <p>a) Partículas responsáveis pelas interações fundamentais da Natureza. b) Partículas com todas as características contrárias a de sua correspondente na matéria. c) Partículas iguais a suas correspondentes da matéria, mas com carga elétrica oposta. d) Partículas responsáveis por interações entre dois corpos. e) Não sei.</p> <p>26. O que é a matéria escura?</p> <p>a) É a matéria responsável pela formação dos buracos negros. b) É a matéria que forma uma pequena parte do Universo.</p>
--	---

- c) Ainda não sabemos o que é a matéria escura, mas sua existência foi concluída através da análise de efeitos gravitacionais.  
 d) É a matéria responsável pela formação de todas as galáxias.  
 e) Não sei.

27. O que o Modelo Padrão Supersimétrico?

- a) Uma extensão do Modelo Padrão das partículas elementares.  
 b) Uma nova teoria que pretende explicar do que a matéria é feita.  
 c) Uma teoria recentemente elaborada para explicar, de forma simplificada, a natureza das partículas elementares.  
 d) Uma nova teoria, baseada na Física Clássica, que pretende explicar do que a matéria é feita.  
 e) Não sei.

28. O que são as supercordas?

- a) Teoria que explica como o Universo funciona, através dos princípios da Física Clássica.  
 b) Teoria que pretende unificar as interações fundamentais da natureza.  
 c) Uma teoria que explica o surgimento do Universo.  
 d) Uma teoria recentemente elaborada para explicar, de forma simplificada, a natureza das partículas elementares.  
 e) Não sei.

29. O que é o Large Hadron Collider (LHC)?

- a) Um telescópio espacial.  
 b) Um experimento capaz de criar buracos negros com um campo gravitacional tão intenso quanto os existentes no espaço sideral.  
 c) Uma nova teoria para explicar a origem do Universo.  
 d) É um acelerador de partículas projetado para recriar as condições encontradas instantes após o Big Bang.  
 e) Não sei.

30. Descreva, livremente com suas próprias palavras, como você acha que é constituída a matéria. Use desenhos se achar melhor. Por favor, não deixe de responder esta pergunta.

**Gabarito do pré-teste:**

Questões	Respostas
1	d
2	b
3	d
4	b
5	d
6	a
7	d
8	d
9	c
10	c
11	d
12	a
13	a
14	c
15	a
16	c
17	d
18	b
19	c
20	d
21	b
22	b
23	a
24	c
25	a
26	d
27	c
28	b
29	c
30	c
31	a
32	b

## Apêndice 2: Questionário sobre o filme “O discreto charme das partículas elementares”.

1. Identifique a primeira partícula elementar que é apresentada na exposição?
2. Como você definiria uma partícula elementar após assistir o filme?
3. Como você explicaria a função das partículas elementares na Natureza?
4. Como você concebe a relação das partículas elementares e a origem do Universo?
5. Como podemos identificar uma partícula elementar?
6. O que é o Modelo Padrão?
7. Quais as famílias de partículas que fazem parte do Modelo Padrão?
8. Prótons e nêutrons são partículas elementares? Por quê?
9. Como podemos explicar a diferença de massa entre prótons e nêutrons? Considere que a massa do próton é  $m_p=1,67 \times 10^{-27}$  kg e a massa do nêutron  $m_n=1,68 \times 10^{-27}$  kg.
10. Quantos tipos de quarks existem? Justifique-os?
11. E o elétron, qual o seu papel no Modelo Padrão?
12. Quantos tipos de léptons existem? Justifique-os?
13. O que é o fóton? Qual o seu papel no Modelo Padrão?
14. Quais são as forças que agem no Universo? Caracterize-as?
15. Quais são os bósons mediadores de cada interação fundamental?
16. O que é “bóson de Higgs”? Qual a hipótese dos cientistas sobre ele?
17. Considerando o átomo de hidrogênio, explique o que mantém o elétron “ligado” ao núcleo?
18. Se cargas de mesmo sinal se repelem, como os cientistas explicam que o núcleo atômico (formado por prótons e nêutrons) não se desintegre?
19. O que é antimatéria? Qual a sua relação com as antipartículas?
20. O que é simetria? Como podemos reconhecer seu papel no Modelo Padrão?
21. As leis do mundo macroscópico e microscópico são as mesmas?
22. Por que a pesquisa científica é importante para a humanidade?
23. Cite algumas aplicações tecnológicas de pesquisas científicas que você habitualmente usa. Tente pensar como seria o seu dia a dia sem esses equipamentos.
24. O que é um acelerador de partículas? Você tem um em casa?
25. Você sabe o que é o *LHC*?
26. Onde está localizado o *LHC*? Por que ele foi construído debaixo da terra?
27. Como funciona um acelerador de partículas? Qual é o papel dos detectores nesse equipamento? E o resultado desse experimento, como fazemos sua interpretação?
28. O *LHC* pode causar o “fim do mundo” por meio de um buraco negro?
29. Depois de ver esse DVD, como você explica a constituição da matéria?

### **Apêndice 3: Roteiro de discussão sobre a primeira parte do texto “Do átomo grego ao modelo padrão: os indivisíveis de hoje.”**

1. Quanto ao desenvolvimento das propostas difundidas na Grécia Antiga; as novas propostas ignoravam as suas antecessoras? Qual era a relação entre novas e antigas propostas sobre a estrutura da matéria?
2. Por que as propostas gregas sobre a estrutura da matéria sobreviveram por tantos séculos? O que motivou esta aceitação?
3. *“Os conhecimentos, geralmente, são difundidos como uma continuidade de ideias apresentadas ao longo da história da ciência.”* Qual a sua opinião sobre a frase citada?
4. Por que a teoria atômica de Dalton foi considerada tão importante na história da ciência? O que a diferenciava de suas antecessoras?
5. O que muda na visão humana de ciência com os novos equipamentos científicos elaborados ao longo do século XIX?
6. Qual o papel na mecânica newtoniana no desenvolvimento científico até o final do século XIX? E com a chegada da “nova Física”, como ela foi interpretada?
7. Sobre a última frase do capítulo 4.2.3: *“...Já foi dito que uma hipótese científica que não esbarra em nenhuma contradição tem tudo para ser uma hipótese inútil”*. Como você interpreta esta frase? É possível que as dificuldades impulsionem a busca pelo conhecimento científico?
8. Ao final desta leitura, você pode afirmar que existe “a teoria científica correta”? Qual é a sua posição a respeito da afirmação: *“A ciência é elaborada com base em verdades universais”*.

## Apêndice 4: Construção de um mapa conceitual

### Construção de um mapa conceitual

O mapa conceitual pretende representar o que se sabe atualmente sobre Partículas Elementares, assim esse é o conceito mais abrangente do mapa.

Mas o que é um mapa conceitual?

Um mapa conceitual, de um modo geral, é um diagrama que indica relações entre conceitos, ou entre palavras que usamos para representar conceitos. O objetivo do uso de um mapa conceitual é explicitar a relação e a hierarquização dos conceitos por parte do autor do mapa dentro do tópico abordado [1]. Para isso o mapa conceitual pode ser elaborado segundo o esquema abaixo:

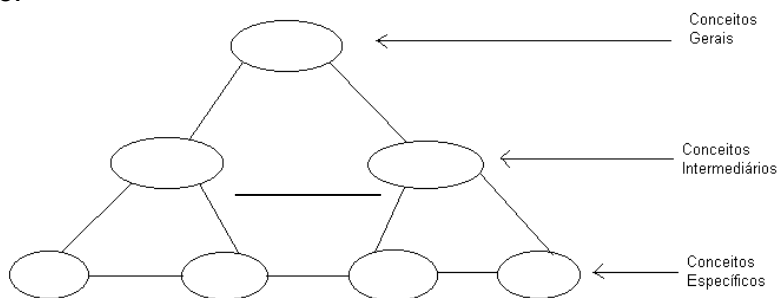


Figura 1: Um modelo de mapa conceitual.

Verticalmente, o mapa representa uma relação hierárquica bem estruturada, ou seja, os conceitos mais gerais são colocados no topo, os conceitos subordinados a esses ficam mais abaixo e os conceitos mais específicos na base do mapa. Um mapa conceitual não precisa ter apenas três níveis, ele pode ter tantos níveis quantos você julgar necessário, desde que estes respeitem as relações de hierarquia.

Horizontalmente, o mapa apresenta conceitos de mesma importância no conteúdo abordado. Mas podemos enfatizar essas relações aproximando os conceitos mais próximos e afastando os conceitos considerados não tão próximos. Para representar a relação entre esses conceitos usamos linhas para ligá-los. Essas linhas podem conter pequenas frases ou palavras que ajudem na compreensão do mapa [2].

É importante ressaltar que não existe um único mapa conceitual correto sobre cada tema escolhido; ele é dinâmico e varia com o seu nível de conhecimento. Contudo, é preciso cuidado para não cair em um relativismo onde "tudo vale": alguns mapas são definitivamente pobres e sugerem falta de compreensão. Também é importante lembrar que um mapa conceitual não se explica por si só, ele precisa das explicações dadas por seu autor para ser compreendido [1].

Para fazer um mapa sugere-se que:

1. Escreva todos os conceitos que se relacionam com o conceito gerador do mapa;
2. Organizem-os em ordem de importância, os mais importantes estarão no topo do mapa, os conceitos intermediários vão logo abaixo e os menos inclusivos na base do mapa.
3. Represente a relação entre estes conceitos usando linhas para conectá-los. Você pode usar, sobre as linhas, palavras que facilitem a compreensão das relações entre conceitos. Estas relações não precisam ser apenas horizontais ou verticais, elas também podem ser cruzadas.
4. Você pode acrescentar exemplos ao mapa conceitual, se julgar necessário. Geralmente eles ficam embaixo do seu conceito correspondente, na base do mapa.

Bibliografia:

[1] MOREIRA, Marco Antônio. Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~moreira/mapasport.pdf>>. Acesso em: 14 Mai. 2009.

[2] MOREIRA, Marco Antônio. Mapas Conceituais e Diagramas V. Porto Alegre: E. do autor, 2006. 103 p.