UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
INSTITUTO DE QUÍMICA
INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

FLÁVIA ALVES DOS SANTOS PEREIRA BAIA

***Átomos, elementos químicos, planetas e
estrelas - concepções de Mendeleev sobre o
mundo microscópico***

São Paulo
2010

FLÁVIA ALVES DOS SANTOS PEREIRA BAIA

***Átomos, elementos químicos, planetas e
estrelas - concepções de Mendeleev sobre o
mundo microscópico***

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Física, ao Instituto de Química, ao Instituto de Biociências e a Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alves Porto

São Paulo
2010

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

**Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo**

Baia, Flávia Alves dos Santos Pereira

Átomos, elementos químicos, planetas e estrelas -
concepções de Mendeleev sobre o mundo microscópico.
São Paulo, 2010.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.
Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de
Química e Instituto de Biociências.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alves Porto

Área de Concentração: Ensino de Química

Unitermos: 1. Química – Estudo e ensino; 2. Átomos;
3. Elementos químicos; 4. História da ciência.

USP/IF/SBI-078/2010

Dedico este trabalho ao meu filho,
com todo meu amor.

Agradecimentos

Agradeço especialmente ao professor Paulo Alves Porto, a oportunidade de poder tê-lo como mestre e orientador deste trabalho. Sua atenção, imensa paciência e delicadeza ao tratar me fizeram admirá-lo mais a cada dia. Sua inteligência e grande humildade o tornam um exemplo a ser seguido.

Aos professores do Instituto de Química, Instituto de Física, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas e Faculdade de Educação, dos quais sempre terei boas lembranças. Em especial a professora Daisy de Brito Rezende, pelas aulas repletas de conhecimento, puxões de orelha e risadas, e ao professor Moacir Gadotti, a quem terei como inspiração na procura de um outro mundo possível quando o cotidiano escolar estiver me entristecendo e para que eu nunca desanime.

Aos colegas do Grupo de Pesquisa em História da Ciência e Ensino de Química, pelas críticas construtivas no desenvolver deste trabalho.

Aos professores Mikiya Muramatsu, Bayardo Baptista Torres, Vera Bohomoletz Henriques e Maria Inês Nogueira pela oportunidade do aprendizado nos projetos em que trabalhamos juntos.

Aos colegas e amigos: Luciana, Jonny, Luís Augusto, Nilson, Mariana, Luís Paulo, Sandra, Alessandra, Adriana, Úrsula, Miriam, Cibele, Marcello, Maria Adriana, Eduardo (*In memoriam*) com os quais reparti meus sonhos e dificuldades neste longo caminho percorrido.

À direção, coordenação e colegas da Escola Estadual Brigadeiro Gavião Peixoto, pela parceria e compreensão nesse período de intenso trabalho.

À Léo, amiga que cuidou e continua a cuidar com carinho do meu filho durante esses anos para que eu conseguisse trabalhar com tranquilidade e segurança.

Aos amigos tão queridos: Rogério, Ricardo, Dagmar e Neide, que sempre me apoiaram e estarão sempre em meu coração.

Agradeço a minha família maravilhosa: minha mãe, meu pai, minhas irmãs Vania, Andréa e a amiga-irmã Aline e meus sobrinhos lindos, pelo amor, confiança e por sempre terem acreditado em mim, os amo além de tudo.

Ao meu filho Caio e meu marido Josimar, companheiro compreensivo que me apoiou nesse sonho tão difícil de ser realizado. Que as horas que passei longe de vocês sejam recompensadas em muitas alegrias.

À Secretaria da Educação do Estado de São Paulo, pela bolsa concedida para realização deste mestrado.

Podemos facilmente perdoar uma criança que tem medo do escuro; a real tragédia da vida é quando os homens têm medo da luz.

Platão

Resumo

BAIA, F. A. S. P. *Átomos, planetas e estrelas – concepções de Mendeleev sobre o mundo microscópico*. São Paulo: Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, 2010. 120 p. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências.

Este trabalho tem por objetivo analisar as concepções a respeito de átomos e elementos químicos, expressas pelo químico russo Dmitri I. Mendeleev (1834 – 1907). Para isso, recorremos a textos desse autor que foram traduzidos para o inglês, principalmente seu livro didático *Principles of Chemistry*, mas também os artigos “An Attempt to Apply to Chemistry one of The Principles of Newton’s Natural Philosophy”, (1889) e “An Attempt towards a chemical conception of the ether”, (1902). No decorrer do século XIX, a hipótese atômica formulada por Dalton, e elaborada por outros químicos, ainda não era unanimemente aceita pela comunidade científica. Nesse contexto, observamos que Mendeleev se alinhava aos autores que tinham reservas quanto à realidade física dos átomos. Para compreender seus motivos, é importante considerar que os primeiros estudos científicos de Mendeleev se referiam aos chamados “compostos indefinidos”, isto é, compostos que não obedeciam à lei das proporções múltiplas de Dalton. Mendeleev reconhecia que a hipótese atômica explicava uma série de fenômenos químicos, mas não era capaz de explicar os compostos indefinidos. Por outro lado, Mendeleev propôs uma clara distinção entre os conceitos de elemento químico e de corpo simples. Os elementos seriam entidades abstratas, portadoras da individualidade química, ideia considerada fundamental por Mendeleev e que o conduziu à formulação da lei periódica. Nos escritos analisados, Mendeleev fez uso, de maneira recorrente, da analogia entre o sistema solar e as moléculas. Nessa analogia, os planetas remetem à ideia de individualidade, essencial para a compreensão do conceito de elemento químico; mas, ao mesmo tempo, não remetem à ideia de indivisibilidade física – o ponto da hipótese atômica que por muito tempo foi objeto de descrença por parte de Mendeleev.

Palavras-chave: Mendeleev, átomos, elemento químico, história da química, analogia, planetas.

Abstract

BAIA, F. A. S. P. *Atoms, planets and stars – Mendeleev's concepts about the microscopic world*. São Paulo: Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, 2010. 120 p. Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências.

This work aims to analyze the concepts of atom and chemical elements, as presented in the writings of the Russian chemist Dmitri I. Mendeleev, (1834 - 1907). In this analysis were used English translations of Mendeleev's texts, especially his textbook *Principles of Chemistry*, but also the papers "An Attempt to Apply to Chemistry one of The Principles of Newton's Natural Philosophy", (1889) and "An Attempt Towards a chemical conception of the ether", (1902). During the nineteenth century, the atomic hypothesis, proposed by Dalton and elaborated by other chemists, was not unanimously accepted by the scientific community. In this context, one may note that Mendeleev was aligned with authors who had reservations about the physical reality of atoms. To understand his reasons, it is important to consider that the first scientific researches performed by Mendeleev were on the so-called indefinite compounds, that is, compounds that did not obey Dalton's law of multiple proportions. Mendeleev recognized that the atomic hypothesis explained a series of chemical phenomena, but it could not explain indefinite compounds. Moreover, Mendeleev proposed a clear distinction between the concepts of chemical elements and simple bodies. Elements were abstract entities with chemical individuality, a crucial idea to Mendeleev that led him to the proposition of the periodic law. In the analyzed texts, Mendeleev used, on a recurring basis, the analogy between the solar system and molecules. In this analogy, planets relate to the idea of individuality, which is essential to understand the concept of chemical element, but at the same time does not refer to the idea of physical indivisibility – the point of the atomic hypothesis that has long been subject to disbelief by Mendeleev.

Keywords: Mendeleev, atoms, chemical elements, history of chemistry, analogy, planets.

Sumário

Introdução	11
Capítulo 1 - Os conceitos de Mendeleev na visão de historiadores da ciência.	15
John H. Kultgen.....	20
Masanori Kaji.....	26
Bernadette Bensaude-Vincent	31
Nathan M. Brooks	36
Michael D. Gordin	39
Eric Scerri	44
Capítulo 2 – Mendeleev e seu tempo	51
A Rússia de Mendeleev	51
Mendeleev: esboço biográfico.....	55
Capítulo 3 - A questão dos elementos e dos átomos.....	63
Antoine Laurent Lavoisier	67
John Dalton	73
O Congresso de Karlsruhe	83
A lei periódica e a tabela periódica dos elementos.....	90
Capítulo 4 - Mendeleev, os átomos e os elementos	94
Sol e planetas – uma analogia com o mundo atômico.....	97
Considerações Finais	109
Referências Bibliográficas	113

Introdução

Dmitri Ivanovich Mendeleev, (1834 – 1907), químico russo do século XIX, tornou-se célebre pela proposição da chamada *lei periódica*. Mendeleev é saudado especialmente por haver previsto, com base nessa lei, certas propriedades de elementos químicos até então desconhecidos – embora suas realizações em química, e para a ciência e tecnologia russas em geral, abranjam muitos outros aspectos.

O presente trabalho visa discutir as concepções a respeito de átomos e de elementos químicos, expressas na obra de Mendeleev. A principal fonte primária para a pesquisa foi o livro *Principles of Chemistry*, (1901; tradução para o inglês por George Kamensky, da sexta edição russa de *Osnovy khimii*, publicada em 1895. A primeira edição russa é de 1868). Também foram utilizados dois outros textos de Mendeleev, traduzidos para o inglês: “An Attempt to Apply to Chemistry one of The Principles of Newton’s Natural Philosophy”, (1889) e “An Attempt towards a chemical conception of the ether”, (1902). As ideias de Mendeleev fornecem indícios a respeito das divergências e dos debates entre os químicos do século XIX em torno do estabelecimento e consolidação dos conceitos de elemento químico e de átomo. Assim, este trabalho se desenvolve no sentido de buscar o entendimento desses conceitos, caracterizando a peculiar interpretação dada a eles por Mendeleev. Procuramos contextualizar adequadamente esses

conceitos no âmbito da obra desse autor, e também em relação à química de sua época.

Quando se realiza um estudo de caso em história da ciência, à luz da nova historiografia da ciência, faz-se necessário realizar uma pesquisa minuciosa e aprofundada do processo de evolução das ideias e conceitos relacionados a este caso. A análise não se volta para uma tentativa de se encontrar embriões das ideias atuais, nem para a identificação do que estaria “certo” ou “errado” nas ideias dos autores do passado, tomando como referência o conhecimento científico de hoje. O enfoque se volta para buscar a compreensão das ideias no contexto em que foram propostas, para a caracterização de seu significado e coerência no conjunto do pensamento do autor analisado, e de sua própria época – incluindo aspectos sociais, políticos, econômicos, religiosos e psicológicos que possam ter influenciado na construção dessa obra científica. Dessa maneira, o historiador da ciência se vê diante de um processo complexo de elaboração e transformação de ideias, em que rupturas e continuidades com ideias anteriores se sobrepõem em diferentes níveis (Alfonso-Goldfarb *et al.* 2004; Martins, 2004; Debus, 1991).

Os conceitos escolhidos para estudo nesta dissertação são fundamentais para a construção do pensamento químico moderno. Sua análise, no contexto de uma obra fundamental na química do século XIX, fornece contribuições para a própria compreensão do papel desses conceitos na química atual.

O estudo da obra de Mendeleev revela aspectos importantes para a compreensão do processo de transformação de conceitos fundamentais para a química moderna, como os de átomo, elemento, corpo simples e substância. A compreensão da construção histórica desses conceitos não é de pequena

importância para o ensino de química na atualidade, e pode gerar reflexões muito úteis para o educador em química. Nas palavras de Gagliardi,

Os conceitos estruturantes devem ser determinados a partir da análise das teorias científicas atuais e de sua história. A história das ciências permite visualizar quais foram os conceitos que permitiram a transformação de uma ciência, a elaboração de novas teorias, a utilização de novos métodos e novos instrumentos conceituais (Gagliardi, 1988, p. 294).

Segundo Oki (2002), podemos classificar o elemento químico como um conceito estruturante, e como tal, fundamental para o desenvolvimento da ciência. Acreditamos que o entendimento da evolução conceitual de elementos por parte do educador em química, por meio de reflexões sobre o processo de construção desse saber, seja importante para que ele possa desenvolver estratégias de ensino e compreender melhor o processo de aprendizagem desse e de outros conceitos correlatos em sala de aula.

Tendo a preocupação de apresentar a transformação das ideias em seu devido contexto, o presente trabalho foi organizado da seguinte forma. O primeiro capítulo procura fazer uma breve revisão dos trabalhos de historiadores e filósofos da ciência que enfocaram, de alguma forma, as concepções de Mendeleev que selecionamos para estudo. No segundo capítulo, se apresenta a trajetória profissional de Mendeleev, visando situá-lo em sua época. No terceiro capítulo, o foco recai sobre ideias anteriores a respeito dos átomos e elementos químicos, a fim de que se possa compreender melhor os conceitos sobre os quais

Mendeleev elaborou suas concepções. Finalmente, o quarto capítulo analisa mais especificamente as ideias expressas por Mendeleev sobre os átomos e os elementos químicos, com especial atenção para a analogia estabelecida pelo químico russo entre planetas e átomos – a qual acreditamos ilustrar bem suas concepções a respeito daqueles conceitos.

Capítulo 1 - Os conceitos de Mendeleev na visão de historiadores da ciência

Principles of Chemistry foi escrito por Mendeleev objetivando a orientação de seus alunos no curso de Química Inorgânica. Sua preocupação era apresentar de maneira clara os fundamentos da Química, e o livro de Mendeleev acabou por alcançar grande sucesso como texto didático. Com explicações pormenorizadas e discussões ricas, Mendeleev procurou motivar seus alunos e leitores no estudo da Química.

Esforcei-me para incitar no leitor um espírito de investigação que, insatisfeito somente com raciocínios especulativos, devesse submeter todas as ideias à experimentação, incentivar o hábito do trabalho obstinado, e excitar uma busca por novas séries de evidências, que construíssem uma ponte sobre o abismo do desconhecido (Mendeleev, 1901, vol. 1, p. viii).

A Química, segundo Mendeleev, seria uma ciência que, além de abordar as ideias, abordaria também os aspectos materiais, permitindo ao investigador a possibilidade da averiguação imediata do que já foi e do que poderá vir a ser pressuposto ou descoberto.

Figura 1 – *Principles of Chemistry* (1901)

O particular interesse de Mendeleev em explicar as bases necessárias para o início do estudo da química fica explícito logo na introdução e nas primeiras notas de rodapé de *Principles of Chemistry*. No Prefácio de sua obra, o químico se explica:

... a principal peculiaridade do livro foi determinada. Dados experimentais e dados práticos ocupam seus lugares, mas os princípios filosóficos da nossa ciência constituem o tema principal da obra... Além da exposição dos princípios da química, foi meu desejo mostrar como a ciência tem agora sido construída como uma ponte suspensa, apoiada pela força conjunta de diversas cadeias delgadas, mas firmemente fixas – as quais, individualmente, são de pouca força, mas assim ultrapassam dificuldades que antes pareciam insuperáveis (Mendeleev, 1901, vol. 1, pp. vii - viii).

Mendeleev organizou seu livro pensando em dois níveis de leitores. No Prefácio, ele adverte que os iniciantes no estudo da química deveriam se ater ao texto principal, onde se trata dos “conhecimentos fundamentais e indispensáveis” daquela ciência. As notas de rodapé, por sua vez, estavam voltadas para aqueles que já dominassem o texto principal. Nas notas, segundo o próprio Mendeleev, ele procurou discutir detalhes, exemplos e tópicos controversos da química, bem como suas “visões pessoais, suposições e argumentos”. Afirmou, também, que procurou evitar detalhes sobre “os ramos especiais da química” (como química analítica, orgânica, físico-química, agrícola, etc.) e sobre os “diferentes ramos da ciência natural, que estão cada vez mais caminhando para um contato mais próximo com a química” (Mendeleev, 1901, vol. 1, p. x, n. 2).

Mendeleev discutiu o estatuto da química em relação à mecânica, considerando que ambas lidam com a matéria, ainda que sob diferentes pontos de vista:

Estou convencido de que a Química deve ocupar um lugar entre as ciências naturais lado a lado com a mecânica; pois a mecânica trata da matéria como um sistema de pontos ponderáveis que mal têm qualquer individualidade, e permanecendo apenas em um certo estado de equilíbrio móvel. Para a Química, a matéria é um mundo inteiro de vida, com uma variedade infinita de individualidades, tanto entre os elementos quanto em suas combinações. Ao estudar a uniformidade geral, sob um ponto de vista mecânico, penso que o ápice do conhecimento da natureza não pode ser alcançado sem levar em consideração a individualidade das coisas nas quais a química se baseia para buscar para as leis gerais mais elevadas (Mendeleev, 1901, vol. 1, p. xi, n. 2).

Em *Principles of Chemistry*, Mendeleev cita diversos cientistas¹, expondo suas hipóteses e teorias, e detalhando os experimentos desenvolvidos por eles, buscando esclarecer os temas abordados. Para Mendeleev, somente se chega a consolidar uma teoria após o rigoroso teste experimental das hipóteses iniciais. Utilizando Newton como exemplo, Mendeleev explicou:

Não se deve esquecer que a lei da gravidade de Newton foi, primeiramente, uma hipótese, mas se tornou uma teoria fidedigna e perfeita, e adquiriu as qualidades de uma lei fundamental devido à concordância entre suas deduções e os fatos reais. Todas as leis, todas as teorias, dos fenômenos naturais, são, a princípio,

¹ Mendeleev cita, por exemplo, os trabalhos de Boyle, Newton, Dalton, Avogadro, Gerhardt, Lavoisier, Bunsen, Deville, entre outros cientistas.

hipóteses. Algumas são rapidamente estabelecidas, pois suas consequências concordam exatamente com os fatos; outras somente germinam gradualmente; e existem muitas que estão destinadas a ser refutadas, porque se descobre que suas consequências estão em desacordo com os fatos (Mendeleev, 1901, vol. 2, p. 309).

Segundo Kultgen (1958, p. 178), Mendeleev recomendava a investigação química como um modo de vida. O químico russo via, na experimentação, uma forma de averiguação de suposições, e para ele a ciência deveria ser estudada, não somente aceita como uma verdade inquestionável.

... pode-se dizer com segurança que o método indutivo de investigação é um modo mais perfeito de adquirir conhecimentos do que o método dedutivo somente (partindo de um pouco do desconhecido, aceito como incontestável, para chegar ao muito que é visível e observável), por meio do qual os antigos se esforçaram para abraçar o universo. Ao investigar o universo por meio de um método indutivo (trabalhando a partir do muito que é observável para chegar a um pouco que possa ser verificado e seja indubitável), a nova ciência se recusa a reconhecer um dogma como verdade, mas, por meio da razão, por um método lento e laborioso de investigação, se esforça por, e atinge, deduções verdadeiras. (Mendeleev, 1901, vol.1, p. 2, n. 1)

A seguir, analisaremos como alguns historiadores e filósofos da ciência avaliaram as concepções de Mendeleev a respeito dos átomos e elementos, bem como algumas ideias correlatas.

John H. Kultgen

J. H. Kultgen (1958) qualificou Mendeleev como “eminentemente, um cientista filósofo”, devido a suas preocupações a respeito da natureza da ciência e dos fundamentos da química, expressas em *Principles of Chemistry*. Para Kultgen, ainda não havia sido desenvolvido um estudo detalhado sobre as influências que o químico russo sofrera e que o levaram a suas grandes realizações no campo da Química.

Em seu artigo *Philosophic Conceptions in Mendeleev's Principles of Chemistry*, Kultgen buscou caracterizar as concepções filosóficas expressas pelo químico russo em seu livro, procurando sistematizá-las em duas linhas de pensamento. A primeira linha de pensamento, chamada por Kultgen de “Teoria A”, é caracterizada por uma abordagem que se aproxima da “tradição aristotélico-lockeana da ontologia da substância primária”. A segunda linha, ou “Teoria B”, expressa por Mendeleev de maneira menos clara e explícita, contradiz alguns aspectos da abordagem anterior (Kultgen, 1958, p. 177).

Utilizando sua primeira linha de análise, Kultgen identificou características de uma tradição aristotélica em Mendeleev, quando o químico russo trata do objeto de estudo da química como sendo substâncias de vários tipos naturais, semelhantes às “substâncias primárias” aristotélicas. Além disso, Kultgen também

reconheceu uma influência lockeana² no fato de Mendeleev negar que a essência dessas substâncias pudesse ser conhecida. Para o químico russo, as substâncias somente poderiam ser conhecidas por meio de suas propriedades, ou por suas interações com nossos órgãos dos sentidos ou com outras substâncias (Kultgen, 1958, p. 178). Em diversos momentos, Mendeleev destacou o papel preponderante da experimentação na produção do conhecimento, como na construção do conceito de elemento químico, por exemplo. Por meio de análise química, seria possível isolar as substâncias homogêneas das misturas, e também os elementos dos compostos (Kultgen, 1958, p. 179; Mendeleev, 1901, pp. 2 – 3, n. 2). Além disso, Mendeleev via um papel importante na quantificação: “Quando uma propriedade pode ser medida, deixa de ser arbitrária, e torna objetiva a comparação” (Mendeleev, *apud* Kultgen, 1958, p. 179). Assim, de um modo geral, para Mendeleev “a química procede empiricamente de generalizações restritas a menos restritas, de dados para sistemas, da percepção da variedade do fato para a contemplação da unidade da natureza” (Kultgen, 1958, p. 179).

Em sua segunda linha de análise, Kultgen apontou aspectos do trabalho de Mendeleev que se contrapõem às concepções delineadas acima. Kultgen destacou passagens em que Mendeleev considera que a formulação de um sistema completo para a ciência é um ideal indefinidamente remoto, em função da infinidade de dados oferecidos pela natureza. Assim, qualquer sistema seria

² John Locke (1632 - 1704), médico e filósofo inglês, foi influenciado pelo pensamento de Francis Bacon (1561 - 1626), sobre a investigação experimental. O intelecto humano não poderia formular idéias do nada, nem o espírito traria em si memórias e conceitos presentes *a priori*. Para Locke, todos os dados da mente derivariam da experiência. A experiência seria a fonte e o limite do intelecto. www.consciencia.org/locke.shtml e em http://en.wikipedia.org/wiki/John_Locke. (Consulta em 12/11/2010).

necessariamente hipotético, e sujeito a ajustes em função de seu confronto com os dados. Entretanto, em uma ciência avançada, o sistema poderia estar mais avançado do que os dados, orientando a correção de dados puramente empíricos, mas considerados errôneos à luz do sistema. Foi o que ocorreu quando Mendeleev propôs a modificação de valores até então aceitos para os pesos atômicos ou para as valências de certos elementos, simplesmente porque eles não se encaixavam dentro do sistema delineado pela lei periódica de Mendeleev. Ou seja, neste caso, a química não caminhou dos dados para o sistema, mas do sistema para os dados (Kultgen, 1958, pp. 179 – 180).

Outras concepções que parecem contradizer a “Teoria A” referem-se ao que seriam os objetos últimos da descrição científica. De acordo com a “Teoria A”, seriam as essências abstraídas de exemplares das substâncias primárias; por vezes, porém, Mendeleev sugeriu que seriam quaisquer relações que pudessem ser estabelecidas entre os dados, desde que pudessem ser organizadas em um sistema único. Kultgen encontrou evidências de que o atomismo de Mendeleev poderia ser analisado sob esse prisma. Kultgen argumentou que, para Mendeleev, o esquema atômico seria apenas um modo de representar a matéria, um expediente para facilitar o estudo, ou um meio para analisar os fenômenos da natureza. Para sustentar essa interpretação, Kultgen citou passagens de *Principles of Chemistry* como esta:

Em minha opinião, o atomismo atual deve, em primeiro lugar, ser considerado meramente como um método conveniente para a investigação da matéria ponderável. Assim como um geômetra – que ao raciocinar sobre curvas as representa como sendo

formadas por uma sucessão de linhas retas, pois esse método permite que ele analise o objeto sob investigação – assim também o homem de ciências aplica a teoria atômica como um método para analisar os fenômenos da Natureza (Mendeleev, 1901, vol.1, p. 217).

É curioso observar que outra citação feita por Kultgen, que ele atribui à edição de *Principles of Chemistry* de 1905, não foi encontrada na edição de 1901. Segue-se essa citação:

Se, na atualidade, a matéria é representada como sendo composta de átomos individuais e móveis, isto, em minha opinião, é apenas um esquema (um método ou expediente para facilitar o estudo), baseado originalmente na estrutura do universo visível (sideral, solar) – o qual é, de fato, composto de partes separadas: estrelas, como o sol, planetas e seus satélites, meteoritos, e o éter especial que tem a faculdade de transmitir a luz e outras formas de energia e de movimento, tudo isso estando unido em um todo harmonioso (Mendeleev [1905], *apud* Kultgen, 1958, p. 180).

Ou seja, se poderia especular se, para Mendeleev, a hipótese atômica mereceria mais confiança do que outras na ciência – dada a importância central dos pesos atômicos na formulação de sua lei periódica. Essas passagens, entretanto, deixariam claro que não. Afinal, segundo Mendeleev, se poderia falar em elementos químicos sem necessariamente admitir a realidade dos átomos:

Há uma simplicidade de representação nos átomos, mas não existe uma necessidade absoluta de recorrer a eles. Somente a concepção da individualidade das partes da matéria, exibida nos elementos químicos, é necessária e confiável (Mendeleev, 1901, vol. 1, p. 221, n. 33).

Considerando os sistemas como tentativos, eles deveriam partir de hipóteses tomadas como axiomas. No caso da química, esse papel seria desempenhado pelos elementos químicos:

É certo que somente é possível realizar essas investigações quando tomamos por base algum fato incontestável que seja auto-evidente para nossa compreensão, como, por exemplo, número, tempo, espaço, movimento, ou massa. A determinação de tais concepções primárias ou fundamentais, embora não sejam excluídas da possibilidade de investigação, muitas vezes não se sujeita ao nosso atual modo de generalização científica. Daqui se segue que, na investigação de qualquer coisa, sempre resta algo que é aceito sem investigação, ou é admitido como um fator conhecido. Os axiomas da geometria podem ser tomados como um exemplo. Assim, na ciência da biologia, é necessário admitir a faculdade dos organismos de se multiplicar, como uma concepção cujo significado é ainda desconhecido. No estudo da química, também, a noção de elementos deve ser aceita quase sem qualquer análise posterior (Mendeleev, 1901, vol. 1, p. 1, n. 1).

Segue-se que a determinação dos pesos atômicos adquiriria uma grande importância para Mendeleev: o peso atômico seria a principal propriedade dos elementos, como sugere a seguinte passagem:

os pesos atômicos dos elementos devem ser considerados como suas propriedades mais elementares, uma vez que esta é uma quantidade que está muito firmemente estabelecida, e deve ser considerada em todas as reações do elemento (Mendeleev, 1901, vol. 2, p. 487).

Isto porque o peso atômico seria a propriedade que levaria ao sistema de classificação, ou seja, à lei periódica (Kultgen, 1958, p. 181).

No final de seu artigo, Kultgen teceu várias considerações sobre a coexistência das duas teorias por ele propostas na obra de Mendeleev. Considerando que ambas parecem incompatíveis, Kultgen especulou que, embora Mendeleev tenha sido mais explícito ao expressar as ideias da “Teoria A”, a “Teoria B” justifica melhor o esforço de classificação feito por Mendeleev ao longo de sua carreira científica. Além disso, a “Teoria B” emerge quando Mendeleev se propõe a questionar os fundamentos da ciência química, embora não chegue a discutir explícita e profundamente as implicações filosóficas que poderiam se seguir. Kultgen concluiu seu artigo afirmando que pesquisas posteriores sobre o pensamento de Mendeleev poderiam contribuir para a filosofia da ciência (Kultgen, 1958, p. 183).

Embora não tenhamos em vista implicações tão amplas como as sugeridas por Kultgen, entendemos que a discussão das concepções de Mendeleev acerca

de átomos e elementos químicos ainda possa fornecer reflexões interessantes para historiadores e educadores em ciências. Mais recentemente, dois artigos de Masanori Kaji contribuíram para essa discussão, conforme apresentamos a seguir.

Masanori Kaji

Em seu artigo “D. I. Mendeleev’s Concept of Chemical Elements and *The Principles of Chemistry*” (Kaji, 2002), o historiador da ciência Masanori Kaji se propôs a analisar as diferentes edições do livro escrito por Mendeleev, buscando esclarecer o papel do conceito de elemento químico, adotado pelo químico russo, na proposição e desenvolvimento da lei periódica. A investigação prossegue no artigo “Mendeleev’s discovery of the periodic law: the origin and the reception” (Kaji, 2003).

Kaji apontou que, logo em seus primeiros trabalhos científicos – teses de graduação e de mestrado – Mendeleev mostrou algumas das características que o acompanhariam ao longo de sua carreira: o interesse na semelhança entre as substâncias, o talento para sistematizar grandes quantidades de dados, e a adoção de novas ideias, como o sistema de pesos atômicos de Gerhardt e Laurent, e a hipótese de Avogadro (Kaji, 2002, pp. 4 – 5; 2003, p. 191). Outro exemplo da busca de Mendeleev por princípios de organização pode ser encontrado em seu primeiro livro didático de química, publicado em 1861, *Organicheskaya Khimiya* (Química Orgânica). Nesse livro, Mendeleev procurou utilizar a “teoria dos limites” como guia orientador da classificação dos compostos

orgânicos (considerando seu grau de saturação e suas reações de substituição). Com o advento da teoria estrutural, a “teoria dos limites” foi esquecida, mas o livro de química orgânica de Mendeleev teve boa repercussão da Rússia – tendo inclusive recebido o Prêmio Demidov, conferido pela Academia de Ciências de São Petersburgo em 1862 ao melhor livro escrito em russo no ano anterior (Kaji, 2002, p. 5; 2003, pp. 192 – 193). Em *Organicheskaya khimiya*, Mendeleev utilizou o método de Cannizzaro para a determinação de pesos atômicos, e trabalhou com a seguinte definição: o peso atômico seria “a quantidade mínima de um elemento existente em uma molécula composta por aquele elemento”. Mendeleev também explicitou a diferença entre “corpos” e “radicais”, sendo que o corpo seria algo divisível – remetendo à ideia de molécula – e o radical seria “a noção teórica” e “um todo indivisível” – remetendo à ideia de átomo (Mendeleev, *apud* Kaji, 2002, p. 5; 2003, p. 193).

Kaji procurou apresentar evidências de que Mendeleev considerava a ideia de átomo como teórica, sem necessariamente corresponder a uma entidade física real. Esse raciocínio pode ser entendido considerando o interesse que Mendeleev manifestou, desde suas primeiras pesquisas, em relação aos chamados “compostos indefinidos”. Em sua tese de mestrado, o químico utilizou essa expressão para se referir às substâncias que possuíam propriedades físicas constantes, porém apresentavam composição variada, como as soluções, ligas, misturas isomorfas e silicatos.

Desde sua graduação, quando iniciou seus trabalhos com minerais, Mendeleev constatou que havia inconsistências relativas à hipótese atômica, quando aplicada aos compostos indefinidos. Em palestra sobre química teórica, publicada em 1864, Mendeleev declarou:

De fato, embora, por um lado, a lei dos compostos químicos definidos tenha provado de forma convincente a teoria atômica, por outro lado, todo um grupo de compostos, os chamados compostos indefinidos, mostraram evidências que são diretamente contra a teoria (Mendeleev [1864], *apud* Kaji, 2002, p. 6).

Segundo Kaji, afirmação de mesmo teor pode ser encontrada na primeira edição russa de *Principles of Chemistry*:

[C]ompostos com composições indefinidas... falam contra a doutrina atômica tanto quanto os compostos químicos definidos falam em seu favor (Mendeleev [1868] *apud* Kaji, 2002, p. 6; 2003, p. 209, n. 8).

Entretanto, essa passagem não foi localizada na edição que utilizamos (Mendeleev, 1901).

Ao discutir as concepções de Mendeleev a respeito da teoria atômica, Kaji abordou a questão da incerteza a respeito da existência física de átomos indivisíveis. Conforme mencionamos acima, o conceito de elemento químico utilizado por Mendeleev se referia a entidades químicas individuais, mas sem implicar na ideia de indivisibilidade física dessas entidades. Assim, em uma série de conferências que proferiu na Universidade de São Petersburgo em 1867, Mendeleev mencionou a necessidade de se distinguir entre corpos simples e elementos, mas sem se referir explicitamente a átomos:

Um corpo simples... é uma substância, a qual, tomada individualmente, não pode ser quimicamente alterada por quaisquer meios produzidos até agora, ou formada por meio da transformação de quaisquer outros tipos de corpos. Um elemento, por outro lado, é um conceito abstrato; é o material que está contido em um corpo simples e que pode, sem qualquer mudança em seu peso, ser convertido em todos os corpos que podem ser obtidos a partir daquele corpo simples. (Mendeleev [1867], *apud* Kaji, 2002, p. 6; 2003, p. 197.)

Kaji observou que, embora Mendeleev apresentasse o peso como propriedade característica e invariável do elemento, nem por isso foi conduzido à conclusão de que isso se devia à existência de átomos (indivisíveis) do elemento. Segundo Kaji, a resistência em admitir essa consequência estaria relacionada à falha da lei das proporções definidas em dar conta dos compostos indefinidos.

Em 17 de fevereiro de 1869, o químico russo compilou a primeira tabela periódica dos elementos químicos, que ele intitulou “Tentativa de um sistema dos elementos baseado em seus pesos atômicos e analogias químicas”. Em março de 1869, foi lido na Sociedade de Química da Rússia o primeiro artigo em que Mendeleev apresentou sua lei periódica, sob o título de “Correlação entre as propriedades e os pesos atômicos dos elementos” (Kaji, 2002, pp. 8 – 9; 2003, p. 196). Nesse artigo, Mendeleev expôs sua concepção de elemento químico:

Não importa o quanto as propriedades dos corpos simples possam mudar no estado livre, *alguma coisa* permanece constante; e quando o elemento forma compostos, essa *alguma coisa* tem existência material, e estabelece as características dos compostos que incluem o dado elemento. A esse respeito,

conhecemos somente uma constante peculiar a um elemento, a saber, o peso atômico. O tamanho do peso atômico, pela própria essência da matéria, é comum ao corpo simples e a todos os seus compostos. O peso atômico não pertence ao carvão ou ao diamante, mas ao carbono (Mendeleev [1869] *apud* Kaji, 2002, p. 10; 2003, pp. 199 – 200).

Conforme comentado por Kaji, essa *alguma coisa* destacada por Mendeleev seria a própria definição de elemento químico, isto é, aquilo que permanece inalterado nas transformações químicas, ainda que as propriedades por ele exibidas em cada substância possam ser diferentes, e que pode ser caracterizado por uma grandeza: o peso atômico.

Kaji afirmou que Mendeleev não estava disposto a aderir à teoria atômica nesse momento, pois ainda a considerava um tanto “especulativa”. Em 1871, Mendeleev chegou a propor o uso da expressão “peso elementar”, em lugar de “peso atômico”³, o que seria uma forma de evitar a referência a átomos e à teoria que estes implicariam.

Em *Principles of Chemistry*, Mendeleev reconheceu a importância da teoria atômica para a compreensão de muitos fatos na química, mas não deixou de mencionar suas limitações. A seguinte citação nos fornece um indício sobre qual seria o estatuto dos átomos na concepção de Mendeleev:

³ Kaji se referiu à publicação de Mendeleev “Die periodische Gesetzmässigkeit der chemischen Elemente”, *Annalen der Chemie und Pharmacie – Supplementband* 8: 133 – 229, 1871 (Kaji, 2002, p. 10; 2003, p. 200).

No momento presente... a maioria dos homens de ciências apóiam a hipótese atômica... [As hipóteses] são indispensáveis à ciência; elas conferem ordem e simplicidade que dificilmente são atingíveis sem seu auxílio... E, portanto pode-se verdadeiramente dizer que é melhor apegar-se a uma hipótese que posteriormente possa ser provada falsa, do que não ter nenhuma. (Mendeleev, 1901, vol. 1, pp. 217 e 222.)

Em conclusão, Kaji destacou dois aspectos importantes no trabalho de Mendeleev. O primeiro deles foi a clara distinção entre os conceitos de elemento químico e de substância (ou corpo) simples, o que significou uma ruptura em relação à concepção empírica proposta por Lavoisier, e foi muito importante para a proposição da lei periódica. O segundo ponto é que seria tentador afirmar que o elemento químico de Mendeleev seria o átomo; porém, o químico russo resistiu em estabelecer essa relação direta, por considerar o conceito de átomo ainda especulativo, e, portanto, Mendeleev teria evitado se comprometer com a ideia de átomos fisicamente indivisíveis.

Bernadette Bensaude-Vincent

Bensaude-Vincent discute o trabalho de Mendeleev no artigo “Mendeleev’s Periodic System of Chemical Elements” (Bensaude-Vincent, 1986). A historiadora da ciência inicia seu texto tratando da obra *Principles of Chemistry*, na qual Mendeleev teria se mostrado muito interessado não só em Química, mas também

em outras áreas da ciência, como Biologia, Astronomia, Geologia e meteorologia. Bensaude-Vincent acrescenta que, a partir de considerações filosóficas sobre a Química e a Física, Mendeleev se encaminhou para os problemas relativos ao desenvolvimento econômico e o progresso da Rússia. Um dos objetivos do trabalho de Bensaude-Vincent foi discutir as preocupações epistemológicas de Mendeleev ao escrever *Principles of Chemistry*, e a relação destas com a proposição da Lei Periódica.

Bensaude-Vincent resumiu o panorama científico relativo aos séculos XVII, XVIII e XIX, destacando o trabalho de Lavoisier, cuja nomenclatura racional significou uma nova linguagem para a química, com grande influência sobre as práticas e teorias desta ciência – o que atingiu também Mendeleev e os químicos de seu tempo. Com o desenvolvimento de novas técnicas de análise, muitas substâncias simples foram sendo produzidas ao longo do século XIX, significando a multiplicação de “substâncias elementares”, o que gerou desconforto entre alguns químicos. Afinal, durante séculos, o pensamento (al)químico lidou com um número pequeno de “elementos” ou “princípios”, sempre inferior a uma dezena.

Para Bensaude-Vincent, duas grandes estratégias foram escolhidas pelos químicos do século XIX para lidar com a multiplicidade dos elementos. A primeira alternativa seria reduzir todas as substâncias simples a um único elemento – uma suposta “matéria primária”, como proposto na Hipótese de Prout⁴. Esta hipótese

⁴ William Prout (1785-1850), por volta de 1816, sugeriu que todos os pesos atômicos seriam múltiplos inteiros do peso atômico do hidrogênio. Assim, o hidrogênio seria a matéria primária de todos os elementos, e foi chamado de *protílo*. (Siegfried, 1956). Sua teoria foi inicialmente associada à teoria atômica de Dalton, e teve muitos adeptos, como Thomas Thomson, J. Dumas e Galissard de Marignac (Bensaude-Vincent, 1986, p. 6). Porém, com o desenvolvimento das técnicas para determinação dos pesos atômicos, foi observada a existência de pesos atômicos fracionários, o que era inconsistente com a Hipótese de Prout.

encontrou muitos adeptos entre os químicos da primeira metade do século XIX. Mendeleev, porém, não aderiu a ela, por acreditar na real individualidade dos elementos químicos – embora não tenha conseguido reunir argumentos decisivos contra aqueles que viam na própria lei periódica uma evidência em favor da ideia da substância primária. Ou seja, a segunda alternativa era reconhecer a individualidade dos muitos elementos, e que não seria possível dividi-los ou transformá-los uns nos outros (Bensaude-Vincent, 1986, pp. 6 – 7). Mendeleev se manteve fiel a essa ideia até o final de sua carreira, mesmo após a descoberta dos elétrons e da radioatividade, como se pode ver em seu texto intitulado “An Attempt Towards a Chemical Conception of the Ether” (Mendeleev, 1904). Nesse artigo, Mendeleev propôs que o *éter* que preencheria o espaço seria um elemento químico muito leve, da família dos gases nobres, e procurou explicar a radioatividade como um movimento do *éter* em torno de átomos pesados. Assim, negou veementemente a desintegração ou transmutação dos elementos químicos (Bensaude-Vincent, 1986, p. 17).

Bensaude-Vincent afirmou que um aspecto original e fundamental no trabalho de Mendeleev foi a distinção entre os conceitos de elemento químico e de substância simples, como ele próprio explicou, por exemplo, em texto publicado em 1879 no periódico *Chemical News*:

Até Laurent e Gerhardt, as palavras “molécula”, “átomo”, e “equivalente”, foram usadas umas pelas outra, indiscriminadamente da mesma maneira, de modo que agora os termos “corpo simples” e “elemento” são frequentemente confundidos um com o outro. Entretanto, cada um deles eles

possui um significado distinto, que é necessário frisar, de modo a prevenir a confusão de termos na química filosófica. Um corpo simples é alguma coisa material, metal ou metalóide, dotada de propriedades físicas e capaz de reagir quimicamente. A ideia de molécula corresponde à expressão de um corpo simples (...). Mas, em oposição a isso, o nome “elemento” deve ser reservado para caracterizar as partículas materiais que formam os corpos simples e compostos, e que determinam seu comportamento dos pontos de vista químico e físico; a palavra “elemento” lembra a ideia de um átomo; carbono é um elemento; carvão, diamante e grafita são corpos simples. (Mendeleev *apud* Bensaude-Vincent, 1986, p. 11).

A proposta de Mendeleev, do elemento como sendo um material invisível e abstrato, se contrapõe ao conceito empírico de substância elementar de Lavoisier, definido de maneira puramente negativa, como “substâncias que não se pode decompor por nenhum meio”. Assim, na concepção de Mendeleev, o peso atômico se tornou um critério positivo para caracterizar um elemento químico (Bensaude-Vincent, 1986, pp. 10 – 12).

Bensaude-Vincent também discutiu o estatuto filosófico da lei periódica para Mendeleev. Para ser uma verdadeira lei natural, a lei periódica deveria ser absolutamente geral, isto é, não admitir exceções; além disso, deveria ser capaz de propiciar a descoberta de novos dados e a compreensão de fenômenos até então inexplicados. Ao analisar esse aspecto, Bensaude-Vincent afirmou: “Mendeleev... extraiu muitas consequências lógicas de sua lei... Ela reforçava a teoria atômica, ao dar um significado químico à noção abstrata de átomo”. A autora acrescentou: “... em uma espécie de retroalimentação, ela [*a lei periódica*]

reforçou alguns pontos teóricos que ainda estavam em discussão”, referindo-se à teoria atômica e à determinação de valências dos elementos (Bensaude-Vincent, 1986, p. 15). Assim, tem-se aqui uma conclusão um tanto diferente daquela a que chegou Kaji: enquanto este afirmou que Mendeleev preferia não se comprometer com a teoria atômica, por entendê-la ainda especulativa, Bensaude-Vincent entendeu que Mendeleev via na lei periódica um reforço para a teoria atômica.

A historiadora da ciência finalizou seu artigo destacando a importância do conceito de elemento químico no trabalho de Mendeleev:

O sistema periódico aconteceu como o ponto culminante da química do século XIX. Ele resumizou o progresso da química e determinou seu desenvolvimento posterior até que atingiu seu limite... O planejamento do sistema começou no início da década de 1860, a partir de uma preocupação pedagógica, e foi amadurecido por um longo período, envolvendo uma visão filosófica definitiva da matéria, bem como escolhas epistemológicas... Com sua firme crença em elementos individuais, Mendeleev foi um homem do seu século... [O] sistema de Mendeleev foi extraordinariamente frutífero ao longo do século XX. Mas, sua relevância bem pode ser devida à definição de elemento químico proposta por Mendeleev (Bensaude-Vincent, 1986, p. 17).

Nathan M. Brooks

Nathan Brooks escreveu um capítulo dedicado a *Principles of Chemistry* no livro *Communicating Chemistry – textbooks and their audiences, 1789 – 1939*, cuja temática se refere ao estudo de livros didáticos sob o ponto de vista da história da ciência. Brooks iniciou seu texto destacando a influência do livro de Mendeleev, tomando como exemplo o depoimento de um estudante da Escola Técnica de Moscou, que relatou como ele e um grupo de colegas se decidiram a estudar química a partir da leitura de *Osnovy khimii*.

Segundo Brooks, Mendeleev é bem conhecido fora da Rússia por haver proposto a periodicidade das propriedades dos elementos, mas a conexão entre esse feito e a produção do livro didático, *Principles of Chemistry*, ainda seria pouco conhecida. Brooks defendeu que:

Mendeleev foi bem sucedido em produzir um sistema [periódico] viável, onde seus predecessores falharam, precisamente *porque* ele estava escrevendo um livro didático e, por isso, estava olhando para as questões de uma perspectiva diferente (Brooks, 2000, p. 296. Grifo no original).

Assim, para Brooks, o caminho para a proposição da lei periódica foi moldado a partir das necessidades pedagógicas surgidas quando Mendeleev assumiu uma cátedra na Universidade de São Petersburgo e começou a lecionar um curso introdutório de Química. Nas palavras do próprio Mendeleev:

Comecei a escrever [*Principles of Chemistry*] quando comecei a ensinar química inorgânica na universidade, após a saída de Voskresenskii⁵, e quando, após ter consultado todos os livros, não encontrei nada que pudesse recomendar aos alunos. Muitos amigos, como Florinskii e Borodin, também me fizeram escrevê-lo (Mendeleev, *apud* Brooks 2000, p. 301).

Dessa forma, Mendeleev teria buscado adotar uma perspectiva mais abrangente do que a encontrada nos livros didáticos que consultou. Como parte de sua estratégia, procurou encontrar uma lei geral que auxiliasse a organização do conhecimento químico. A esse respeito, Mendeleev escreveu, cerca de um ano antes de anunciar a lei periódica:

Sem a descoberta de leis precisas... é impossível esperar sucessos futuros para a teoria da nossa ciência. O estudo exclusivo de relações quantitativas, que hoje representam o principal tema das investigações químicas, não é capaz de conduzir à solução das tarefas fundamentais da química, e sempre será caracterizado pela parcialidade. Mas é necessário notar que esta parcialidade é determinada não apenas por razões históricas, mas também pela própria essência da matéria: relações quantitativas são mais simples do que relações qualitativas (Mendeleev, 1868 *apud* Brooks 2000, p. 301).

⁵ Alexandr Abramovich Voskresenskii (1809-1880), importante químico orgânico russo, foi professor de Mendeleev e o antecedeu na Universidade de São Petersburgo. Entre suas pesquisas, está a descoberta do ácido quínico e da quinona.

Mendeleev manifestou, assim, a necessidade de desenvolver relações qualitativas em química, como forma de se alcançar uma lei geral nessa ciência.

Em seu texto, Brooks procurou resumir o caminho exposto por Mendeleev em *Principles of Chemistry*, que o teriam levado à lei periódica – com destaque para a ideia de que a comparação entre as famílias de elementos diferentes, e não apenas a comparação entre elementos semelhantes, é que teria sido o passo decisivo de Mendeleev rumo ao conceito de periodicidade.

Brooks também observou que, ao leitor moderno, pode parecer estranho que Mendeleev apresente a discussão da lei periódica não no início, mas no meio do livro. Porém, Brooks justifica que o objetivo de Mendeleev foi exatamente o de mostrar ao leitor como o sistema de classificação periódica foi desenvolvido a partir de um grande número de fatos químicos. Segundo Brooks, Mendeleev não teria feito “mudanças substanciais na organização de seu livro” ao longo das oito edições publicadas durante sua vida (Brooks, 2000, p. 307), pois essa organização teria uma finalidade didática. As diferentes edições teriam recebido apenas acréscimos, pois Mendeleev procurava sempre atualizar seu livro com os novos fatos descritos na literatura, incluindo os usos industriais e agrícolas da química. Essa visão sobre as várias edições de *Principles of Chemistry*, manifestada não apenas por Brooks, mas também por outros autores, foi criticada por Masanori Kaji. Kaji analisou a organização dos conteúdos nas oito edições, e descreveu o que considerou “mudanças substanciais” entre elas, especialmente na terceira e na quinta edições (Kaji, 2002, pp. 10 – 11). Para Kaji, a ideia de que o livro teria sofrido poucas alterações se deveu, em parte, ao fato de que muitos historiadores ocidentais utilizaram apenas traduções das últimas edições de

Principles of Chemistry, ou não se aprofundaram na análise da organização das diferentes edições (Kaji, 2002, p. 15).

Michael D. Gordin

Na introdução do artigo “The organic roots of Mendeleev’s periodic law” (2002), Gordin ressalta que há poucos trabalhos desenvolvidos que tratem das raízes sociais e conceituais do sistema periódico, sendo este um dos temas de sua discussão.

Muitos foram os embates científicos do século XIX, gerados por diferenças conceituais e epistemológicas. Na química, havia controvérsias decorrentes de fatores como a existência de convenções diferentes para a química orgânica e a inorgânica, e também a confusão entre pesos equivalentes e pesos atômicos.

A Teoria dos Tipos, da qual Gerhardt e Laurent eram adeptos, teve grande importância na química orgânica do século XIX. De acordo com essa teoria, os compostos orgânicos eram classificados como se pertencessem a “famílias”, cada uma das quais definida como se fosse derivada de uma substância considerada como “tipo”. Os tipos eram: a amônia, a água, o hidrogênio e o cloreto de hidrogênio. Cada tipo seria constituído por radicais; por exemplo, a água seria formada por dois radicais hidrogênio unidos a um radical oxigênio. Cada radical poderia ser substituído por outro radical que tivesse o mesmo poder de combinação (mesma valência) (Gordin, 2002). Por exemplo, a substituição de um radical hidrogênio da água por um radical metila ($\text{CH}_3 -$) daria origem ao álcool metílico. Se os dois radicais hidrogênio da água fossem substituídos por radicais

etila ($\text{CH}_3\text{CH}_2 -$), formar-se-ia o éter dietílico. Assim, os alcoóis, éteres, e também os ácidos orgânicos (como o acético) eram entendidos como derivados do tipo água. O tipo hidrogênio, por sua vez, era constituído simplesmente por dois radicais hidrogênio; a substituição de um deles por um radical etila, por exemplo, daria origem ao etano. Ou seja, o que chamamos hoje de alcanos seriam derivados do tipo hidrogênio. Analogamente, a substituição do radical hidrogênio, do tipo cloreto de hidrogênio, por radicais alquila, daria origem ao que hoje chamamos de cloretos de alquila. Do tipo amônia resultariam as aminas.

Os próprios Gerhardt e Laurent manifestavam dúvidas em relação à utilização pedagógica dessa teoria. Para Gerhardt, ela somente seria entendida por aqueles que já tivessem conhecimentos de química; para Laurent, a teoria carecia de uma ideia abrangente (Gordin, 2002).

A Teoria dos Tipos também influenciou as pesquisas de Mendeleev. Desde sua dissertação de mestrado, Mendeleev demonstrou interesse em relacionar as propriedades internas à estrutura externa de minerais. Influenciado por Gerhardt, ele concluiu que os volumes específicos eram o melhor meio para investigar a influência da composição na forma. Também ao escrever seu livro de química orgânica, Mendeleev propôs a “Teoria dos Limites”, uma forma modificada da Teoria dos Tipos e que, segundo Gordin, era a peça central daquele trabalho.

Com o avanço da síntese de novos compostos orgânicos, a Teoria dos Tipos foi sendo superada. Kekulé, em 1857, propôs a existência de um quinto tipo, o metano, que se tornou necessário para explicar a existência de três isômeros de fórmula $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ (dois álcoois e um éter) e, posteriormente, a noção de cadeia de átomos de carbono. Com o passar do tempo, a Teoria Estrutural foi se

mostrando mais adequada para lidar com as observações feitas pelos químicos orgânicos.

Gordin destacou a importância do Congresso de Karlsruhe, no qual Cannizzaro aconselhou a utilização da hipótese de Avogadro para fundamentar a revisão dos pesos atômicos. Sem os novos valores de pesos atômicos, não teria sido possível para Mendeleev ordenar o sistema periódico. Para Mendeleev, a reforma proposta por Cannizzaro foi a conclusão do trabalho de Gerhardt na determinação de pesos atômicos.

Após as grandes mudanças sofridas na Química, com as novas definições de peso atômico, átomo, molécula, valência, que resultaram do Congresso de Karlsruhe, surgiu a necessidade de obras didáticas atualizadas. A Rússia ainda era carente de publicações em química no idioma nacional. Gordin aponta que a obra *Principles of Chemistry* surgiu do entendimento de Mendeleev em atender as necessidades da sociedade russa por um livro que sintetizasse didaticamente a química inorgânica, e também da possibilidade de obter lucros consideráveis com sua venda para estudantes em todo o território russo.

Na primeira edição de seu livro, em 1869, Mendeleev escreveu uma definição de química:

[A Química] é uma ciência natural que descreve os corpos homogêneos, estuda os fenômenos específicos pelos quais esses corpos sofrem transformações em novos corpos homogêneos; e, como uma ciência exata, se esforça... em atribuir peso e medida para todos os corpos e fenômenos, e reconhecer as leis

numéricas exatas que governam a variedade das formas estudadas por ela (Mendeleev, 1869, *apud* Gordin 2002, p. 276).

Gordin ressalta que, nessa definição de química, Mendeleev não utilizou o conceito de elemento, nem o de combinações químicas – sendo que o primeiro viria a ser fundamental na formulação da lei periódica. No segundo volume de sua obra, Mendeleev apresentou seu novo método de organização dos elementos químicos:

Tendo procedido à compilação de um guia para a química, chamado *Principles of Chemistry*, tive que organizar os corpos simples em algum tipo de sistema tal que sua distribuição não fosse regida por acidentes, por palpites intuitivos, mas por algum princípio definido exato. [Em química contemporânea], vemos a quase completa ausência de relações numéricas no estabelecimento de um sistema de corpos simples; mas é claro que qualquer sistema baseado em números observados com exatidão irá dessa maneira merecer preferência sobre outros sistemas que não tenham fundações numéricas, deixando pouco espaço para a arbitrariedade (Mendeleev, 1869, *apud* Gordin, 2002, pp. 277 – 278).

Mendeleev utilizou os pesos atômicos como marcadores numéricos para proceder a sua organização. Gordin cita Kedrov⁶ para analisar a forma como os

⁶ B. M. Kedrov, *Den' odnogo velikogo otrytiia* (Moscou, 1958).

elementos foram dispostos na tabela de Mendeleev. Kedrov argumentou que, apesar de os historiadores pressuporem que Mendeleev organizou os elementos em ordem crescente de seus pesos atômicos, o sistema periódico foi organizado a partir da construção de grupos e posteriores comparações entre os mesmos, e não pela construção dos períodos. Esta forma de construção da tabela, em grupos, pode ser interpretada como tendo sido inspirada pela Teoria dos Tipos, que Mendeleev já havia utilizado em seu livro de química orgânica.

Gordin afirma que a caracterização de elementos típicos foi central para a proposição do sistema periódico, e Mendeleev manteve o conceito de elementos típicos até 1898. Primeiramente, os elementos típicos foram escolhidos, e somente depois Mendeleev teria notado a regularidade no espaçamento das famílias. Em *Principles of Chemistry*, Mendeleev expôs primeiramente as propriedades do hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, carbono, halogênios e metais alcalinos – que eram, fundamentalmente, os elementos típicos – e, posteriormente, após analisar suas propriedades e relações, apresentou o sistema periódico (Gordin, 2002).

Gordin aponta que a Teoria dos Tipos não incluía especulações sobre a composição das moléculas. Segundo Gordin, haveria uma correlação direta entre essa característica e a hostilidade de Mendeleev em discutir a possibilidade de decomposições ou as subestruturas dos elementos, como sugerido pela hipótese de Prout, por exemplo:

O objetivo, tanto da Teoria dos Tipos, quanto do original sistema periódico de Mendeleev, foi ordenar as múltiplas entidades

químicas em um pequeno número de categorias amplas, sem maiores especulações físicas (Gordin, 2002, p. 287).

Ao discutir as concepções de Mendeleev a respeito da teoria atômica, Gordin concorda com Kaji quanto à não aceitação, por Mendeleev, da existência de átomos físicos. Gordin ressalta que, apesar de o sistema periódico poder ser visto como uma consequência do apoio do químico russo ao atomismo, Mendeleev observara, em sua tese de mestrado de 1856, que a hipótese atômica era uma explicação útil, mas que até aquele momento não havia atingido a confiabilidade necessária. Gordin cita dois fragmentos de outros textos, também destacados por Kaji, nos quais Mendeleev novamente manifesta suas dúvidas em relação à realidade física dos átomos (Kaji, 2002, pp. 6 e 10; 2003, p. 200). Diferente de Kaji, porém, Gordin afirma que Mendeleev passa a aceitar o atomismo somente em 1903, como uma “generalização superior” devido a sua valiosa utilidade pedagógica⁷.

Eric Scerri

No artigo “Some Aspects of the Metaphysics of Chemistry and the Nature of the Elements” (2005), Eric Scerri traçou um paralelo entre a definição de elemento químico de Mendeleev e Paneth (elemento como uma substância fundamental) e a concepção de Kripke e Putnam (elementos como espécies naturais).

⁷ Citado por Gordin a partir de D. I. Mendeleev, “Periodicheskaia zakonnost khimicheskikh elementov” (1871), e da sétima edição de *Principles of Chemistry*, 1903, vol. II, p. 448.

Scerri discute inicialmente a questão do reducionismo, segundo o qual seria possível reduzir a química à mecânica quântica, e que teria prejudicado sensivelmente as discussões metafísicas em química. Rejeitando o reducionismo, Scerri aponta novos caminhos para a metafísica da química (Scerri, 2005, p. 128).

Scerri caracteriza como metafísica, no sentido literal, a concepção dos elementos como substâncias não observáveis. Esta visão pode ser encontrada entre os antigos filósofos gregos, por exemplo, mas encontrou adeptos até algumas décadas atrás, ainda que modificada. Uma questão importante se refere a como os elementos subsistem após uma combinação química. Nesse sentido, o elemento pode ser considerado como uma “substância simples”, podendo ser isolada e ter variadas formas estruturais; ou, alternativamente, o elemento pode ser considerado como uma “substância fundamental”, portadora de propriedades, mas, ao mesmo tempo, desprovida de propriedades.

Scerri observa que, para Lavoisier, os elementos seriam “substâncias simples”, que poderiam ser isoladas e observadas. Para Mendeleev, por outro lado, a classificação periódica estava comprometida com o elemento químico como substância fundamental e não como substância simples e observável. Segundo Mendeleev, entretanto, o elemento não seria desprovido de propriedades: ele teria como atributo seu peso atômico, que seria individual e, portanto, permitiria diferenciar os elementos uns dos outros. Scerri acrescenta que a diferenciação entre substância simples e substância fundamental foi de extrema importância para Mendeleev, e que em *Principles of Chemistry* há várias passagens onde este tema é amplamente discutido. O seguinte fragmento é representativo:

É útil, nesse sentido, fazer uma distinção clara entre a concepção de um elemento como uma substância homogênea *separada*, e como uma *parte material*, mas invisível, de um composto. O óxido de mercúrio não contém dois corpos simples, um gás e um metal, mas dois elementos, mercúrio e oxigênio, os quais, quando livres, são um gás e um metal. Nem o mercúrio, como um metal, nem o oxigênio, como um gás, estão contidos no óxido de mercúrio, que somente contém a substância dos elementos, assim como o vapor somente contém a substância de gelo, mas não o gelo em si, ou como o milho contém a substância da semente, mas não a semente em si (Mendeleev, 1891, *apud* Scerri, 2005, pp. 129 – 130).

Avançando para o século XX, Scerri destaca a distinção feita por Paneth, seguindo Mendeleev, para quem o elemento, como substância fundamental, sobrevive em uma combinação; uma substância simples, porém, ao se combinar com outra, não conserva suas propriedades. Com o advento do trabalho de Moseley⁸, Paneth (1962) propôs a mudança do conceito de elemento como substância fundamental: antes caracterizada por seu peso atômico, passou a ser caracterizada por seu **número** atômico.

Paneth contrastou uma visão macroscópica dos fenômenos físicos, que ele próprio chamou de realismo ingênuo, com uma visão microscópica, que seria uma

⁸ Henry Moseley (1887-1915) publicou, em 1913, os resultados de suas medições dos comprimentos de onda do espectro de raios-X de vários elementos químicos. Estas medições mostraram que a ordenação dos comprimentos de onda da emissão de raios-X dos elementos coincidia com a ordenação dos elementos conforme seu número atômico. Com a descoberta dos isótopos dos elementos, foi possível observar que o peso atômico não era o fator decisivo para a classificação periódica, como fora proposto por Mendeleev, Meyer e outros. Após o trabalho de Moseley, as propriedades dos elementos passaram a ser vistas como funções periódicas de seus números atômicos, entendidos como o número de cargas positivas nos respectivos núcleos atômicos (<http://www.chemistry.co.nz/mendeleev.htm>).

visão reducionista da química à física. Analogamente, haveria um contraste entre os elementos concebidos como substâncias simples (visão associada ao realismo ingênuo) e os elementos como substâncias fundamentais (visão metafísica, na qual os elementos seriam inobserváveis). Segundo Paneth, os químicos precisariam abandonar a visão realista ingênua e assumir a visão metafísica, considerando que o elemento, como uma substância fundamental inobservável, persiste em um composto após sua combinação com outros elementos (Scerri, 2005).

A visão dos elementos, proposta por Paneth, pode servir para iluminar uma série de questões da filosofia da ciência contemporânea, bem como da química. Mas, antes de fazer isso, é importante resumir a mudança de visão de elemento como substância básica dos antigos gregos para as visões de Mendeleev e Paneth. Para alguns filósofos gregos, os elementos como substâncias fundamentais eram totalmente inobserváveis. Para Mendeleev, os elementos como substâncias fundamentais permaneceram "invisíveis", para referenciar sua própria palavra, mas foram caracterizados por uma propriedade principal, ou seja, o peso atômico. Poderia parecer que os elementos como substâncias fundamentais perderam sua característica totalmente metafísica de serem totalmente inobserváveis e desprovidos de propriedades, uma vez que agora possuem um atributo importante. Da mesma forma, a compreensão de Paneth de elementos como substâncias fundamentais não implicou na inobservabilidade completa, e não foi uma visão radicalmente metafísica, no sentido literal mencionado anteriormente. Para Paneth, os elementos

como substâncias básicas possuíam um atributo importante, ou seja, o número atômico (Scerri, 2005, p. 131).

De acordo com Scerri, haveria outra abordagem para a questão dos elementos como entidades fundamentais da química ou espécies naturais. Essa abordagem analisa a relação existente entre a linguagem e a realidade, utilizando como referencial teórico os estudos de Kripke e Putnam.

No contexto da posição filosófica de que os fatos sobre o mundo consistem em relações causais objetivas no mundo, e não construtos mentais dos observadores, é que pode ser entendido o surgimento da teoria da referência causal de Kripke e Putnam. Afirma-se que os nomes que designam espécies naturais não têm sua extensão determinada por conceitos descritivos, mas por uma cadeia causal que tem início no ato de nomear um objeto exemplar. Assim, Kripke entende os substantivos como “designadores rígidos”. Por exemplo, se “ouro” é um designador rígido, ele se refere sempre ao mesmo material, independente de sua aparência superficial. “Ouro” designa o elemento de número atômico 79, e não será a descrição das características de ser brilhante ou maleável que determinará se uma substância será ouro ou não (Scerri, 2005, pp. 131 – 132). Nesse contexto, Scerri observa que o referente do termo é fornecido pelas pesquisas científicas mais recentes; no exemplo em questão, o referente seria um elemento químico definido por seu número atômico. Dessa forma, Kripke e Putnam adotam a definição de Paneth para o elemento químico, em termos do número atômico, por ser a definição científica de elemento utilizada no presente momento.

Scerri, ao relacionar as concepções de Mendeleev e Paneth com a teoria da referência causal, observa que, em ambos os casos, os elementos químicos não possuem propriedades observáveis. Para Kripke e Putnam, o número atômico seria o critério da química moderna que estaria relacionado à cadeia causal do elemento, e para Paneth, o número atômico característico do elemento, seria inobservável macroscopicamente. Mesmo considerando tratar-se de duas abordagens metafísicas distintas, elas convergem no ponto em que os elementos são classificados como substâncias fundamentais.

Scerri também destaca que Paneth, ao associar a essência metafísica dos elementos às substâncias fundamentais, livrou o sistema periódico de uma crise. A descoberta dos isótopos⁹ dos elementos poderia ser interpretada como a descoberta de novos elementos químicos, ou seja, o número de unidades fundamentais parecia ter-se multiplicado. Se essa interpretação prevalecesse, seria muito difícil acomodar todas essas “unidades fundamentais” na tabela periódica. Os trabalhos desenvolvidos por George Hevesy (1885-1966), porém, demonstraram que todos os isótopos de um determinado elemento apresentavam as mesmas propriedades químicas. Paneth conseguiu resolver o problema gerado pela aparente multiplicidade de átomos, considerando os isótopos de um elemento como constituindo uma mesma substância simples, e sendo caracterizados por seus pesos atômicos. Os elementos químicos, por sua vez, como substâncias fundamentais, foram caracterizados somente por seus números atômicos (Scerri, 2005, pp. 133 – 134).

⁹ Isótopos são átomos que apresentam diferentes massas atômicas, mas igual número de cargas positivas em seus núcleos (ou seja, iguais números atômicos).

Esta breve revisão da literatura a respeito da temática em questão, longe de pretender ser exaustiva, procurou situar o estado atual dos estudos a respeito das concepções de átomo e de elemento químico na obra de Mendeleev. Considerando os trabalhos desses historiadores e filósofos da ciência, e as leituras que fizemos dos textos de Mendeleev, observamos que poderíamos aprofundar um pouco mais um aspecto das discussões feitas pelo químico russo: a analogia entre os sistemas planetários (como o sistema solar) e as moléculas. Acreditamos ser esta analogia uma interessante ilustração da concepção que Mendeleev tinha dos átomos. Antes, porém, de passar para o aprofundamento deste aspecto particular, consideramos relevante apresentar um pouco da trajetória profissional de Mendeleev, que o insere no contexto de sua época, e alguns antecedentes que ajudam a entender o conceito de átomo no século XIX. É o que se apresenta nos dois capítulos que se seguem.

Capítulo 2 – Mendeleev e seu tempo

A Rússia de Mendeleev

O processo de construção das ideias de Mendeleev pode ser mais bem compreendido no contexto de sua formação intelectual ao longo do século XIX. Assim, apresentamos a seguir um breve esboço biográfico de Mendeleev, procurando situá-lo no ambiente político e social que o envolvia, e não nos atendo somente ao desenvolvimento da Tabela Periódica.

Rússia. Possivelmente o mais vasto dos impérios, sempre foi um mistério para geógrafos e antropólogos. O que une a aristocracia de Moscou com os povos do Cáucaso, as tribos da Sibéria e da Mongólia ou os moradores da Costa do Pacífico? Trata-se de um império europeu ou asiático? Ortodoxo ou muçulmano? Ocidental ou oriental? Os grandes escritores do século XIX – Tolstoi, Dostoievski, Pushkin, Gogol... – nos apresentam de forma magistral o grande drama da Rússia: Moscou e São Petersburgo tratando de se incorporar à Europa, porém incapazes de arrastar consigo as vastas planícies da estepe, frias e desabitadas, campesinas e ignorantes. No século XIX, a Rússia é uma grande maquinaria burocrática que tenta ordenar e unificar, de algum modo, a inabarcável diversidade de seus povos (Navarro, 2006).

Desde o século XIV, os soberanos russos lutaram para aumentar seu poderio e seus domínios territoriais. A Sibéria foi conquistada pelo poder russo entre os anos 1580 e 1585, quando o território foi anexado aos domínios do Czar Ivan IV¹⁰. A Sibéria é um grande território localizado a leste dos Montes Urais, incluindo o Extremo Oriente russo, até a costa do Pacífico, e do sul do Oceano Ártico até as fronteiras russas na Ásia Central, com Mongólia e China. Por ser uma província subdesenvolvida e geograficamente afastada de Moscou, tornou-se local para exílio político no período do Império Russo^{11,12}.

Figura 2 – Mapa da Sibéria. (Extraído da página <http://www.carmenarnaumuro.com/images/JORNADAS/mapas/mapa2.jpg>)

¹⁰ Alguns detalhes desta cronologia foram obtidos em: en.wikipedia.org/wiki/Siberia.

¹¹ <http://www.ikz.ru/siberianway/engl/tobolsk-history/ssylka.html>

¹² “Os exilados mais famosos foram os decembristas, um grupo majoritariamente composto por nobres que pediram o fim da servidão e a autocracia, e que se recusaram a jurar lealdade ao novo czar, Nicolau I. Em 14 dezembro de 1825, os decembristas organizaram um levante na Praça do Senado, em São Petersburgo. Este levante foi esmagado em poucas horas e os conspiradores foram imediatamente enforcados ou exilados para a cidade de Irkutsk na Sibéria oriental, que posteriormente se transformou em uma potência econômica e cultural da região. Pode-se supor que o exílio na Sibéria, além de uma política penal como foi testemunhado pelos campos de trabalho forçado parecia ter também um aspecto político de desenvolvimento econômico” (http://www.sras.org/eastern_siberia).

Segundo Anderson (1994), o desenvolvimento do Leste europeu sempre esteve muito aquém daquele que ocorreu na Europa Ocidental. O oriente europeu viveu um longo período de servidão, entre os séculos XV e XVIII – sendo este, posterior ao período feudal do ocidente da Europa – que ocorreu entre os séculos IX ao XIV. Esse feudalismo tardio teria sido um dos principais fatores para o notável atraso no crescimento econômico e social do Leste europeu. Culturalmente, como foi retratado por Cambroner e Mrowczynski-Van Allen, a civilização russa foi separada do devir do restante do continente pela dominação dos tártaros, e, dessa forma, não conheceu o Renascimento. Ao emergir desse período de dominação, deparou-se com o sistema despótico dos príncipes moscovitas.

Contrastando com o atraso político e cultural siberiano, Tobolsk, fundada em 1587, foi um dos principais centros de colonização russa na Sibéria. Devido a sua localização geográfica – ao longo de uma importante via fluvial para o leste – foi um centro comercial de destaque e lugar de grande circulação na Sibéria nos séculos XVIII e XIX. Por ser a capital da Sibéria, a cidade atraiu muitos soldados, artesãos, comerciantes e oficiais de estado. Tal diversidade contribuiu para que Tobolsk se tornasse importante centro espiritual e cultural siberiano¹³. Lojas foram abertas e pequenas indústrias começaram a se instalar em seus arredores, acelerando o crescimento urbano.

¹³ Esse período de prosperidade culminou o crescimento iniciado no final do século XVII, quando o Czar Pedro I subiu ao trono. Pedro I, o “Grande Reformador”, mudou o panorama da Rússia do século XVIII, transformando o país agrário-feudal, à margem da cultura européia, numa das potências de primeira linha do século XVIII. (<http://www.ikz.ru/siberianway/engl/tobolsk-history/capital.html>)

No início do século XVIII, a primeira escola da Sibéria foi aberta em Tobolsk, na qual somente os filhos de militares e funcionários do estado podiam desenvolver seus estudos. Em meados desse mesmo século, várias escolas secundárias particulares foram abertas, atendendo a crianças de todas as classes sociais¹⁴. Esse período foi marcado também pela impressão do primeiro livro na Sibéria, e posteriormente pela circulação de periódicos que alcançaram grandes tiragens.

Figura 3 - Tobolsk, 1802.
(Fonte: <http://www.ikz.ru/siberianway/engl/tobolsk-history/ncentury.html>)

¹⁴ <http://www.ikz.ru/siberianway/engl/tobolsk-history/education.html>

Mendeleev: esboço biográfico

Foi neste ambiente de crescimento e desenvolvimento cultural que nasceu Dmitri Ivanovitch Mendeleev, na aldeia de Verhnie Aremzyani, perto da cidade de Tobolsk, em 8 de fevereiro de 1834. Filho de Ivan Pavlovich Mendeleev e Maria Dmitrievna Mendeleeva, Dimitri era o caçula de uma família de 14 filhos. Maria Mendeleeva, após a morte de seu marido, teve como responsabilidade prover o sustento de seus filhos, assumindo a direção da fábrica de vidros de sua família¹⁵. Autodidata e conscienciosa da importância do aprendizado e formação intelectual, Maria esmerou-se em conseguir uma colocação para o filho Dimitri após a finalização de seus estudos na escola secundária de Tobolsk.

Em 1848, após a perda de sua fábrica de vidros, consumida por um incêndio, Maria Mendeleeva seguiu para Moscou, com o intuito de matricular seu filho mais novo na Universidade local. Porém, devido a problemas políticos, não estavam sendo aceitas matrículas de alunos que não fossem de Moscou. Retornando à cidade de São Petersburgo, no ano de 1850, sua mãe conseguiu matricular Mendeleev no Instituto de Pedagogia, onde ingressou aos 16 anos. Meses depois, Maria Mendeleeva faleceu, devido a complicações decorrentes de tuberculose. Mais tarde, Mendeleev, ao escrever um manual sobre soluções, não deixou de expressar sua gratidão pelo empenho da mãe em sua formação:

¹⁵ A família de Mendeleev instalou uma das primeiras fábricas de vidro de Tobolsk. Maria, ao assumir a direção da fábrica, promoveu a alfabetização dos funcionários que não tinham instrução.
(<http://web.archive.org/web/20060422084428/http://www.bgsu.edu/departments/chem/MUCT/Mendeleev.html>. Acesso em 06/2009.)

Esta investigação é dedicada à memória de uma mãe por seu filho mais novo. Conduzindo uma fábrica, ela pôde educá-lo somente por seu próprio trabalho. Ela instruiu pelo exemplo, corrigiu com afeto, e a fim de dedicá-lo à ciência, ela deixou a Sibéria com ele, gastando assim seus últimos recursos e forças.

Em seu leito de morte ela disse, 'Evite ilusões, insista no trabalho e não em palavras. Pacientemente procure as verdades divina e científica'. Ela compreendeu com que frequência os métodos dialéticos enganam, quanto existe ainda para ser aprendido, e como, com a ajuda de ciência sem violência, com carinho mas com firmeza, toda superstição, mentira e erro são removidos, trazendo em seu lugar a segurança de uma verdade desconhecida, a liberdade para o desenvolvimento adicional, bem-estar geral, e felicidade interior. Dmitri Mendeleev considera como sagradas as últimas palavras de uma mãe. (Tilden, 1921, pp. 240 - 258.)

Ainda estudante, Mendeleev publicou seu primeiro artigo científico, sobre a análise de alguns minerais da Finlândia¹⁶. Sua tese de graduação, em 1854, sobre o isomorfismo, foi concebida a partir das análises de minerais, e propiciou a Mendeleev a obtenção do grau de professor sênior.

Acometido também por tuberculose, Mendeleev mudou-se para Simferopol, na Península de Criméia, com o objetivo de se tratar dessa enfermidade. Nessa

¹⁶ Acerca das análises da ortita e do piroxeno da Finlândia, seu trabalho foi considerado um desenvolvimento na análise de minerais (Kaji, 2003).

cidade, dando continuidade a sua formação, tornou-se mestre em ciências, aos 22 anos de idade.

Em 1856, ao retornar a São Petersburgo, defendeu sua tese de mestrado "Pesquisa e Teorias na Expansão de Substâncias devido ao Aquecimento".¹⁷ Mendeleev foi convidado a lecionar no Instituto Tecnológico de São Petersburgo, onde continuou a desenvolver suas atividades de pesquisa. Sua dedicação à carreira docente e grande preocupação com a educação se tornam marcantes desde essa época, e vão se prolongar por toda sua vida profissional. .

Em 1859, o governo russo consentiu que Mendeleev fosse a Paris realizar estudos com o físico Regnault¹⁸. Em Paris, Mendeleev investigou a densidade dos gases e sua temperatura crítica, definindo o ponto absoluto de ebulição como a temperatura em que a coesão e o calor da vaporização equivalem a zero, e o líquido se transforma em vapor independentemente da pressão e do volume¹⁹. Porém, suas pesquisas não foram prontamente aceitas pela academia, ficando o conceito de temperatura crítica dos gases como mérito do trabalho de Thomas Andrews.²⁰

¹⁷ Nesse trabalho, Mendeleev adotou o sistema de pesos atômicos de Charles Gerhardt (1816-1856) e Auguste Laurent (1808-1853), e também a hipótese de Avogadro (1776-1856) (Kaji, 2002).

¹⁸ Henri Victor Regnault (1810 – 1878), físico e químico francês. Professor da *École Polytechnique* e do *Collège de France*.

¹⁹ Segundo Berche, Henkel e Kenna, o ponto crítico foi inicialmente definido pelo cientista francês Cagnard de la Tour (1777 – 1859), em 1822. Em dois artigos publicados por esse físico francês, há a descrição de vários experimentos onde se demonstra a existência de uma temperatura limite, acima da qual um líquido permanece no estado de vapor independente da pressão aplicada. Contemporâneos dele consideraram que o conceito sugerido por La Tour se aplicava apenas às substâncias estudadas por ele, e não que se tratava de um fenômeno geral. Mas seu trabalho foi reconhecido por Faraday e diversos cientistas, como Thomas Andrews, Van der Waals, Heike Kamerlingh Onnes, Jules-Émile Verschaffelt, Lev Davidovich Landau e Pierre Curie.

²⁰ Thomas Andrews (1813-1885), físico e químico irlandês nascido em Belfast, professor do *Queen's College* dessa mesma cidade, investigou relações entre volumes, temperaturas e pressões dos gases, enunciando os conceitos de temperatura e pressão

Sua tese de doutoramento, “Acerca dos compostos de álcool com água” ²¹, de 1865 – desenvolvida a partir da observação da variação dos volumes nas soluções de água e álcool, e de suas respectivas características – nos mostra o particular interesse de Mendeleev pelas substâncias então denominadas compostos indefinidos.

Em 1861, Mendeleev retornou à Rússia e voltou a lecionar. Nesse mesmo ano, publicou seu primeiro livro didático, *Organicheskaya Khimiya* (Química Orgânica). Nesse livro, o químico russo expôs sua “Teoria dos Limites”, na qual a classificação dos compostos orgânicos era baseada em seus graus de saturação e suas reações de substituição. Essa teoria teve pouca circulação nos meios acadêmicos, devido ao desenvolvimento, na época, da teoria estrutural dos compostos orgânicos. Em 1871, saiu a primeira edição de seu célebre *Osnovy Khimii* (Princípios de Química), obra também destinada ao ensino de química. ²²

críticas em 1869. Andrews estudou, em profundidade, os trabalhos sobre temperatura crítica feitos por La Tour.

²¹ Este trabalho foi desencadeado pelas pesquisas sobre a capilaridade de líquidos que Mendeleev desenvolveu em seu apartamento enquanto esteve em Heidelberg em 1859 (Gordin, 2002).

²² No prefácio de *Principles of Chemistry*, Mendeleev justifica a elaboração de seu livro, que foi feito para que os estudantes “se familiarizassem não somente com os métodos de observação, os fatos experimentais e as leis da química, como também, com a visão dada por esta ciência para o substrato imutável presente nas variadas formas da matéria” (Mendeleev, 1901, vol.1, p. xiii).

Figura 4 – Retrato de Dmitry Mendeleev 1885.
(Aquarela sobre papel. A Galeria Tretyakov, Moscovo, Rússia)

Mendeleev teve, além disso, papel de destaque na indústria química e na economia russa, no desenvolvimento de novas tecnologias ligadas à agricultura, siderurgia e, principalmente, na área petrolífera. Em meados do século XIX, como o petróleo já era matéria-prima de grande importância econômica, Mendeleev se

empenhou em explorar devidamente o potencial petrolífero russo (Stackenwalt, 1998, pp. 67-84).

Em 1825, o Estado russo havia feito um novo arrendamento das terras onde se encontravam as jazidas de petróleo. Com isso, a produção russa de petróleo sofreu uma diminuição drástica. Entre os anos 1835 e 1872, as jazidas foram leiloadas ao público, o que resultou na formação de um grande monopólio. Stackenwalt ainda ressalta que para Victor Ragozin²³, o governo da Rússia não incentivou o desenvolvimento de sua indústria petrolífera na época, e a produção foi diminuindo continuamente. Nesse período, já se havia iniciado a destilação do petróleo cru, mas o produto final era de custo elevado e baixo rendimento. Em 1860, cerca 90% do querosene utilizado na Rússia, para fins de iluminação, provinha da Pensilvânia, EUA, com baixo custo e boa qualidade.

Buscando fortalecer a indústria petrolífera russa, Mendeleev estudou profundamente a economia alemã, obtendo dados seguros para análise e posterior comparações com a economia de seu próprio país. Pesquisou os processos de fabricação que eram utilizados na Alemanha, para melhor adaptá-los à Rússia.

Nesse período, uma nova geração de químicos surgiu na Rússia. O sistema educacional, especialmente no nível superior, também estava se reorganizando. Um grande número de químicos recorria às instituições

²³ Victor Ivanovich Ragozin (1833 - 1901), foi um historiador da indústria russa e importante empresário do ramo do petróleo, sendo um dos primeiros negociantes desta área. Ragozin criou um laboratório para estudar o conteúdo químico de petróleo e conseguiu produzir um lubrificante mineral denominado "oleonafte" que foi muito utilizado na Rússia e em pouco tempo exportado para outros países. Em suas próprias usinas, utilizou os óleos brancos de Mendeleev. Ragozin também é conhecido como autor de grande número de artigos, relatórios científicos e monografias tendo como tema o petróleo (Mirbabayev, 2010).

acadêmicas em busca de aperfeiçoamento, preparando-se para uma nova fase de desenvolvimento industrial e tecnológico. A Sociedade Química Russa foi organizada em 1868, tendo Mendeleev como um de seus membros fundadores.

Químicos de várias universidades foram contatados para auxiliar no desenvolvimento da indústria petrolífera russa. Mendeleev, ao ser chamado para prestar consultoria em uma das indústrias petrolíferas em Baku, propôs mudanças na tecnologia de transportes, bem como na economia local. Mendeleev se empenhou em acabar com o *lobby* do monopólio dos arrendamentos do petróleo nacional, e lutou pela suspensão das taxas sobre a destilação do petróleo. Infelizmente, suas ideias não foram prontamente aceitas. Foi somente no final da década de 1860 que o governo russo apoiou Mendeleev em seu esforço de estudar a indústria petrolífera ocidental, com o objetivo de fazer melhorias na produção de seu país. Mendeleev viajou aos Estados Unidos para conhecer a produção de petróleo norteamericana e a economia decorrente dessa atividade.

Em 1877, o governo russo finalmente aboliu os impostos sobre a destilação do petróleo, mudando sua política fiscal, o que tornou o petróleo um produto de custo mais acessível. O crescimento da indústria petrolífera russa foi grande após as inúmeras mudanças realizadas, com a eliminação de taxas e a modificação de processos. Mendeleev teve papel decisivo nesse setor da economia russa, ao trabalhar incessantemente por sua modernização (Stackenwalt, 1998).

Mendeleev se casara, em 1862, com Feozva Nikitchna Lascheva, com quem teve dois filhos. Todavia, como seu casamento não o estava satisfazendo, divorciou-se, em 1882, para se casar com Anna Ivanova Popova. Segundo as leis da Igreja Ortodoxa, Mendeleev deveria esperar alguns anos antes de se casar novamente, ou seria considerado bígamo. Porém, devido ao grande prestígio que

o químico possuía em toda a Rússia, ele pôde contrair imediatamente novo matrimônio, no qual teve mais quatro filhos. Consta que o Czar teria dito: “Mendeleev tem duas esposas, sim, mas eu tenho só um Mendeleev” (Simmons, 2003).

Ao falecer, aos 73 anos de idade, Mendeleev havia publicado cerca de quinhentos artigos científicos, nas áreas de química, físico-química, física, tecnologia, economia e geodésica.

Mendeleev ficou mundialmente conhecido pela proposição da lei periódica (1869) e pela organização, numa tabela, dos elementos químicos conhecidos em sua época, de acordo com a periodicidade exibida por suas propriedades quando arranjados em ordem crescente de seus pesos atômicos. Mendeleev ofereceu ainda à ciência e tecnologia russas muitas e variadas contribuições. O presente trabalho está delimitado, porém, a um aspecto do pensamento químico de Mendeleev, relativo aos conceitos de átomo e elemento químico. Para contextualizar devidamente suas ideias, o próximo capítulo será dedicado a delinear os antecedentes desses conceitos, sobre os quais Mendeleev elaborou na segunda metade do século XIX.

Capítulo 3 - A questão dos elementos e dos átomos.

A questão da natureza e da constituição da matéria foi abordada de muitas maneiras ao longo da história. Considerando o pensamento ocidental, observa-se que essa questão estava entre as principais preocupações dos filósofos pré-socráticos. De acordo com Kirk, Raven e Schofield, os primeiros filósofos supunham a existência de “um único material primário, cujo isolamento era o passo mais importante para qualquer relato sistemático da realidade” (Kirk *et alii*, 2003, p. 75). Ou, como observou Zaterka, os filósofos pré-socráticos buscavam “um *princípio* que pudesse fornecer uma origem e uma ordem para a Natureza”, e que desse conta de sua “complexidade, multiplicidade e diferença” (Zaterka, 2006, p. 330. Grifo no original).

Nesse contexto, a ideia de átomo surgiu na filosofia de Leucipo de Mileto (460 - 370 a.C.) e Demócrito de Abdera (470 - 380 a.C.)²⁴, como o princípio constituinte de todas as coisas, aquilo que não poderia ser cortado ou partido, sendo a Natureza constituída por átomos e pelo vazio. Esses filósofos propuseram a existência de átomos com formas, tamanhos e disposições variadas.

²⁴ Chauí explica que, apesar de estes dois filósofos não terem sido contemporâneos, e de diferirem em suas principais preocupações, a razão de serem “colocados juntos (e Demócrito é colocado entre os pré-socráticos) é a existência de um único corpo de doutrina reunido num conjunto de obras, conhecidos como Escola de Abdera, no qual é difícil saber o que foi escrito por Demócrito, e o que é da autoria de outros membros da escola” (Chauí, 2002, p. 119).

Embora nenhuma obra completa dos atomistas da Antiguidade tenha chegado até nós, podemos ter uma ideia a respeito de seu pensamento por intermédio dos comentários feitos por outros autores. Por exemplo, assim Aristóteles nos apresenta concepções atribuídas a Demócrito a respeito da formação dos corpos:

À medida que eles [*i. e., os átomos*] se movem, colidem e emaranham-se de tal forma, que se unem uns aos outros num contato íntimo, mas não tanto, de modo a, na realidade, formarem deles uma substância, seja de que espécie for; pois é uma atitude muito simplista supor-se que dois ou mais podiam alguma vez tornar-se um. A razão que ele apresenta para os átomos permanecerem juntos por algum tempo é o interlaçamento e adesão mútua dos corpos primários; é que alguns deles são angulares, outros recurvos, outros côncavos, outros convexos e, na verdade, com inúmeras outras diferenças; por isso, pensa ele que os átomos se unem uns aos outros e ficam juntos até ao momento em que alguma necessidade mais forte, proveniente do circundante, os agita e dispersa por completo. (Kirk *et alii*, 1990, pp. 449 - 450.)

Vê-se, nesse fragmento, uma explicação para as transformações, em termos de interações entre átomos de diferentes formatos. A filosofia atomista continuou a ser discutida na Antiguidade, e foi adotada e elaborada por autores como Epicuro de Samos (341 – 270 a. C.) e Tito Lucrécio Caro (ca. 99 – ca. 55 a.

C.) Entre as máximas atribuídas a Epicuro sobre os átomos, destacamos as seguintes:

Alguns corpos são compostos, e outros, elementos dos compostos. E estes últimos são indivisíveis e imutáveis, visto que é forçoso que alguma coisa subsista na dissolução dos compostos; se assim não fosse, tudo deveria dissolver-se em nada. São sólidos por natureza, porque não têm nem onde nem como dissolver-se. De maneira que é preciso que os princípios sejam substâncias corpóreas e indivisíveis,

Não é necessário supor que num corpo limitado existam corpúsculos em número infinito nem de qualquer tamanho. Por conseguinte, não só devemos excluir a divisão ao infinito, em partes cada vez menores, para não privarmos o todo da capacidade de resistência e nos vermos constrangidos, na concepção dos compostos, a reduzir os seres ao nada mediante a compressão, como também não se deve supor que nos corpos limitados exista a possibilidade de continuar passando até o infinito a partes cada vez menores. Porque, se se afirma que num corpo existem corpúsculos em número infinito, e em todos os graus de pequenez... [q]ualquer que fosse a grandeza dos corpúsculos, também seria infinita a grandeza dos corpos.

E se deve supor que os átomos não possuem nenhuma das qualidades dos fenômenos, exceto forma, peso, grandeza e todas as outras que são necessariamente intrínsecas à forma. Porque toda a qualidade muda, mas os átomos não mudam, visto que é necessário que na dissolução dos compostos permaneça alguma

coisa de sólido e de indissolúvel que faça realizar as mudanças, não no nada ou do nada, mas sim por transposição. (Epicuro, 1973, pp. 23 – 24.)

Pode-se observar, nesses fragmentos, como a discussão se desenvolve no terreno da lógica, buscando explicações para as intrincadas questões relativas às qualidades dos corpos, da multiplicidade das coisas da Natureza e das transformações. Lucrécio assim resume sua concepção acerca dos átomos:

[H]á corpos que não são compostos de partículas, e são os menores de todos. E, como eles existem, tens de confessar que os elementos são compactos e eternos. Finalmente, se a natureza criadora das coisas costumasse levar tudo a dispersar-se em partes muito pequenas, já não poderia tornar com elas a formar coisa alguma, visto que, não sendo formadas de partículas, não podem ter aquilo de que precisa a matéria criadora – as diversas ligações, os pesos, os choques, os encontros e os movimentos, por meio dos quais tudo se cria. (Lucrécio Caro, 1973, p. 47.)

Fica claro que o panorama conceitual que envolvia essas concepções era completamente distinto daquele da ciência moderna, cujas preocupações, metodologias e objetivos são de outra ordem. As ideias atomistas continuaram a ser discutidas no período medieval, e ganharam renovado impulso com o mecanicismo que emergiu no século XVII²⁵ – já dentro de outra visão de mundo.

²⁵ Sobre o mecanicismo, vide: Westfall 1995.

No primeiro volume do *Principles of Chemistry*, Mendeleev reconheceu a existência de diferenças essenciais entre as concepções dos antigos filósofos e o atomismo de sua época. Segundo o químico russo, os cientistas de seu tempo apenas utilizavam a palavra *átomo* por “empréstimo” dos antigos gregos, para explicar a unidade indivisível de que a matéria é formada. Entretanto, Mendeleev explicou que os cientistas do século XIX possuíam uma visão física e química da individualidade do átomo, diferentemente dos antigos gregos – para quem, na interpretação de Mendeleev, a individualidade do átomo decorria de uma visão “abstrata” da matéria. (Mendeleev, 1901, p. 216. n.31)

Para compreender melhor o panorama em que as ideias de Mendeleev estão inseridas, é preciso mencionar, ainda que brevemente, as importantes modificações experimentadas pelo pensamento químico no final do século XVIII. Nesse período, o químico francês Antoine Laurent Lavoisier (1743 – 1794) propôs uma nova definição para substâncias elementares, que haveria de exercer grande influência sobre a química a partir dali. Essas ideias serão enfocadas a seguir.

Antoine Laurent Lavoisier

Na segunda metade do século XVIII, não existia consenso entre os químicos sobre a natureza das entidades elementares ou princípios, dos quais a matéria seria formada. Alguns autores pensavam ainda em termos dos quatro elementos da tradição aristotélica: terra, água, ar e fogo. Outros elaboravam em torno dos três princípios propostos por Paracelso: enxofre, mercúrio e sal. Ao se

combinar essas ideias com outras, correntes no período, resultavam sistemas com cinco, sete, ou outros números de elementos.

Segundo George Ernst Stahl (1660-1734), por exemplo, haveria cinco princípios: ar, água, terra vítrea, terra mercurial e o flogístico ou terra sulfurosa. Este último princípio seria o responsável pela inflamabilidade dos corpos, sendo perdido quando o corpo entrasse em combustão, sendo disperso pelo ar. Essa teoria foi sendo elaborada ao longo do século XVIII, adquirindo grande poder explicativo e possibilitando também algumas previsões (Alfonso-Goldfarb e Ferraz, 1995).

Os trabalhos que foram desenvolvidos por Lavoisier desde 1768, sobre combustão, calcinação, dissolução dos metais, e a natureza da água, entre outros temas, levaram-no a propor novas teorias sobre eles, as quais representaram uma grande mudança no panorama da química do século XVIII.

Lavoisier, no “Discurso Preliminar” de seu *Traité Elementaire de Chimie*, escreveu que, em seu entendimento, seria uma pré-concepção admitir, como os antigos e alguns de seus contemporâneos, que todos os corpos da Natureza são formados por um número fixo de elementos, fossem eles três ou quatro, variando-se as proporções com que eles combinariam entre si. Lavoisier acrescentou, ainda, que o número de elementos, e sua natureza, seriam questões de caráter meramente metafísico, podendo haver uma infinidade de soluções para este problema, observando que muitos químicos de seu tempo admitiam a existência de um número maior ou menor de elementos.

Lavoisier teve papel de destaque no desenvolvimento da química no século XVIII, propondo uma nova organização e uma nova linguagem para a química. Lavoisier, ao lado de Louis Bernard Guyton de Morveau (1737-1810), Claude

Louis Berthollet (1748-1822) e Antoine François de Fourcroy (1755-1809), formularam uma nova nomenclatura para a química, publicada em 1787 no volume intitulado *Méthode de nomenclature chimique*. Essa nova nomenclatura propunha que as substâncias consideradas simples conservassem seus nomes tradicionais, ou que, caso fossem recém-descobertas, recebessem nomes derivados do grego, cujas etimologias expressassem a propriedade mais característica do corpo simples em questão. No caso dos corpos compostos, a nomenclatura propunha que fossem designados conforme as substâncias simples que as constituem. Na tabela a seguir, alguns exemplos que comparam a nova nomenclatura com os nomes antigos de algumas substâncias:

Nome antigo	Origem do nome antigo	Novo nome
Cáustico lunar	Propriedade (cáustico - que queima); origem e composição (analogia entre a prata e a Lua)	nitrato de prata
Ar fixo	Propriedade (constituente de corpos fixos, isto é, não voláteis)	gás carbônico
Régulo de antimônio	Idéia de metal como um composto	antimônio elementar
Sal de Glauber	Pessoa e método de obtenção (preparado pelo químico germânico Johann R. Glauber)	sulfato de sódio

Tabela 1 - Origem dos nomes antigos de algumas substâncias (Vidal *et alii*, 2007).

Está claro, portanto, que a nova nomenclatura proposta por Lavoisier e colaboradores se baseava em uma concepção a respeito das substâncias simples que era diferente daquelas dos antigos e de seus contemporâneos.

Transcrevemos, a seguir, uma citação do *Traité Élémentaire de Chimie*, na qual Lavoisier resume essa nova concepção de substância elementar:

se... aplicamos o nome de elementos ou princípios dos corpos à ideia do último termo a que chegam as análises, então, todas as substâncias que não podemos decompor por nenhum meio, são outros tantos elementos para nós, sem querer dizer com isto que os corpos que temos como simples não estão talvez também compostos de dois ou mais princípios; mas que jamais são separados, ou por melhor dizer, não tendo nenhum meio de separá-los, agindo em nós, como corpos simples, e não devemos supô-los como compostos até que nos provem a experiência e a observação. (Lavoisier, 1789, pág. xxiv.)

Observa-se que Lavoisier afirmou que *elemento* poderia ser entendido como o corpo que não poderia ser decomposto por métodos ou análises químicas. Além disso, observa-se também que, no final dessa citação, Lavoisier retornou para o termo *corpo simples*, o qual é revelador da concepção que está sendo proposta. Trata-se de uma definição operacional, ou seja, era a manipulação química das substâncias que iria permitir que um corpo fosse classificado como elemento ou como composto. Nesse sentido, Holmes (1985) caracterizou essa definição como pragmática. Ou, como descreveram Bensaude-Vincent e Stengers (1992), o elemento químico se tornava, assim, uma entidade relativa e provisória.

Reproduzimos, a seguir, a tabela das substâncias simples que consta do *Traité Élémentaire de Chimie*, na qual Lavoisier reuniu as substâncias que,

segundo ele, não poderiam ser decompostas pelos métodos químicos conhecidos até então.

<i>TABLEAU DES SUBSTANCES SIMPLES.</i>		
	<i>Noms nouveaux.</i>	<i>Noms anciens correspondans.</i>
<i>Substances simples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les élémens des corps.</i>	Lumière.....	Lumière. Chaleur. Principe de la chaleur.
	Calorique.....	Fluide igné. Feu. Matière du feu & de la chaleur.
	Oxygène.....	Air déphlogistiqué. Air empiréal. Air vital. Base de l'air vital.
	Azote.....	Gaz phlogistiqué. Mofete. Base de la mofete.
	Hydrogène.....	Gaz inflammable. Base du gaz inflammable.
	Soufre.....	Soufre.
	Phosphore.....	Phosphore.
<i>Substances simples non métalliques oxidables & acidifiables.</i>	Carbone.....	Charbon pur.
	Radical muriatique.	Inconnu.
	Radical fluorique..	Inconnu.
	Radical boracique..	Inconnu.
	Antimoine.....	Antimoine.
	Argent.....	Argent.
	Arsenic.....	Arsenic.
<i>Substances simples métalliques oxidables & acidifiables.</i>	Bismuth.....	Bismuth.
	Cobalt.....	Cobalt.
	Cuivre.....	Cuivre.
	Etain.....	Etain.
	Fer.....	Fer.
	Manganèse.....	Manganèse.
	Mercuré.....	Mercuré.
	Molybdène.....	Molybdène.
	Nickel.....	Nickel.
	Or.....	Or.
<i>Substances simples salifiables terreuses.</i>	Platine.....	Platine.
	Plomb.....	Plomb.
	Tungstène.....	Tungstène.
	Zinc.....	Zinc.
	Chaux.....	Terre calcaire, chaux.
	Magnésie.....	Magnésie, base du sel d'Epsom.
	Baryte.....	Barote, terre pesante.
	Alumine.....	Argile, terre de l'alun, base de l'alun.
	Silice.....	Terre siliceuse, terre vitrifiable.

Figura 5 – Reprodução da tabela de substâncias simples publicada na página 192 do *Traité Elementaire de Chimie*.

Observa-se que os dois elementos que encabeçam a tabela são a luz e o calórico – que, atualmente, não mais são considerados como substâncias. Entretanto, é preciso lembrar que, no final do século XVIII, era muito difícil explicar os efeitos térmicos e luminosos associados a transformações da matéria sem recorrer à ideia de calor e luz como substâncias.²⁶

Ao tratar da questão dos elementos, Lavoisier se viu obrigado a opinar sobre outro tema então debatido no contexto da constituição da matéria: a existência dos átomos.

Sobre este assunto, acrescentarei apenas que, se pelo termo *elementos*, quisermos expressar aqueles átomos simples e indivisíveis, dos quais a matéria é composta, é extremamente provável que não saibamos nada sobre eles... (Lavoisier, 1789, p. xxiv.)

Este fragmento mostra que Lavoisier optou por não entrar no debate sobre a existência ou não dos átomos, pois acreditava que a experiência não permitia investigar essa questão. Assim, optou por um caminho que julgava estar próximo das evidências experimentais, escusando-se de especular a respeito de entidades que não podia observar diretamente, como os átomos.

²⁶ O conceito moderno de energia somente foi desenvolvido na segunda metade do século XIX.

John Dalton

Mendeleev, em alguns fragmentos de sua obra *Principles of Chemistry*, deixa-nos a impressão de ter dúvidas quanto à existência física dos átomos. Entretanto, dedicou um capítulo do segundo volume ao estudo mais detalhado dos átomos, onde discutiu sua existência e fez inúmeras observações relativas ao mundo atômico.

Ao tratar da hipótese atômica, fez menções aos filósofos gregos, a Dalton, e a outros autores do século XIX. Porém, Mendeleev referiu-se a Roger Joseph Boscovitch (1711 – 1787), filósofo natural do século XVIII, como o “fundador das doutrinas atômicas modernas”, apesar de seu trabalho não ter sido aceito pelos pensadores de sua época. (Mendeleev, 1891)²⁷.

A teoria atômica recebeu importante contribuição na primeira década do século XIX, com o trabalho de John Dalton (1766-1844). Nascido na Inglaterra, e

²⁷ O químico russo escreveu que a teoria atômica de Boscovitch foi enunciada entre os anos de 1758 e 1764, na obra *Philosophies naturalis theoria reducta ad unicum legem virium in natura existentium*, tendo como princípios que a matéria é composta por átomos, e os átomos são os pontos ou centros de força agindo entre os corpos e suas partes. Essas forças variariam com a distância, que seria relativamente muito pequena entre os átomos e, conseqüentemente, também entre seus agregados. As forças de atração estariam de acordo com a Lei de Newton, porém atuariam em pequenas distâncias. Como ondas esféricas (oscilatórias), haveria alternância relativa à diminuição ou aumento das distâncias – havendo uma diminuição da atração, haveria aumento na repulsão – até que a distância entre os átomos fosse mínima, e só houvesse a ação de repulsão agindo. Os átomos apresentariam uma esfera de repugnância, ou seja, uma distância segura uns dos outros, e ocupariam todo o espaço. Nesse ponto, Mendeleev apontou que Boscovitch comparou essa esfera de repugnância com a esfera de separação entre soldados em ações de artilharia. De acordo com a teoria de Boscovitch, os átomos não poderiam se fundir para formar outros átomos, seriam indestrutíveis, possuiriam massa e estariam em movimento perpétuo, devido às forças que agiriam sobre eles. Mendeleev comentou que muitos aspectos da doutrina de Boscovitch (século XVIII) eram os mesmos de seus contemporâneos (século XIX); porém, com a essencial diferença de que, em vez de serem considerados como pontos matemáticos com propriedades de massa, no tempo de Mendeleev se considerava os átomos como dotados de corporalidade – embora, em certos aspectos de sua interação, eles pudessem ser considerados pontos matemáticos (Garcia, 2005).

criado numa comunidade de quakers²⁸, onde teve iniciada sua educação, Dalton teria tido seu interesse pela meteorologia despertado desde a juventude por influência de seu professor de matemática (Partington, 1962). Esse interesse, associado ainda ao contato que Dalton teve com o newtonianismo divulgado na Inglaterra no final do século XVIII, o conduziu a investigar outros aspectos da filosofia natural.

Wurtz (1898) acreditava ser difícil estabelecer uma sequência lógica entre a concepção da lei das proporções múltiplas e o estabelecimento da teoria atômica por Dalton. Nash (1956) manifestou a mesma opinião, ao explicitar algumas controvérsias relativas à ordem cronológica das ideias de Dalton, que surgem ao se analisar diferentes textos nos quais o pensador inglês procurou retratar os pormenores do processo de construção da teoria atômica. Existem pelo menos três documentos em que Dalton escreveu sobre a origem de sua teoria, contendo versões diferentes e não completamente consistentes. Outra dificuldade se relaciona à escassez de fontes para investigar essa questão: cadernos de laboratório de Dalton, onde informações importantes estavam registradas, foram fragmentados, há registros não datados e fora de ordem cronológica e, para piorar, grande parte dos arquivos de Dalton em Manchester foram destruídos durante a Segunda Guerra Mundial (Viana, 2007). Em um de seus relatos, por exemplo, Dalton assim se referiu à origem de sua teoria atômica:

Esta idéia me ocorreu em 1805. Eu logo percebi que os *tamanhos*
das partículas dos fluidos elásticos *deveriam* ser diferentes...

²⁸ Grupo de religiosos cristãos protestantes, fundado na Inglaterra em meados do século XVII. Pregavam o encontro do homem com Deus através da introspecção, sem a necessidade de cultos e rituais externos (Frost e Barbour 1988).

Sendo estabelecidos os diferentes *tamanhos* das partículas dos fluidos elásticos em condições semelhantes de temperatura e pressão, tornou-se um objetivo determinar os *tamanhos* e *pesos* relativos, bem como o *número* relativo de átomos em um dado volume... (Dalton, anotações para uma conferência apresentada à *Royal Institution* em 1810; citado por Nash, 1956, p. 103.)

Entretanto, historiadores da ciência na atualidade mostram que, anteriormente a 1803, Dalton já refletia sobre transformações químicas em termos de combinação dos átomos (Viana, 2007). Dalton há tempos desenvolvia pesquisas sobre os fenômenos atmosféricos. Em sua época, muitos cientistas já haviam se dedicado a estudos sobre a composição da atmosfera, e também sobre a dissolução de gases em água²⁹. Era conhecido que os gases mais abundantes na atmosfera eram o nitrogênio, o oxigênio, o gás carbônico e o vapor d'água; porém, ainda restavam dúvidas sobre a forma como estes gases se encontravam – se estariam misturados uns aos outros, ou se estariam combinados quimicamente (Viana e Porto, 2007).

No final do século XVIII e início do século XIX, o corpuscularismo de Isaac Newton (1642 – 1727) foi divulgado através da circulação de suas obras no meio acadêmico. Newton, influenciado pelos atomistas gregos, por Boyle (1627 – 1691) e outros pensadores do século XVII, especulou, em alguns pontos de sua obra, em torno da hipótese de que corpúsculos seriam os constituintes da matéria. Newton teria almejado explicar as interações entre as partículas e as

²⁹ Dentre eles, pode-se destacar: Joseph Priestley (1733 – 1804), Antoine Lavoisier (1743 – 1794), Humphry Davy (1778 – 1829), Nicolas Theodore de Saussure (1767 – 1845) e Richard Kirwan (1733 – 1812).

propriedades dos materiais, por intermédio de “leis universais”³⁰. Newton tentou aplicar sua teoria da gravitação ao microcosmo, isto é, tentou atribuir aos corpúsculos as forças análogas às por ele propostas para explicar os movimentos orbitais dos astros. Assim, propôs que haveria forças de atração e repulsão entre os corpúsculos, o que poderia explicar a união entre eles ou seu afastamento. As ideias de Newton a respeito da natureza dos corpúsculos de matéria podem ser observadas neste fragmento de sua obra *Opticks*, de 1704:

Parece-me provável que Deus, no início, formou a matéria em partículas *sólidas, maciças, duras, impenetráveis e móveis*, de *tamanhos e formatos* tais, e com tais outras *propriedades*, e em tal proporção, de modo a melhor conduzi-las à finalidade para a qual Ele as formou; e que essas partículas primitivas, sendo sólidas, são incomparavelmente mais duras do que quaisquer corpos porosos compostos por elas. São tão duras que nunca se desgastariam ou se quebrariam. Nenhum poder comum seria capaz de dividir o que o próprio Deus fez *uno*, na primeira criação. (...) Assim, considerando que a natureza deve ser durável, as mudanças das coisas corpóreas deverão ser atribuídas exclusivamente às diversas separações e novas associações dos movimentos destas partículas permanentes. Se os corpos sólidos se rompem, não o fazem no meio dessas partículas, mas onde se

³⁰ Newton sugeriu que a causa da força de atração que o sol exercia sobre os planetas, seria a massa desses corpos, sendo, assim, uma atração exercida mutuamente entre os astros. Daí decorre o conceito de gravitação universal: todos os corpos se atraem com uma força proporcional a suas massas e ao inverso do quadrado da distância que os separa (Navarro, 2006).

juntam, tocando-se em uns poucos pontos somente. (Newton, 2002 [1704], p. 290).

Dalton, tomando por base as obras de Newton, interpretou livremente tanto a Questão 31 de *Opticks* quanto a 23ª Proposição do Livro 2 dos *Principia*, utilizando-as para construir suas explicações para o comportamento dos gases.

Dalton havia observado o que ficaria conhecido como “lei das pressões parciais”, ao observar que a presença de um determinado gás, em uma mistura gasosa, não interferiria na pressão de outro gás presente nessa mistura. A explicação proposta por Dalton para esse fenômeno estava fundamentada na repulsão entre as partículas constituintes de cada gás:

Quando dois fluidos elásticos, denotados por A e B, são misturados, não existe repulsão mútua entre suas partículas; isto é, as partículas de A não repelem as partículas de B, como se repelem entre si. (Dalton *apud* Fleming, 1974, p. 563)

Utilizando dados e observações relativas aos gases e transformações químicas, e postulando a regra da máxima simplicidade³¹, Dalton determinou os pesos atômicos relativos³² de uma série de substâncias (Viana, 2007). Em trabalho posterior, Dalton justificou sua preferência pelo nome *átomos* para designar as partículas materiais:

³¹ As combinações entre os átomos aconteceriam preferencialmente na proporção 1:1; ou então 2:1, e assim sucessivamente.

³² A primeira tabela com pesos atômicos relativos foi proposta por Dalton em um trabalho sobre a solubilidade de gases em água, no qual entretanto não era explicado como os pesos atômicos foram determinados (Nash, 1956).

Eu escolhi a palavra átomo para designar essas últimas partículas preferencialmente a partícula, molécula ou qualquer ou qualquer outro termo diminutivo, porque eu concebo que ele é muito mais expressivo. Ele inclui em si a noção de indivisibilidade, que os outros termos não incluem. (Dalton *apud* Camel, 2010, p.101).

Por volta de 1802, Joseph Proust, ao realizar experiências com o estanho, antimônio e ferro, chegou à conclusão de que existia uma relação fixa, não sujeita a variações, entre as massas segundo as quais dois ou mais elementos se combinariam para formar um determinado composto. Esta observação ficou conhecida como a *lei das proporções definidas*.

Proust, em artigo intitulado “Investigações sobre o cobre”³³ (1799), discutiu as proporções definidas a partir dos experimentos realizados com compostos de cobre. Num desses experimentos, Proust reagiu 100 partes de cobre com ácido nítrico ou sulfúrico; à solução resultante, adicionou carbonato de sódio ou de potássio, observando que, ao final, produziu-se “invariavelmente” 180 partes de um precipitado verde de carbonato de cobre. Nesse mesmo artigo, Proust afirmou que, ao comparar o carbonato de cobre natural com o carbonato de cobre obtido através de reações químicas, observou que as proporções entre os constituintes deste material são invariáveis:

³³ *Ann. chim.* 32, 26-54 (1799) [traduzido para o inglês e reproduzido em H. M. Leicester e S. H. Klickstein, *A Source Book in Chemistry, 1400-1900* (Cambridge: Harvard University Press, 1952)]. Disponível em: <http://web.lemoyne.edu/~giunta/proust.html>

Devemos concluir que a natureza não funciona de outra forma, nas profundezas do mundo, em sua superfície ou nas mãos do homem. Essas proporções sempre invariáveis, constantes desses atributos, que caracterizam os compostos como verdadeiras obras de arte ou da natureza... presidem a todas as combinações. (Proust, 1799, *in* <http://web.lemoyne.edu/~giunta/proust.html>)

Dalton logo percebeu que a lei de Proust poderia fornecer sustentação empírica para sua teoria atômica. Dalton explicava a lei de Proust considerando que as transformações químicas ocorriam através de unidades discretas, os átomos, combinando-se em proporções definidas (Bensaude-Vincent e Stengers, 1992).

A lei das proporções múltiplas, proposta por Dalton, foi uma consequência natural de sua concepção atomista. O pensador inglês utilizou dados publicados anteriormente na literatura para verificar sua validade³⁴. Assim Dalton explicitou sua visão sobre a combinação dos átomos, formando átomos compostos:

1 átomo de A + 1 átomo de B = 1 átomo de C, binário.

1 átomo de A + 2 átomos de B = 1 átomo de D, ternário.

2 átomos de A + 1 átomo de B = 1 átomo de E, ternário.

1 átomo de A + 3 átomos de B = 1 átomo de F, quaternário.

3 átomos de A + 1 átomo de B = 1 átomo de G, quaternário.

³⁴ As sínteses dos óxidos de nitrogênio eram exemplos que obedeciam à lei das proporções múltiplas. Dalton explicou os dados de composições elementares, então disponíveis na literatura, supondo que o gás nitroso seria formado por um átomo de oxigênio e um átomo de nitrogênio, que o óxido nitroso seria formado por dois átomos de nitrogênio e por um átomo de oxigênio, e que o gás ácido nítrico seria formado por um átomo de nitrogênio e dois átomos de oxigênio (Viana e Porto, 2007).

[...]

1º Quando somente uma combinação de dois corpos pode ser obtida, deve-se presumir que seja binária, a menos que alguma causa aponte para o contrário.

2º Quando duas combinações são observadas, deve-se presumir que sejam uma binária e uma ternária.

3º Quando três combinações são obtidas, podemos esperar que uma seja binária e as outras duas sejam ternárias.

4º Quando quatro combinações são observadas, devemos esperar uma binária, duas ternárias e uma quaternária etc.

5º Um composto binário deve ser sempre especificamente mais pesado do que a simples mistura de seus dois ingredientes.

6º Um composto ternário deve ser especificamente mais pesado do que a mistura de um binário e um simples, os quais, se combinados, o constituem.

7º As regras e observações acima igualmente se aplicam quando dois corpos, como C e D, D e E etc., são combinados. (Dalton, 1964, p. 163-167)

A primeira publicação em que Dalton expôs sumariamente a determinação das massas atômicas relativas foi o livro *A New System of Chemical Philosophy*, de 1808. Nessa obra, Dalton apresentou também uma representação sistemática para os átomos. Anos depois, assim Wurtz (1898) descreveu sua interpretação das ideias de Dalton:

Pareceu-lhe que a nova e abrangente ideia de representar os corpos compostos como sendo formados por grupos de átomos, fixos em número, e possuindo pesos relativos diferentes, mas ao mesmo tempo fixos, poderia ser expressa graficamente pela adoção de símbolos que representassem esses átomos, e agrupados de tal maneira a indicar a composição dos corpos. Cada átomo era representado por um pequeno círculo exibindo um sinal particular. (Wurtz, 1898, p. 29)

Como Wurtz comentou, Dalton propôs a adoção de símbolos distintos para diferenciar os átomos dos diferentes elementos e compostos.

Figura 6 - Representação dos átomos de diferentes elementos e compostos (Dalton, 1964 [1808]).

Ainda de acordo com a interpretação de Wurtz, os termos *pesos atômicos*, *números proporcionais* e *equivalentes*, utilizados por Dalton ao explicar sua teoria, representariam uma mesma ideia.

Havia ainda outros aspectos do comportamento dos gases (tais como o processo de difusão dos gases, e o modo como estes se combinavam quimicamente) que levaram Dalton a elaborar mais sua teoria das misturas gasosas. Assim, Dalton também incluiu considerações sobre os volumes dos átomos, os quais dependeriam da quantidade de calórico ao redor das partículas. Segundo Nash (1950), Dalton, em seu artigo intitulado “On Heat”, afirmou que os átomos possuíam uma “atmosfera” de calórico, de maneira análoga aos planetas que possuem suas atmosferas gasosas. Neste modelo, o calórico seria responsável pela repulsão entre átomos iguais. (Viana e Porto, 2007).

Figura 7 - Esquemas representativos da repulsão entre as “atmosferas” de calórico que circundariam cada átomo constituinte dos gases (Partington, 1962).

Em todos os estudos que realizou, fosse sobre a atmosfera, a composição das substâncias, as proporções múltiplas, ou qualquer outra investigação, Dalton sempre raciocinou em termos de átomos (Rocke, 2005). Em sua forma de conceber a Natureza, a existência dos átomos não seria apenas uma hipótese: para Dalton, os átomos seriam entidades reais. Essa interpretação, entretanto, esteve longe de alcançar consenso ao longo do século XIX. Bem ao contrário, o estatuto ontológico dos átomos continuava a ser objeto de discussão na época de Mendeleev, e mesmo depois.

O Congresso de Karlsruhe

No século XIX, a teoria atômica moderna fundamentou inúmeras hipóteses e impulsionou diversas realizações científicas, mas também foi objeto de intensos debates. A incerteza acerca da existência dos átomos permeou a ciência ao longo de todo o século. Muitos químicos não aderiram à teoria atômica daltoniana e, em vez de pesos atômicos, utilizavam em seus trabalhos os equivalentes químicos – os quais tinham caráter empírico.

Na citação abaixo, o químico Friedrich August Kekulé expôs suas impressões, que acabavam por ser comuns a muitos químicos do período:

Eu não hesito em dizer que, de um ponto de vista filosófico, não acredito na existência real de átomos, tomando a palavra no seu significado literal de partículas indivisíveis de matéria. Eu prefiro esperar que nós possamos algum dia encontrar, para o que nós

agora chamamos átomos, uma explicação mecânico-matemática para o peso atômico, a atomicidade e numerosas outras propriedades dos chamados átomos. Como químico, porém, eu recomendo a suposição de átomos, não apenas como recomendável, mas como absolutamente necessária à Química. Eu irei até mais longe, e declaro minha crença de que átomos químicos existem, de modo que o termo seja compreendido para denotar aquelas partículas da matéria que não possam ser submetidas a divisões posteriores em metamorfoses químicas. Deverá o progresso da Ciência levar a uma teoria da constituição de átomos químicos, importante tal como um conhecimento poderia ser para a filosofia geral da matéria; isto seria apenas uma pequena alteração na própria Química. O átomo químico permanecerá sempre a unidade química. (Kekulé *apud* Mierzecki, 1991, p. 129 *in* Oki, 2007, p. 27.)

Um problema decorrente da utilização de equivalentes químicos e de pesos atômicos eram eventuais equívocos na utilização de uns pelos outros. Por exemplo, uma tabela de “pesos atômicos”, publicada por Leopold Gmelin (1788 – 1853) em um manual de química teórica, era, de fato, uma tabela de equivalentes (Gonzales, 1999). Outros problemas se referiam à não uniformização das fórmulas químicas³⁵, bem como à existência de diferentes escalas de massas

³⁵ Kekulé registrou dezenove fórmulas diferentes atribuídas ao ácido acético por seus contemporâneos. Também na química inorgânica havia diferentes propostas de representações.

atômicas³⁶. Exemplo das dificuldades da época é dado por Camel *et alii* (2009), que citam as diferenças nas quantidades de átomos em diferentes fórmulas, conforme se utilizassem equivalentes ou pesos atômicos:

O sistema adotado então por Gerhardt era o de Liebig, que resultava em fórmulas dobradas. Gerhardt observou que muitas dessas fórmulas podiam ser divididas por dois, como, por exemplo, no caso do álcool, de $C_4H_{12}O_2$ para C_2H_6O , o que resultava numa fórmula em peso compatível com a hipótese de Avogadro, conhecida também como hipótese de Ampère... A consequência imediata da inovação de Gerhardt foi a substituição dos pesos equivalentes do carbono e do oxigênio pelos seus respectivos pesos atômicos (6 por 12 no caso do carbono e 8 por 16 no caso do oxigênio) (Camel *et alii*, 2009, p. 546).

Laurent publicou, em *Recherches sur les combinaisons azotées* nos *Annales de Chimie* de 1846, um artigo no qual apontava semelhanças entre seu trabalho e o desenvolvido por Gerhardt (Camel *et alii*, 2009, p. 546).

A comunidade científica se dava conta das dificuldades enfrentadas pelos pesquisadores diante das controvérsias conceituais e filosóficas. Sobre isso, escreveu Nye:

³⁶ Dalton adotou o peso atômico do hidrogênio como padrão igual a 1. Thomson atribuiu ao oxigênio o peso atômico igual a 1. Wollaston e Gay-Lussac adotaram o peso atômico do oxigênio igual a 10, e Berzelius preferiu utilizar como padrão de peso atômico o valor 100 para o oxigênio.

O que muitas vezes tem sido omitido nas análises sobre os áspers debates (sobre o atomismo) é que a crise na comunidade científica do século passado não dizia respeito apenas à evidência e a interpretação, mas também, a metodologia científica e a epistemologia. Em questão não estava apenas a teoria atômica, mas o objetivo e a estrutura da teoria *física*. (Nye, 1976, p. 246 *apud* Oki 2007.)

Por iniciativa de Kekulé, e com apoio dos cientistas Weltzien e Wurtz³⁷, foi organizado um congresso internacional de químicos, para discussão de alguns dos temas mais fundamentais e controversos que dificultavam o desenvolvimento da química. O congresso, realizado na cidade de Karlsruhe, teve início em 3 de outubro de 1860, com a participação dos mais importantes químicos da Europa e do México. Entre seus principais objetivos estava a unificação da linguagem química, a definição de conceitos como átomos, moléculas, e equivalentes, bem como o estabelecimento de símbolos e fórmulas que fossem aceitos por todos (Patiño e Manzano, 2008). A seguir, transcrevemos fragmentos da ata da primeira sessão do congresso:

O presidente sugere que a discussão comece com as noções de molécula e átomo, e ele pede ao Sr. Kekulé e ao Sr. Cannizzaro, cujos estudos abrangeram especialmente esse assunto, que tomem a palavra.

O Sr. Kekulé enfatiza a necessidade de distinguir entre a molécula e o átomo e, ao menos em princípio, entre a molécula física e a molécula química.

³⁷ Charles Adolphe Wurtz (1817-1884), Karl Weltzien (1813-1870).

O Sr. Cannizzaro é incapaz de conceber a noção de molécula química. Para ele, somente existem moléculas físicas, e a lei de Ampère-Avogadro é a base para as considerações relativas à molécula química. Esta nada mais é que a molécula gasosa.

O Sr. Kekulé pensa, pelo contrário, que os fatos químicos devem servir como base para a definição e a determinação da molécula (química), e que as considerações físicas deveriam somente ser invocadas para verificação.

O Sr. Strecker assinala que, em certos casos, o átomo e molécula são idênticos, como no caso do etileno.

O Sr. Wurtz diz que se pode sentir uma certa dificuldade em definir a molécula química de oxigênio, e dos elementos diatômicos em geral, que são comparáveis ao etileno. A visão destas como moléculas formadas por dois átomos derivou de considerações físicas, mas, até agora, nenhum fato químico parece militar em favor dessa duplicidade.

O Sr. H. Kopp, resumindo a discussão, diz: que a necessidade de separar a ideia de molécula daquela de átomo parece estar estabelecida; que a noção de molécula pode ser fixada com o auxílio de considerações puramente químicas; que a definição não tem que envolver densidade somente; e, finalmente, que parece natural chamar de molécula a quantidade maior, e de átomo a quantidade menor. Concluindo, o orador formula a primeira questão a ser posta à assembléia. A questão é a seguinte: 'É apropriado estabelecer uma distinção entre os termos molécula e átomo, e chamar de moléculas, que são comparáveis até onde vão as propriedades físicas, às menores quantidades dos corpos que entram ou saem de uma reação, e chamar de átomos às menores quantidades dos corpos que estão contidas nessas moléculas?'

O Sr. Fresenius chama a atenção para a expressão *átomo composto*, e disse que essas duas palavras implicam em uma contradição. A observação do Sr. Fresenius motiva a formulação de uma segunda questão a ser submetida à assembléia, que é a seguinte: 'Pode a expressão *átomo composto* ser eliminada e substituída pelas expressões *radical* ou *resíduo*?'

O Sr. Kopp volta para o programa explicado pelo Sr. Kekulé, e chama a atenção para a definição da palavra *equivalente*. A ele parece que a noção de equivalente é perfeitamente clara e nitidamente distinta das noções de molécula e de átomo. Consequentemente, a comissão adota, sem discussão, a terceira proposição para ser submetida à assembléia, que é a seguinte: 'A noção de equivalentes é empírica e independente da ideia de molécula e de átomo?'

A sessão continua, com o Sr. Erdmann presidindo. A discussão sobre *notação* prossegue: o Sr. Kekulé assinala que a notação molecular e atômica, ou a notação de equivalentes, podem ser empregadas, mas que, como em qualquer sistema, uma vez adotada, é necessário aderir rigorosamente a uma notação em particular, qualquer que seja ela.

O significado da palavra 'equivalente' é objeto de várias observações. O Sr. Béchamps diz que a equivalência somente pode ser admitida em casos onde as funções dos corpos são idênticas.

O Sr. Schischkoff não é da mesma opinião. Ele pensa que a notação para equivalência e quantidades equivalentes é independente de funções químicas. Todos assumem uma equivalência entre o cloro e o hidrogênio. Após algumas observações apresentadas por outros membros sobre o mesmo assunto, a sessão foi suspensa. (Patiño e Manzano, 2008, pp. 25 – 26.)

Observam-se concepções discrepantes entre os cientistas. Nesse congresso, foi fundamental a participação do professor italiano Stanislao Cannizzaro (1826 – 1910), cujas posições foram esclarecedoras para grande parte dos congressistas que ali se encontravam.

Cannizzaro, ao tratar dos pesos atômicos, destacou a importância da hipótese de Avogadro, que até então não havia alcançado grande repercussão no meio acadêmico. A exposição de Cannizzaro foi baseada em seu livro publicado

em 1858, para ser utilizado em seu curso na Universidade de Gênova. Nesse livro, Cannizzaro descreveu seu método para determinação dos pesos atômicos corrigidos por Laurent – Gerhardt³⁸, utilizando a hipótese de Avogadro e levando em conta a atomicidade dos elementos (Camel, 2009, p. 546). Cannizzaro expôs em Karlsruhe uma forma de definir a diferença entre átomos e moléculas, e também um método para determinar pesos atômicos:

As diferentes quantidades de um mesmo elemento contidas em diferentes moléculas são todas múltiplos inteiros de uma mesma quantidade, que, sendo sempre inteira, tem o direito de ser chamada de átomo... É o menor peso de um elemento descoberto no peso da molécula-grama de seu composto. (Cannizzaro, 1858 *apud* Brooke, 1981.)

Mendeleev, em carta datada de 7 de setembro de 1860, revelou suas impressões a respeito das importantes discussões do Congresso de Karlsruhe:

Decidiu-se a compreensão do que são moléculas e átomos, considerando-se como uma molécula a quantidade de uma substância que entra em uma reação e determina suas propriedades físicas, e considerando-se como um átomo a menor quantidade de uma substância incluída em uma molécula. Além disso, chegaram a um acordo sobre os equivalentes,

³⁸ Na terceira sessão do congresso, Cannizzaro aconselhou a utilização do sistema de Gerhardt, considerando as modificações dos pesos atômicos de certos metais (Patiño e Manzano, 2008, p. 20).

considerando-os empíricos, não dependendo do entendimento sobre átomos e moléculas.

Ao final do congresso, Angelo Pavesi distribuiu aos congressistas a monografia de Cannizzaro intitulada *Sunto di un corso di filosofia chimica* (1858), na qual estavam apresentadas suas ideias sobre esses temas. As impressões causadas pela exposição de Cannizzaro podem ser resumidas nas palavras do químico alemão Meyer³⁹:

As escamas caíram de meus olhos. As dúvidas desapareceram, e um sentimento de calma ocupou seu lugar (Meyer *apud* Gonzáles, 1999).

A lei periódica e a tabela periódica dos elementos

A tabela periódica dos elementos é um dos ícones mais poderosos da ciência: um simples documento que capturou a essência da química num elegante padrão. Realmente, não existe nada na biologia ou na física, ou em alguma outra parte da ciência, tão importante quanto ela. Pode-se ver a tabela periódica em qualquer lugar: em laboratórios industriais, oficinas, laboratórios acadêmicos e salas de aula (Scerri, 2007, p.XIII).

³⁹ Julius Lothar Meyer (1830 – 1895).

Durante sua formação, Mendeleev demonstrou grande interesse pelo estudo de substâncias que não apresentavam composições definidas. Conforme mencionamos anteriormente, Mendeleev estava ciente de que determinadas evidências experimentais iam de encontro à teoria atômica. Por um lado, Mendeleev reconhecia que a teoria atômica explicava, por exemplo, as proporções definidas:

Ao estabelecer a lei de proporções múltiplas, Dalton deu uma explicação hipotética para ela. Essa explicação é baseada na teoria atômica da matéria. De fato, a lei das proporções múltiplas é compreendida com facilidade incomum admitindo a estrutura atômica da matéria. A essência da teoria atômica é que se admite que a matéria consiste de uma aglomeração de peças pequenas e indivisíveis – os átomos... (Mendeleev, 1889.)

Por outro lado, a mesma teoria não dava conta das questões que envolviam os “compostos indefinidos” (que abrangiam ligas, misturas, soluções, alguns silicatos, etc.), e que estavam entre os interesses de pesquisa de Mendeleev.

O químico russo já havia utilizado em sua tese de mestrado o sistema de pesos atômicos de Gerhardt e Laurent e a hipótese de Avogadro, que Mendeleev chamada de lei de Gerhardt. (Kaji, 2002). Nesse trabalho, realizado nos primeiros anos de sua carreira acadêmica, já se pode observar sua busca pela exatidão de valores. Além disso, suas pesquisas que envolviam a análise de minerais, e as relações existentes entre suas formas, composições e suas similaridades, juntamente com sua capacidade de sistematizar e compilar uma grande

quantidade de dados, eram indicativos de seu interesse pela classificação das substâncias.

Após o Congresso de Karlsruhe, com as exposições de Cannizzaro e a leitura de seu trabalho, Mendeleev retornou a seu trabalho com uma nova visão a respeito dos pesos atômicos, pesos equivalentes e sobre as concepções relativas à existência dos átomos. Algumas de suas dúvidas foram esclarecidas, trazendo-lhe um novo horizonte para continuar a desenvolver suas pesquisas. Anos mais tarde, Mendeleev descreveu as impressões que o congresso lhe causou:

... foi nessa época que os valores numéricos dos pesos atômicos foram definitivamente conhecidos. Dez anos antes não existia tal conhecimento... químicos de todas as partes do mundo se reuniram em Karlsruhe para chegar a algum acordo – se não acerca dos pontos de vista sobre os átomos, ao menos em relação a sua representação definida. Muitos dos presentes provavelmente se lembram... de quanto terreno foi ganho no Congresso pelos seguidores da teoria... tão brilhantemente representada por Cannizzaro. Eu nitidamente recorro a impressão produzida por suas intervenções... baseadas nas concepções de Avogadro, Gerhardt e Regnault, que estavam, naquela época, longe de serem reconhecidas de modo generalizado. (Mendeleev, 1889.)

Entre os meses de maio e junho de 1868, veio a público a edição do primeiro volume de *Principles of Chemistry*. Nessa obra, Mendeleev discutiu

extensamente os conceitos de átomo e de elementos químicos. No próximo capítulo, vamos focar alguns aspectos dessa discussão.

Capítulo 4 - Mendeleev, os átomos e os elementos

Mendeleev, no início de sua vida acadêmica, dedicou-se ao estudo dos minerais e do isomorfismo. Estava ciente de que a hipótese atômica, bastante discutida nos cinquenta anos anteriores, encontrava um sério argumento contrário nos chamados compostos indefinidos, que eram seus objetos de estudo. Conforme foi discutido no Capítulo 1, diversos historiadores e filósofos da ciência abordaram as concepções de Mendeleev a respeito dos elementos químicos e da realidade dos átomos.

Kaji (2002, 2003), Gordin (2002) e Scerri (2005) destacaram, em seus artigos, fragmentos da obra de Mendeleev nos quais o químico russo expôs suas dúvidas e reservas em relação à hipótese atômica. Nesses fragmentos, Mendeleev apresenta o átomo como um instrumento teórico, um meio facilitador para a investigação da matéria ponderável – o qual, por outro lado, não era capaz de dar conta dos compostos indefinidos. Um aspecto fundamental da teoria atômica seria o conceito de peso atômico, que foi extensamente utilizado por Mendeleev em suas interpretações dos fenômenos químicos. Como apontam Kaji, Gordin e Scerri, o uso que Mendeleev faz dos pesos atômicos em suas teses de mestrado e doutorado, e posteriormente em seu livro de química orgânica, se constitui em importante deferência à abordagem quantitativa para os átomos, tal como proposta por Dalton.

Outro ponto fundamental para se compreender a obra de Mendeleev é a distinção que ele explicitamente estabelece entre o que seriam corpos simples e elementos químicos. A partir dessa clara distinção, Mendeleev desenvolveu sua lei periódica, e procedeu à elaboração da tabela periódica direcionada por essa lei, conforme destacaram em seus textos Kultgen (1958), Kaji (2002, 2003), Gordin (2002) e Bensaude-Vincent (1986). Kaji destacou uma passagem do livro de química orgânica escrito por Mendeleev, na qual o químico russo discute a diferença entre corpos e radicais. Considerando essa passagem, é possível interpretar a existência, na concepção de Mendeleev, de uma analogia entre a concepção de “corpo” e a ideia de molécula, enquanto que sua concepção de “radicais” conduziria à ideia dos átomos que constituem as moléculas (assim como os radicais constituiriam os corpos). Isso porque os radicais se manteriam “indivisíveis”, ou seja, se conservariam durante as transformações dos corpos orgânicos, em analogia ao comportamento dos átomos nas transformações concebidas de acordo com a hipótese daltoniana.

Kaji, Kultgen e Gordin apontam que, na primeira parte de *Principles of Chemistry*, Mendeleev novamente expressa a distinção entre elementos químicos e corpos simples, como anteriormente fizera em seu livro de química orgânica, sem recorrer à noção de átomos, considerando as limitações da teoria atômica no contexto da época.

Em uma das citações destacadas por Kaji, Mendeleev afirmou que o elemento é “algo” abstrato, uma substância não observável. Nesses termos, Kultgen, Bensaude-Vincent e Scerri também discutiram o aspecto metafísico da concepção de Mendeleev. Esse “algo” abstrato, segundo Mendeleev, estaria contido no corpo simples e permaneceria inalterado mesmo quando esse corpo

fosse convertido em outro corpo simples ou composto, sem sofrer qualquer mudança em seu peso. Ou seja, o elemento, embora em si não fosse isolável ou observável, seria portador de uma propriedade fundamental: seu peso característico – identificado com o peso atômico da teoria daltoniana,

Assim, uma leitura de *Principles of Chemistry* pode sugerir que Mendeleev tenta se equilibrar entre duas posições conflitantes. De um lado, em diversos momentos, em diferentes capítulos de seu livro, Mendeleev explica as transformações químicas e a natureza da matéria sob a perspectiva da teoria atômica, além de discutir com detalhes o trabalho de Dalton no capítulo 4 do volume 1 (Mendeleev, 1901, vol. 1, pp. 198 – segs.). Por outro lado, Mendeleev conhecia profundamente os compostos indefinidos, ou seja, aqueles que não tinham composição constante nem obedeciam a lei das proporções múltiplas de Dalton. A seguinte passagem, na qual Mendeleev se refere às soluções – aqui concebidas como compostos indefinidos – exemplifica a posição do químico russo diante dessa dificuldade:

Ao submeter as soluções à concepção daltoniana do atomismo, espero que possamos não apenas obter uma doutrina química geral harmoniosa, mas também que novas razões para investigação e pesquisa apareçam no problema das soluções – que devem ou confirmar a teoria proposta ou substituí-la por outra mais completa e verdadeira; e, de minha parte, não posso considerar que este seja o caso para qualquer das outras atuais doutrinas sobre soluções (Mendeleev, 1901, vol. 1, p. 107, n. 70).

Mendeleev fazia ressalvas em relação à doutrina atômica; porém, nos vários momentos em que a discute em seu livro, não nos dá o entendimento de que negasse a mesma, mas de que havia restrições quanto a seu alcance. Não tendo como descartá-la, em função de sua grande utilidade para o estudo da química, Mendeleev se esforçou em explicar a teoria atômica com clareza para seu público leitor. Nesse contexto, chama a atenção uma estratégia adotada por Mendeleev para explicar a natureza dos átomos e como seria sua organização: estabelecer uma analogia com o mundo macroscópico e diretamente observável das estrelas e dos planetas. A análise dessa analogia nos oferece mais alguns componentes para compreender as concepções de átomo e elemento químico na obra de Mendeleev, conforme apresentamos a seguir.

Sol e planetas – uma analogia com o mundo atômico.

Em diversos fragmentos da obra *Principles of Chemistry*, como também em outros textos que utilizamos como fontes primárias para o desenvolvimento do presente trabalho, chamou-nos sobremaneira a atenção uma analogia usada por Mendeleev para esclarecer ao leitor alguns aspectos da hipótese atômica: a comparação do mundo microscópico com o mundo macroscópico, utilizando o sistema solar como modelo analógico.

Por exemplo, ao discutir a formação de compostos envolvendo cloro e carbono, Mendeleev se utiliza dos conceitos de substância simples e elemento, que estão subjacentes à explicação da formação de um composto:

...o cloro não se combina diretamente com carvão, grafita ou diamante; há, no entanto, compostos de cloro com carbono, e muitos deles se destacam por sua estabilidade. Eles são obtidos pela ação do cloro sobre hidrocarbonetos, como produtos de separação da ação direta do cloro sobre o hidrogênio. O cloro retira o hidrogênio, e o carbono liberado no momento da sua separação, se combina com outra porção de cloro, de modo que, no final, o cloro é combinado tanto com o hidrogênio quanto com o carbono (Mendeleev, 1901, vol. 1, p. 33).

Ao propor uma explicação para esse processo em escala microscópica, Mendeleev destacou a noção de movimento associada aos átomos dos elementos, e o comparou ao movimento dos corpos celestes:

É evidente, porém, que não apenas a reação química em si consiste de movimentos, mas que, no composto formado (nas moléculas), os elementos (átomos) que o constituem estão em um movimento harmonioso estável (como os planetas no sistema solar), e este movimento vai afetar a estabilidade e capacidade de reação e, portanto, o lado mecânico da ação química deve ser extremamente complexa (Mendeleev, 1901, vol. 1, p. 33, n. 35).

No capítulo em que discute a lei de Dalton, Mendeleev atribuiu a origem da lei das proporções múltiplas aos experimentos que Dalton realizou com os gases metano e eteno. Em seguida, comentou como a lei das proporções múltiplas

podia ser explicada à luz da hipótese atômica, e novamente recorreu à analogia com os planetas e estrelas:

Ao estabelecer a lei das proporções múltiplas, Dalton deu uma explicação hipotética para ela. Essa explicação está baseada na teoria atômica da matéria. De fato, a lei das proporções múltiplas pode ser compreendida muito facilmente admitindo-se a estrutura atômica da matéria. A essência da teoria atômica é que a matéria deve consistir de um aglomerado de partes pequenas e indivisíveis – os átomos – que não preenchem todo o espaço ocupado por uma substância, mas permanecem separadas umas das outras, assim como o sol, os planetas e as estrelas não preenchem totalmente o espaço do universo, mas estão a uma certa distância uns dos outros. A forma e as propriedades das substâncias são determinadas pela posição dos seus átomos no espaço, e por seu estado de movimento, enquanto as reações realizadas pelas substâncias são entendidas como redistribuições das posições relativas dos átomos, e como mudanças em seus movimentos. A representação atômica da matéria surgiu em tempos muito antigos, e até recentemente estava em desacordo com a hipótese dinâmica, que considera a matéria apenas como uma manifestação de forças. Na atualidade, no entanto, a maioria dos homens de ciência apóiam a hipótese atômica, embora a atual concepção do átomo seja bastante diferente daquela dos antigos filósofos. Um átomo, no dias atuais, é considerado como um indivíduo ou unidade que é indivisível por forças físicas e químicas, enquanto o átomo dos antigos era, de fato, indivisível

mecânica e geometricamente (Mendeleev, 1901, vol. 1, pp. 216 – 217).

Observa-se que Mendeleev faz referência aos espaços vazios entre os átomos, em analogia com o espaço interplanetário, e também ao movimento dos átomos. Além disso, ele chama a atenção para a diferença entre a hipótese atômica de seu tempo e o atomismo da Antiguidade, destacando que os átomos dos gregos eram “geometricamente indivisíveis”.

Prosseguindo nessa discussão, Mendeleev revela que a questão fundamental que estava em jogo, em relação à hipótese atômica, se referia ao significado da indivisibilidade dos átomos. No fragmento acima, Mendeleev distingue entre a indivisibilidade por “forças químicas” e a hipotética indivisibilidade “mecânica” ou mesmo “geométrica”. No trecho a seguir, Mendeleev continua elaborando esse pensamento, e mais uma vez recorre à analogia com os planetas:

No atual estado da ciência, tanto a hipótese atômica quanto a dinâmica são, inevitavelmente, obrigadas a admitir a existência de um movimento invisível e imperceptível na matéria, sem o qual é impossível compreender a luz ou o calor, ou a pressão dos gases, ou qualquer fenômeno mecânico, físico ou químico. Os antigos viam movimento vital somente nos animais; mas, para nós, a menor partícula de matéria, dotada de *vis viva*, ou energia em algum grau, é incompreensível sem o movimento auto-existente. Assim, o movimento tornou-se uma concepção inseparavelmente associada à concepção de matéria, e isso preparou o terreno para

o ressurgimento da hipótese dinâmica da constituição da matéria. Na teoria atômica, surgiu a idéia generalizante segundo a qual o mundo dos átomos é construído, assim como o universo dos corpos celestes, com os seus sóis, planetas e meteoros, dotados de uma força eterna de movimento, formando moléculas como os corpos celestes formam sistemas, tais como, o sistema solar, cujas moléculas são apenas relativamente indivisíveis, da mesma forma que os planetas do sistema solar são inseparáveis, e estáveis e duradouras, como o sistema solar é duradouro. Tal representação, sem requerer a absoluta indivisibilidade dos átomos, expressa tudo o que a ciência pode exigir de uma representação hipotética da constituição da matéria (Mendeleev, 1901, vol. 1, pp. 218 – 219, n. 33).

Na continuação dessa nota, Mendeleev teceu outras considerações sobre a indivisibilidade ou divisibilidade dos átomos, recorrendo, em particular, a observações astronômicas do século XIX, e a fazendo referência às opiniões de outros cientistas a esse respeito. Uma linha de argumentação discutida por Mendeleev é resumida a seguir:

Se a divisibilidade da matéria for infinita, então o ar deve se estender por todo o espaço celeste, assim como se estende por toda a Terra devido a sua elasticidade e difusão. Se a divisibilidade infinita da matéria for admitida, é impossível que qualquer porção do espaço inteiro do universo possa ficar totalmente vazia das partes componentes de nossa atmosfera. Mas, se a matéria for divisível somente até um certo limite, isto é,

até o átomo, então pode existir um corpo celeste isento de uma atmosfera. Se esse corpo for descoberto, ele serviria como um fator importante para a aceitação da validade da doutrina atômica (Mendeleev, 1901, vol. 1, p. 219, n. 33).

Mendeleev apresentou então as observações feitas por diversos astrônomos, e os debates a respeito, que buscavam evidenciar se havia ou não atmosfera na Lua. A inexistência de atmosfera na Lua serviria como forte argumento em favor da hipótese atômica, mas as evidências observacionais disponíveis na época de Mendeleev eram contraditórias, conforme ele próprio apontou. Entretanto, segundo o químico russo, a existência de atmosfera em planetas como Marte e Júpiter (nos quais até mesmo nuvens já haviam sido observadas) já estava bem estabelecida – fornecendo, portanto, uma evidência contrária à existência dos átomos. Assim, Mendeleev concluiu essa discussão nos seguintes termos:

A doutrina atômica, que admite somente uma divisibilidade mecânica finita, deve ser, pelo menos até o momento, aceita apenas como um meio – similar àquele meio empregado por um matemático, quando ele divide uma linha curva contínua em um grande número de linhas retas. Há uma simplicidade de representação nos átomos; mas, não existe necessidade absoluta de recorrer a eles. **Somente a concepção da individualidade das partes da matéria, exibida pelos elementos químicos, é necessária e confiável** (Mendeleev, 1901, pp. 220 – 221, n. 33, grifo nosso).

Entendemos estar aqui a chave para compreender a relação de Mendeleev com a teoria atômica, e também a sua predileção pela analogia entre os átomos e os planetas. A hipótese atômica seria um excelente meio para investigar a matéria – assim como as aproximações feitas pelos geômetras funcionam muito bem para abordar problemas matemáticos. Mas, isso não significa necessariamente que os átomos existem – assim como uma linha curva não é, necessariamente, um conjunto de linhas retas. Assim, Mendeleev não se compromete com a ideia de *indivisibilidade* física da matéria, adotando como fundamental o conceito de *individualidade* da matéria, o qual, conforme vimos, é parte essencial da construção de um sistema geral para a química, representado pela lei periódica.

Essa ideia é manifestada também em outros textos de Mendeleev aos quais tivemos acesso (em traduções para o inglês). No prefácio do primeiro volume de *Principles of Chemistry*, Mendeleev expressou seu desejo de ver a química lado a lado com a mecânica, explicando os “segredos da Natureza”. Porém, para que isso pudesse acontecer, Mendeleev acreditava ser necessária a existência de um novo Newton, que propusesse explicações para o mundo invisível e microscópico da química. No artigo *An Attempt to Apply to Chemistry one of The Principles of Newton's Natural Philosophy*, escrito por Mendeleev em 1889, o químico russo propôs a aplicação das leis de Newton para a explicação dos movimentos microscópicos dos átomos e moléculas.

Mendeleev afirmou que, mesmo nos movimentos invisíveis e aparentemente caóticos, que ocorrem desde as estrelas até os átomos, existe uma harmonia decorrente do equilíbrio dinâmico, e que Newton foi o primeiro a entender essa dinâmica. Para Mendeleev, a terceira lei de Newton (ação e

reação) poderia ser aplicada diretamente às moléculas. Segundo ele, em um sistema de átomos (uma molécula), cada conjunto de átomos (um radical) poderia agir sobre os restantes com a mesma intensidade com que este conjunto restante agiria sobre o primeiro. Essa linha de raciocínio levou Mendeleev a propor que seria possível explicar a substituição de átomos, ou de grupos de átomos (radicais), nas transformações químicas (Mendeleev, 1998 [1889], pp. 307 – 308). Discutindo o conceito de reação química, e utilizando uma concepção dinâmica dos átomos, Mendeleev afirmou que o equilíbrio dinâmico poderia vir a ser capaz de explicar não somente as moléculas e suas transformações, mas também seus componentes atômicos. Nesse contexto, recorreu novamente à analogia entre átomos e planetas:

Mas o mundo não observável das transformações químicas é bastante análogo ao mundo visível dos corpos celestes, pois nossos átomos formam porções distintas de um mundo invisível, assim como planetas, satélites, e cometas formam porções distintas do universo do astrônomo. Nossos átomos podem, então, ser comparados aos sistemas solares, ou aos sistemas de estrelas simples ou duplas. Por exemplo, a amônia (NH_3) pode ser representada, da maneira mais simples, supondo o nitrogênio como o sol cercado por seus planetas de hidrogênio; e o sal comum (NaCl) pode ser visto como uma estrela dupla formada por nitrogênio e cloro (Mendeleev, 1998 [1889], p. 300).

Mendeleev observou que a produção de corrente elétrica, luz ou calor pelas reações químicas demonstrava que estas estariam relacionadas ao intenso,

ainda que invisível, movimento dos átomos que constituem as moléculas. Dessa forma, o equilíbrio dinâmico deveria ser procurado não somente entre as moléculas, mas também nos átomos que as compõem. Porém, Mendeleev reconheceu que ainda havia químicos que representavam o interior das moléculas sem atividade alguma.

Nesse artigo, Mendeleev explorou um outro aspecto da analogia entre os planetas e os átomos. Ele observou que as leis que regem os movimentos dos planetas são as mesmas, mas os movimentos podem variar em função das diferenças entre planetas. Por exemplo, imaginando que a massa da Lua fosse aumentando, Mendeleev foi descrevendo como isso alteraria a trajetória do sistema Terra – Lua através do espaço. Nisso o químico russo viu uma analogia com as propriedades periódicas dos elementos químicos: ao se considerar dois elementos de uma mesma família, seus comportamentos químicos são semelhantes, mas ligeiramente diferentes em função da diferença de massa entre eles (Mendeleev, 1998 [1889], pp. 319 – 320). Ao final do artigo, Mendeleev reconheceu sua simpatia em relação à ideia de existência de unidade da Natureza, o que faria serem semelhantes os comportamentos dos átomos e dos planetas (Mendeleev, 1998 [1889], pp. 320 e 321, n. 1).

Em um artigo posterior, datado de outubro de 1902, encontramos outra exposição das ideias de Mendeleev a respeito dos átomos e dos elementos. Trata-se de “An Attempt towards a chemical conception of the ether” (tradução para o inglês datada de 1904), no qual Mendeleev discutiu a existência do éter como uma espécie de gás, que seria análogo aos gases raros, mas com peso atômico extremamente pequeno. Há outros importantes aspectos que podem ser considerados nesse artigo, tais como o uso que Mendeleev faz da tabela

periódica como um instrumento para a dedução das propriedades do éter, mas que não serão explorados aqui.

A resistência de Mendeleev em aceitar a radioatividade como um processo de “decomposição” dos átomos, que levaria à transmutação de um elemento em outro, bem como a descoberta do elétron – uma evidência da divisibilidade do átomo químico – levou-o a desenvolver uma “teoria química” para o éter. Nela, o éter seria um elemento, e não um constituinte dos átomos, ou um produto de sua decomposição, como propunham algumas teorias da época. Mendeleev rejeitou explicitamente a possibilidade da existência de uma “substância primária”, isto é, algum tipo de matéria primordial que constituiria todos os elementos:

... são princípios fundamentais desta ciência [i. e., *a química*] a indestrutibilidade da matéria e a imutabilidade dos átomos que formam os elementos... Não é meu objetivo aqui defender a individualidade independente dos elementos químicos, mas sou forçado a me referir a ela ao falar do éter, pois me parece que, além de ser quimicamente inválida, é impossível conceber a idéia de um éter como uma substância primária... (Mendeleev, 1904, s.p.).

Assim, Mendeleev desenvolveu a ideia de que o éter seria formado por átomos, “concebidos como muito menores do que os átomos e moléculas das substâncias químicas conhecidas” (Mendeleev, 1904, s.p.).

Também nesse artigo, Mendeleev recorreu à analogia entre átomos e planetas para explicar seus pontos de vista. É interessante observar, nesse texto que data do final de sua carreira científica, como Mendeleev muda a forma com

que se refere explicitamente ao atomismo, antes visto apenas como uma ótima hipótese de trabalho:

Quimicamente, os átomos podem ser comparados aos corpos celestes, estrelas, sol, planetas, satélites, cometas, etc. A construção das moléculas a partir dos átomos, e das substâncias a partir das moléculas, é então concebida como semelhante à construção de sistemas, tais como o sistema solar, ou de estrelas ou constelações gêmeas, a partir desses corpos individuais. **Este não é um simples jogo de palavras na química moderna, nem uma mera analogia, mas uma realidade** que dirige o curso de toda a pesquisa, análise e síntese químicas. A química tem seu próprio microscópio para investigar regiões invisíveis, e sendo uma ciência arqui-real, ela lida o tempo todo com suas individualidades invisíveis, sem considerá-las mecanicamente indivisíveis (Mendeleev, 1904, s.p., grifo nosso).

Nesse momento, Mendeleev vê a concepção dos átomos químicos, e suas interações na constituição das substâncias, como “uma realidade que dirige o curso de toda a pesquisa, análise e síntese químicas” – e daí sua preocupação em propor uma concepção “química” de éter. Mendeleev seguiu explorando a analogia entre átomos e planetas, inclusive para propor uma explicação para a radioatividade que não incluísse a decomposição dos átomos. Ele sugeriu que o éter poderia “acumular ao redor de grandes centros de atração, como o Sol, entre os corpos celestes, ou o urânio e o tório, no mundo dos átomos” (Mendeleev, 1904, s.p.), e daí procura construir uma explicação para a radioatividade.

Observa-se, portanto, a consolidação da ideia de que os sistemas planetários são bons análogos para se compreender os átomos e as moléculas: a analogia evolui juntamente com as ideias de Mendeleev, e vai incorporando novas possibilidades de explicação com o passar do tempo.

Considerações Finais

Mendeleev foi um cientista russo do século XIX que desenvolveu uma série de concepções originais no campo da química, influenciadas pelo ambiente sócio-científico-cultural característico do período. A ciência moderna experimentava importantes avanços, em particular no campo da química. A consolidação da concepção lavoisieriana de substância simples levou também à preparação de novas dessas substâncias ao longo do século. A multiplicação das substâncias elementares gerou novos desafios para a compreensão da matéria. A química orgânica também foi se desenvolvendo como um grande ramo da química, e as aplicações dessa ciência foram se diversificando.

As grandes divergências em torno de conceitos fundamentais da química, que se acumularam ao longo do século, culminaram no Congresso de Karlsruhe, (1860), cujo objetivo foi alcançar consensos a respeito desses conceitos, trazendo uma nova luz para o desenvolvimento dos trabalhos em química.

Mendeleev, então docente em São Petersburgo, participou do Congresso de Karlsruhe. Os conceitos ali discutidos, e especialmente o trabalho de Stanislao Cannizzaro, influenciaram profundamente os estudos posteriores de Mendeleev, e abriram o caminho que o levou à proposição da lei periódica. Não obstante, o debate concernente à realidade dos átomos permaneceu em aberto, e haveria de se prolongar até o início do século XX.

Mendeleev estava inserido nesse debate, e suas concepções foram, e continuam sendo, objeto de interesse para muitos historiadores e filósofos da ciência, dada a importância desse cientista no desenvolvimento da química moderna. Neste trabalho, procuramos enfocar alguns aspectos das concepções de átomo e de elemento químico na obra de Mendeleev, com especial interesse para as ressalvas feitas por ele em relação à realidade dos átomos, em vários pontos de sua obra.

Mendeleev, de acordo com o nosso entendimento, concebia os elementos químicos, entidades portadoras da individualidade química, como sendo as entidades fundamentalmente necessárias para a compreensão dos fenômenos da química, não sendo necessário recorrer aos átomos para isso. Observamos que Mendeleev procurou não se comprometer com a realidade de átomos “fisicamente” indivisíveis – os quais, se explicavam muito bem uma série de fenômenos químicos, não davam conta dos compostos indefinidos, que estiveram entre os temas de investigação de Mendeleev desde o início de sua carreira científica.

Nos diferentes textos de Mendeleev que nos foi possível consultar, é possível observar o uso recorrente da analogia entre átomos e planetas. Em seu texto mais tardio, “An Attempt towards a chemical conception of the ether”, Mendeleev finalmente afirma sua confiança na realidade dos átomos, o que, de certa forma, ia ao encontro de seu desejo de vislumbrar unidade na Natureza. Entretanto, em seus textos anteriores, nos quais a teoria atômica é tratada como uma hipótese de trabalho, a analogia entre átomos e planetas também exerce um papel importante na argumentação de Mendeleev. Os planetas remetem à ideia de individualidade, essencial para a compreensão do conceito de elemento químico; mas, ao mesmo tempo, não remetem à ideia de indivisibilidade física

(afinal, pode-se conceber que um planeta seja “mecanicamente” divisível, ainda que isso não seja factível) – o ponto da hipótese atômica que então permanecia não conclusivo para Mendeleev.

Estudos de caso históricos no ensino de química

Ao desenvolvermos um estudo de caso em sala de aula, podemos proporcionar aos alunos uma incursão pela história de um determinado conceito ou “descoberta”, mostrando como o pensamento científico é desenvolvido tendo como influências os contextos sociais, econômicos, culturais e religiosos.

Este estudo de caso, investigando as concepções de Mendeleev relativas aos átomos e aos elementos químicos, desperta reflexões a respeito da construção e da transformação dos conceitos, e da importância desse processo no desenvolvimento da ciência. Matthews, ao citar Mach, procura destacar a importância da compreensão do desenvolvimento histórico para a compreensão dos conceitos científicos:

A investigação histórica do desenvolvimento da ciência é extremamente necessária, a fim de que os princípios, que guarda como tesouros, não se tornem um sistema de preceitos apenas parcialmente compreendidos ou, o que é pior, um sistema de pré-conceitos. A investigação histórica não somente promove a compreensão daquilo que existe agora, mas também nos apresenta novas possibilidades (Mach *apud* Matthews, 1992).

A discussão do desenvolvimento de um conceito contribui para desmistificar a ciência, auxiliando o aluno no entendimento de que os conceitos são construídos em função de problemas, teóricos ou aplicados, que se apresentam à comunidade científica ao longo da história. Assim sendo, o que se pretende, quando se busca promover a aproximação entre a história e o ensino de ciência, não é trabalhar com os educandos apenas “curiosidades”, mostrando uma história composta por uma infinidade de “gênios” que criaram teorias da noite para o dia, sem o mínimo esforço; mas sim, “acabar com a repetição de informações que não podem ser compreendidas pelo aluno, e começar a estabelecer estratégias e conteúdos que permitam ao aluno realizar um trabalho cognitivo, e superar seus obstáculos da aprendizagem” (Gagliardi, 1988).

Referências Bibliográficas

Afonso, R. P. De Mendeleev a Thomson: La Classificación de los Elementos. *Seminário Orotava de Historia de la Ciencia*. Año III: 459, 1996.

Alfonso-Goldfarb, A. M.; et al. *Escrevendo a História da Ciência*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2004.

Alfonso-Goldfarb, A. M. *O que é História da Ciência?* São Paulo: Brasiliense, 1994. (Coleção Primeiros Passos).

Alfonso-Goldfarb, A. M, Ferraz, M. H. M. A química flogística do século XVII francês. *Enlaces – Revista de Ciências Sociais e Humanidades*. 2, 19-26, 1995.

Almigren, B. D. I. Mendeleev and Siberia. *Ambix*: 45 (2). 50-65, 1998.

Anderson, P. *Passagens da Antiguidade ao Feudalismo*. Trad. Beatriz Sidou. 5ª ed. São Paulo: Ed. Brasiliense, 1994.

Bensaude-Vincent, B. Mendeleev's periodic system of chemical elements. *Br. J. Hist. Sci*: 19, 3-17, 1986.

Bensaude-Vincent, B. Stengers, I. *História da Química*. Trad. Raquel Gouveia. Lisboa: Instituto Piaget, 1992.

Barnett, V. *D.I. Mendeleev Russian Protectionism and German Political Economy*.
Deutsche und russische Ökonomen in Dialog: Wissenstransfer in Metropolis –
Verlog GmbH, 2005.

Barra, E. et al. (orgs.), A natureza do mecanicismo cartesiano. *Anais do III Encontro da Rede Paranaense de Pesquisa em História e Filosofia da Ciência*.
Curitiba: SCHLA/UFPR, 2005.

Brito, A., Rodriguez, M., Niaz, M. A Reconstruction of Development of the Periodic Table Based on History and Philosophy of Science and Its Implications for General Chemistry Textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*. 2 (1), 84-111, 2005.

Brooke, J. H. Laurent, Gerhardt, and the Philosophy of Chemistry. *Historical Studies in the Physical Sciences*.6, 405 – 429, 1975.

Camel, T.O., Koehler, C.B.G, Filgueiras, C.A.L. A química orgânica na consolidação dos conceitos de átomo e molécula. *Quim. Nova*: 32, (2), 543-553, 2009.

Camel, T.O., *A relevância das teorias da química orgânica na aceitação do conceito de molécula e de uma realidade atômica*. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

Debus, A. G. A ciência e as humanidades: a função renovadora da indagação histórica. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*: 5, 3 – 13, 1991.

Duclos, M. John Locke – Biografia e pensamentos. [acesso em 12/11/2010]

Disponível em: <www.consciencia.org/locke.shtml>.

Fernandes, C. Só Biografias. Thomas Andrews. [acesso em 25/08/2008].

Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/biografias/ThomaAnd.html>>.

Filgueiras, C. A. L., Entre a Batuta e o Tubo de Ensaio: A Carreira Admirável de Alexandre Borodin. *Quím. Nova*. 25 (6): 1040 – 1049, 2002.

Frezzatti, W. A. Boyle, a Introdução do Mecanicismo na Química. *Varia Scientia*: 5, (9), 2005.

Fruns, J.L.C. *Evolución de los Conceptos Químicos hasta El siglo XIX*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, 1999.

Gagliardi, R. Como utilizar la historia de las ciencias em la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*. 6(3): 291-296, 1988.

Garcia, J.L.A. Boscovich y la teoria atômica. *Boletín de la Sociedad Mexicana de Física*. Julio, 2005.

Gonzales, I. P. Sobre átomos y moléculas: a historia de una polémica, (1803 – 1890). *Anales da La Real Sociedad Española de Química. Segunda Época*. Abril-junio: 34 – 42, 1999.

Gordin, M. D. The organic root's of Mendeleev's periodic Law. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*. 32(2): 263-290, 2002.

Hendry, R. F. Lavoisier and Mendeleev on the Elements. *Foundations of Chemistry*. 7 (1): 31-48, 2005.

Horner, L. Wilson, J. Eastern Siberia: Vast Potential. The School of Russian and Asian Studies. [acesso em 08/07/2009]. Disponível em: < http://www.sras.org/eastern_siberia>.

Kaji, M. D. I. Mendeleev's Concept of Chemical Elements and the Principles of Chemistry. *Bull. Hist. Chem.* 27 (1), 2002.

_____. Mendeleev's Discovery of the Periodic Law: The Origin and the Reception. *Foundations of Chemistry*. 5: 189-214, 2003.

Kultgen, J. H. Philosophic conceptions in Mendeleev's Principles of Chemistry. *Philosophy of Science*. 25 (3): 177 – 183, 1958.

Lavoisier, A. L. *Tratado Elemental de Chimica*. Edicion Fascimular. Traducido al Castellano para el uso del Real Seminario de Minería de México. Dispuesto en un orden nuevo según los descubrimientos modernos por D. Mariano de Zúñiga y Ontiveros, Año de 1797. México: Universidad Autonoma Metropolitana – Xochimilco, 1990.

Martins, R. A. Ciência *versus* historiografia: os diferentes níveis discursivos nas obras sobre história da ciência. In: A. M. Alfonso-Goldfarb e M. H. R. Beltran, *Escrevendo a História da Ciência*. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2004, pp. 115-145.

Mackenzie, D. Curran, M. *A History of Russia and the Soviet Union*. Georgetown: The Dorsey Press, 1977.

Matthews, M. History, Philosophy, and Science Teaching: the present rapprochement. *Science & Education*. 1 (1): 11-47, 1992.

Melnikov, V. P. The Way to Siberia. [acesso em 08/2009]. Disponível em: <<http://www.ikz.ru/siberianway/engl/index.html>>.

Mendeleev, D. I. *The Principles of Chemistry*. Trad. da 5ª edição russa por G. Kamensky. Londres: Longmans, 1891.

_____. *The Principles of Chemistry*. Tradução da 6ª edição russa. New York: P. F. Collier and Son, 1901.

_____. An Attempt to Apply to Chemistry one of The Principles of Newton's Natural Philosophy *Proceedings of the Royal Institution*. 12: 506-525, 1889.

_____. The Periodic Law of the Chemical Elements. *Journal of the Chemical Society*. 55: 634-56, 1889.

_____. An attempt Towards A Chemical Conception Of The Ether, G. Kamensky trad. Londres, Longmans, 1904.

Mora, J. F. *Dicionário de Filosofia – Tomo IV*. Barcelona: Edições Loyola, 1994

Muro, C. A. Mapa da Sibéria. [acesso em 03/09/2010]. Disponível em: <<http://www.carmenarnaumuro.com/images/JORNADAS/mapas/mapa2.jpg>>.

Oki, M.C.M., O Conceito de Elemento da Antiguidade à Modernidade. *Química Nova na Escola*.16: 21 – 25, 2002.

_____. O congresso de Karslrhue e a busca pelo consenso sobre a realidade atômica do século XIX. *Química Nova na Escola*. 26: 24-28, 2007.

Paneth, F. A. Chemical Elements and Primordial Mattr: Mendeleeff's view ad the Present Position, in Chemistry and Beyond. *Interscience Publishers*, p. 53-72, 1965.

Patiño, M., Manzano, R. Dun inestable elemento a un elemento inestable: Lembrando Mendeleev. *Vixésimo Congreso de Enciga*, 1-82, 2008. [acesso em 11/2008]. Disponível em: < www.enciga.org/congreso.../LIBRO_GUIA_XX_CONGRESO.pdf>

Partington, J. R. *A History of Chemistry*. v.3. London: MacMillan, 1962.

Rocha, M. Teoria Atômico Molecular.Mendeleev. [acesso em 20/08/2008]. Disponível em: <<http://allchemy.iq.usp.br/metabolizando/beta/01/mendeleee.htm>>.

Rocke, A. J. In search of El Dorado: John Dalton and the origins of the atomic theory. *Social Research* 72, 125-158, 2005.

Scerri, Eric R. *The Periodic Table. Its Story and Its Significance*. New York: Oxford University Press, 2007.

_____. Some Aspects of the Metaphysics of Chemistry and the Nature of the Elements. *International Journal for Philosophy of Chemistry*. 11 (2):125-145, 2005.

Sigfried, R. The Chemical Basis for Prout's hypothesis. *J. Chem. Educ.* 33 (6): 263, junho, 1956.

Simmons, J. *Os cem maiores cientistas da História*. São Paulo: Ed. Difel, 2003.

Stackenwalt, F. M. Emergence of the Modern Russian Petroleum Industry. *Ambix*. 45 (2): 66-83, 1998.

Tellez, C. A. S. O Atomismo de Leucipo e Demócrito. *Química Nova*. 15 (1): 95 – 98, 1992.

_____. Alcances do Atomismo de Leucipo e Demócrito na Ciência Química Atual. *Química Nova*. 16 (5), 477 – 480, 1993.

Viana, H.E.B. *A Construção da Teoria Atômica de Dalton como Estudo de Caso – e algumas reflexões para o ensino de química*, 2007.

Viana, H. E. B., Porto, P. A. O processo de elaboração da teoria atômica de John Dalton, *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*. 7: 4 – 12, 2007.

Wurtz, Ad. *Atomic Theory*. 7ªed. Translated by E. Cleminshaw, M.A., F.I.C.
Londres: Kegan Paul, Trench, Trübner & Co. Ltd., 1898.

Zaterka, L. Alguns aspectos da teoria da matéria: atomismo, corpuscularismo e filosofia mecânica. In C. C. Silva (org.), *História e Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências – da teoria para a sala de aula*. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

Sítios da Internet:

Jonh Locke. [acesso em 12/11/2010]. Disponível em :
<http://en.wikipedia.org/wiki/John_Locke>.

Sibéria. [acesso em 01/2010]. Disponível em:
<<http://en.wikipedia.org/wiki/Siberia>>.