

O Realismo Fisicalista no Atomismo Contemporâneo Pré-Quântico¹

Eduardo Simões

Resumo

O presente artigo é parte de uma trilogia que versará sobre a historiografia do atomismo nos séculos XIX e XX. A proposta geral do projeto é apresentar as teorias atômicas sob os seguintes prismas: i) do realismo fisicalista; ii) do antirrealismo científico; e iii) da relação entre atomismo e metafísica nesses mesmos séculos. O que ora se apresenta, portanto, é a primeira parte do primeiro tema dessa trilogia, que trata do realismo fisicalista pré-quântico. Afirma-se isso porque a segunda parte, necessariamente, há de versar sobre o realismo fisicalista no interior da própria mecânica quântica, que está atrelado às interpretações ortodoxas dessa mesma teoria. Aqui, por ora, o que apresentamos como realismo fisicalista, fixa-se na concepção histórica de uma ciência Física que acredita na realidade dos objetos em si, de que eles existem, e cuja existência independe da nossa mente. Essa parece ter sido a postura interpretativa das teorias aqui expostas, que admitem a existência do mundo fora das nossas mentes, mas que veem como imprescindível a atuação da razão no deciframento da própria realidade.

Palavras-chave: atomismo, realismo, Física, séculos XIX e XX.

Abstract

This article is part of a trilogy that will deal with the historiography of atomism in the 19th and 20th centuries. The general proposal of the project is to present atomic theories under the following points of view: i) physicalist realism; ii) scientific anti-realism; and iii) the relationship between atomism and metaphysics in those same centuries. What is now presented, therefore, is the first part of the first theme of this trilogy, which deals with pre-quantum physicalist realism. This is stated because the second part, necessarily, must deal with physicalist realism within quantum mechanics itself, which is linked to the orthodox interpretations of that same theory. Here, for now, what we present as physicalist realism is fixed on the historical conception of a Physical science that believes in the reality of the objects themselves, that they exist, and whose existence is independent of our mind. This seems to have been the interpretive stance of the theories exposed here, which admit the existence of the world outside our minds, but which see the role of reason in deciphering reality itself as essential.

Keywords: atomism, realism, physics, 19th and 20th centuries.

INTRODUÇÃO

A história do realismo e antirrealismo na Física dos séculos XIX e XX trata-se, na verdade, de desdobramento de discussões mais antigas em Filosofia e que envolve um debate entre materialistas e idealistas acerca da natureza da realidade. Tal discussão acabou por promover desenvolvimentos de outras

¹ Esse trabalho contou com o apoio da Universidade Federal do Tocantins (UFT) que concedeu licença ao pesquisador para cumprir com as atividades de Residência Pós-Doutoral no âmbito da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

doutrinas sob a égide de nomenclaturas que fazem defesa de ideais mais diversos, como: naturalismo, determinismo, reducionismo, positivismo, empirismo, fideísmo, ceticismo, sensualismo, solipsismo, agnosticismo, etc. Todas essas doutrinas estão, de certa forma, envolvidas com a questão da natureza última da realidade e compõem o debate inicial fomentado pelas correntes materialistas e idealistas dentro da história da Filosofia.

Em termos resumidos, o materialismo defende a ideia do reconhecimento da existência dos *objetos em si*, fora da mente, e de que as ideias e as sensações são cópias ou reflexos destes objetos. Por outro lado, o idealismo concebe a realidade como existindo dependentemente da mente humana. Os objetos não existem *fora da mente*, eles não são mais do que *combinações de sensações*. Vê-se, portanto, que para o idealista a ausência do observador consciente, que capta e reflete acerca da realidade, inviabiliza a existência da própria realidade.

No campo filosófico o debate materialismo vs. idealismo retroage a disputas na Antiguidade grega que envolvem personagens como Platão² e Epicuro que tratam da questão a respeito da relação entre o ser e o pensar ou sobre aquilo que seria originário: a natureza ou o espírito? Como se disse, essa questão ganhou relevância filosófica por séculos e de tempos em tempos ela se revela ora mais forte em tons materialistas (Leucipo, Demócrito, Epicuro, Lucrécio, La Mettrie, Holbach, Gassendi, Feuerbach, Marx, Engels, Lênin, etc.) ora em tons idealistas (Platão, Berkeley, Kant, Fichte, Schelling, Hegel, etc.). Sobre o materialismo atomista de Epicuro, ressalvado os desenvolvimentos históricos da teoria, esse, de uma forma ou de outra, reflete as posições materialistas ortodoxas da Física contemporânea. Por outro lado, teorias como as do misticismo quântico e aquelas que dão ênfase à subjetividade no entendimento da realidade, podem também estar atreladas ao idealismo filosófico, quando da defesa de que a mente tem um papel essencial na constituição da realidade. Em Filosofia, quem radicaliza esse tipo de ideia é o idealismo imaterialista de George Berkeley (1685-1753).

Berkeley no seu *Tratado sobre os Princípios do Conhecimento Humano* (1710) e em *Três Diálogos entre Hylas e Phylonous* (1712)³, defende seu imaterialismo sustentado na negação da realidade de qualquer objeto no mundo exterior que não fosse percebido pelo *espírito* ou pela *mente*. Para ele, *ser é ser percebido* (*esse percipiti*), isto é, as coisas só existem se, e enquanto, alguém as percebe. O ponto de partida de seu pensamento, no entanto, é por demais conhecido: seu ideal é o da defesa da religião contra

² Acerca do pensamento de Platão, a despeito das disposições em contrário, como é o caso da interpretação de Leibniz (1768, p. 186), alguns comentadores retiram-no do rol dos idealistas e rotulam-no como defensor do “realismo das ideias”, o que para nós somente sedimenta e aprofunda sua concepção idealista.

³ BERKELEY, George. *Três Diálogos entre Hylas e Phylonous*. Trad. Gil Pinheiro. São Paulo: Ícone, 2005. (Coleção Fundamentos de Filosofia)

as ameaças da filosofia atomista (Gassendi, Galileu, Basson, Bérigard) e contra todas as ideias que pudessem conduzir ao materialismo e ao ceticismo. Uma filosofia corpuscular conflita com os princípios religiosos, pois se todos os eventos são determinados por condições físicas, somos forçados a assumir também uma concepção materialista do “espírito humano”. Em virtude disso, na mente do bispo Berkeley, faz-se necessário a destruição do ceticismo propiciado pela nova ciência materialista, visto que suas “verdades” são totalmente incompatíveis com a religião revelada. Conforme disse, “como já mostramos, a doutrina da matéria ou substância corpórea foi verdadeiro pilar ou suporte do ceticismo e sobre a mesma base assentaram os sistemas do ateísmo e da irreligião”⁴.

Em suma, o que defende o imaterialismo de Berkeley é que as coisas são um *conjunto de ideias*. Os objetos não existem fora da mente e a realidade é aquilo que nós percebemos, isto é, *combinações de sensações*. Segundo Berkeley, “o objeto e a sensação são a mesma coisa e não podem por isso ser abstraídos um do outro”⁵. O espaço e todas as coisas que nele existe (casas, montanhas, rios, vales, árvores, etc.) são em si impossíveis, simples imaginações. “[...] Se a palavra substância for tomada no sentido filosófico – como a base de acidentes ou de qualidades (existentes) fora da consciência –, então, reconheço realmente que a elimino, se é que se pode falar de eliminação daquilo que nunca existiu, não existiu sequer na imaginação”⁶.

Com essa postura, Berkeley inaugura a corrente do idealismo imaterialista dogmático, cujos reflexos hão de se apresentar, com nuances particulares, nas filosofias da ciência de Ernst Mach, Richard Avenarius, Karl Pearson, P. Duhem e Henri Poincaré e que, conseqüentemente, refletir-se-á em algumas interpretações da realidade na Física do século XX. Por outro lado, o materialismo filosófico apresentar-se-á, sob forma de realismo científico, em toda vertente ortodoxa da Física contemporânea, cujas linhas mestras serão apresentadas adiante. Resta-nos, entretanto, apresentar o que se espera com tradução dos termos materialismo e idealismo para a Física dos séculos XIX e XX.

O que apresentamos por materialismo no campo da Filosofia aqui será traduzido para o campo da Física com a terminologia de *realismo*, a saber, realismo fisicalista. Em suma, a tese que lhe subjaz é a de que tudo o que existe pode ser reduzido a realidades físicas, como matéria, energia, entropia, campos, etc. No limite, tal concepção também fixa-se na ideia da existência dos objetos em si, que são reais, e cuja realidade independe da nossa mente. Nesse caso, o sujeito epistêmico pode ser eliminado e, ainda assim, a realidade permanecerá como está. As ideias e as sensações são cópias ou reflexos destes objetos. Tal abordagem realista fisicalista não pode ser confundida com positivismo, que se trata de concepção diversa. O positivismo, no pensamento científico, tem como tarefa fundamental a descrição positiva dos fenômenos

⁴ BERKELEY, 1710, § 92.

⁵ BERKELEY, 1710, § 5.

⁶ BERKELEY, 1710, § 37.

naturais a partir dos dados da experiência. O positivista fixa-se nas observações, nos *dados positivos* obtidos pelos instrumentos científicos e declara como *metafísica* qualquer teoria que reconheça a existência e a cognoscibilidade da realidade objetiva fundada em premissas *não observáveis*. Há de se ressaltar, entretanto, que, diferentemente do positivismo, o realismo científico, no contexto da descoberta, pode manter uma perspectiva realista de entidades não observáveis, desde que, a ausência de elementos substanciais – não observáveis – encaminha todo o sistema ao colapso completo, como é o caso da negação da existência de um elétron, por exemplo. Ao usar o termo teórico “elétron” um investigador da natureza realista está assumindo um compromisso com a existência de tais partículas.

Em virtude de nossos propósitos, iremos abordar dois conjuntos de interpretações da física atômica nos séculos XIX e XX que, na nossa avaliação, de uma forma ou de outra, encaixam-se sob o rótulo de teorias realistas, visto dos seus compromissos com a realidade dos elementos que lhes subjazem: o atomismo químico e o atomismo físico. Iremos excluir a exploração de subnomenclaturas que, ao nosso ver, redundam em desdobramentos do realismo fisicalista e, cuja diferença, acrescenta muito pouco ao entendimento geral do termo (realismo ontológico, realismo epistemológico, realismo objetivista, realismo desubstancializado, etc.). Cumpre-nos, portanto, apresentar as linhas mestras do realismo fisicalista das teorias atômicas desenvolvidas nos séculos XIX e XX, a fim de preparar o caminho para o entendimento de todo antirrealismo que nasceu com a teoria quântica.

O ATOMISMO QUÍMICO E OS PRECEDENTES PARA A FORMAÇÃO DE UMA VISÃO FÍSICA DA REALIDADE DO ÁTOMO

O ideal que governava a observação e a explicação físicas de Demócrito até Descartes chegando aos filósofos naturalistas do século XIX, era aquele que admitia que a inteligência seria capaz de um conhecimento total e definitivo da natureza – que existia independentemente de nossas mentes – donde o comportamento e o movimento da matéria, pelo seu caráter de objetividade, estaria sujeito a leis rígidas. Tratava-se de um mecanicismo que supunha que todo o universo se reduzia a um sistema de volumes geométricos animados de movimentos, os quais eram considerados como pequenas partes indivisíveis da matéria, os átomos. Eram justamente esses componentes últimos da realidade quem propiciavam a explicação, a diversidade, a mensurabilidade e a tangibilidade da matéria. “Durante a segunda metade do século XIX a matéria parecia ser algo de permanente a que nos podíamos agarrar. *Existia* um pedaço de matéria que nunca tinha sido criado (tanto quanto cada físico sabia) e que nunca podia ser destruído! Podia-se pegar nele e sentir que não fugiria por entre os dedos”⁷.

⁷ SCHRÖDINGER, Erwin. *Ciência e Humanismo*. Trad. Jorge Almeida e Pinho. Lisboa: Edições 70, 1999. p. 104. (Coleção Perfil História das Ideias e do Pensamento)

Visto dessa forma, o realismo fisicalista era quem vigorava. Os físicos clássicos estavam convencidos de que os átomos eram individuais, identificáveis, pequenos corpos, tais como os demais objetos palpáveis que nos rodeiam. Tais átomos se movimentavam segundo as forças de partes próximas da matéria exercidas sobre eles. Todo o seu movimento era previsível, possibilitando, com isso, a formulação de leis, já que o seu comportamento era rigidamente determinado pelas condições iniciais. A previsibilidade era possível ao se lançar mão de um instrumento matemático, fundado sobre um sistema de equações diferenciais, para abreviar o processo de análise do comportamento da matéria passo a passo, permitindo analisar o que poderia acontecer à velocidade de uma partícula em movimento à medida que a diferença temporal se tornasse infinitesimal. Essa posição realista constituía-se da ideia de que as teorias científicas não eram puramente construções mentais possíveis. Elas eram, de fato, conhecimentos verdadeiros a respeito do mundo, da realidade. Dessa forma, não havia como separar a questão do realismo científico da questão da verdade, pois em toda posição realista a aceitação de uma teoria científica envolvia a crença de que ela era verdadeira.

Pode-se dizer que a concepção moderna de átomo enquanto corpúsculo permeado por um enorme espaço vazio não nasceu no campo da Física e sim da Química e Robert Boyle (1627-1691) foi o grande precursor. Em 1661, quando publicou *O químico cético*, Boyle questionou uma concepção que retroagia a Empédocles e Aristóteles e que vigorava até o século XVII: a de que o fundamento último da realidade estava sustentado sobre os quatro elementos primordiais, a saber, água, fogo, terra e ar. Mesmo com a luta de Francis Bacon contra os ídolos e com a sua inauguração do método científico de fundo empirista, ainda assim, as pessoas não reconheciam que esses quatro elementos eram feitos de uma combinação de elementos mais básicos. Boyle, imerso na pesquisa qualitativa, utilizou-se ferramentas científicas (fotômetro de chamas, testes de triagem, testes de precipitação, etc.) para descobrir os elementos básicos componentes dos minerais e outros materiais. Em 1662, ele descobriu que o volume de um gás é inversamente proporcional à pressão exercida sobre ele. Se se dobra a pressão sobre o gás, reduz-se conseqüentemente o seu volume à metade; reduzindo-se, por outro lado, a pressão para a metade do estado original, o gás dobrará o seu volume. Com isso, a conclusão de Boyle foi a de que os gases são feitos de minúsculos corpúsculos permeados por um enorme espaço vazio⁸. Essa concepção fora endossada por seu amigo Isaac Newton (1643-1727) quando se referiu aos átomos como “pequenas partículas dos corpos de certos poderes, virtudes ou forças por meio dos quais agem a distância não apenas sobre os raios de luz, refletindo-os, refratando-os e inflectindo-os, mas também umas sobre as outras, produzindo grande parte dos fenômenos da natureza”⁹.

⁸ BOYLE, Robert. *The Works of the Honourable Robert Boyle*. Londres: Ed. Thomas Birch, 1672. 6 v.

⁹ NEWTON, Isaac. *Opticks: Or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflection, and Colours of Light*. 3. ed. Londres: Printed for William and John Innys at the Weft End of St. Paul’s, 1721. p. 350.

Mesmo com a apresentação racional prévia da realidade do átomo feita por Boyle será John Dalton (1766-1844) aquele a construir a primeira teoria moderna dos átomos, seguido de Dmitri Mendeleev (1834-1907) que desenvolverá a estrutura conceitual para os elementos que ocorrem na natureza, com os seus respectivos números e pesos atômicos.

Antoine Laurent Lavoisier (1743-1794) foi quem, no desenvolvimento da teoria de Joseph Priestley (1733-1804) – que havia isolado o oxigênio em 1774 e descrito o seu papel na combustão e respiração, mas que ainda mantinha a concepção de ar desflogistizado em alusão ao flogisto¹⁰ de Georg Ernst Stahl (de 1729) –, transpôs a teoria do flogisto pesando cuidadosamente as substâncias para determinar o efeito do aquecimento em cada uma delas. Com isso, ele isolou o oxigênio do ar e desenvolveu a teoria sobre a importância do oxigênio no processo da combustão e na respiração. Na utilização de procedimentos quantitativos e experimentos, Lavoisier chega algumas conclusões: I) que uma substância só pode ser considerada elementar se não se subdividir em substâncias mais simples ao ser tratada quimicamente; II) que a água era produto da combinação de oxigênio e hidrogênio; III) que o oxigênio tem uma lógica própria¹¹; IV) que era possível enunciar uma lei da conservação das massas – que foi resumida no seguinte princípio: “na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”; V) que era possível expandir a lista de elementos conhecidos a 33 elementos – isso foi feito no seu *Traité Élémentaire de Chimie* (1789). Foi justamente a base dos estudos de Lavoisier quem proporcionou a Dalton o caminho para a formulação da teoria moderna do átomo.

Retomando o trabalho de Dalton, sua obra *A New System of Chemical Philosophy* (1808) foi quem lhe granjeou o *status* de pai da teoria atômica moderna. Nessa obra, ele formula o princípio de que cada elemento químico é composto de átomos idênticos de massa característica e que os compostos são combinações de átomos de elementos diferentes em proporções numéricas simples. Aprimora também o conceito de *elemento* de Lavoisier, fornecendo-lhe uma fundamentação ontológica através da articulação com o conceito de átomo¹². A reelaboração do conceito possibilitou a compreensão dos átomos como unidades mínimas de combinação da matéria. Em uma apresentação à Sociedade Literária e Filosófica de Manchester sobre a mistura e a solubilidade de diferentes gases, Dalton confirma o sucesso de suas investigações a respeito da realidade dos átomos, quando diz: “Uma investigação sobre os pesos relativos das partículas últimas dos corpos é um assunto, até onde eu sei, inteiramente novo. Eu venho, ultimamente,

¹⁰ Segundo Stahl, o flogisto tratava-se de uma substância invisível, inodora, insípida, incolor e de peso negativo que justificava o fato de que um material se tornava mais pesado quando entrava em combustão, sofria corrosão ou era calcinado, isso porque, perdia o seu flogisto. Quanto mais combustível for um material, mais flogisto liberta na combustão.

¹¹ Lavoisier foi o primeiro a empregar o termo oxigênio, de *oxygine*, isto é, *formador de ácido*

¹² OKI, Maria da Conceição Marinho. Controvérsias sobre o atomismo no século XIX. *Quim. Nova*, Vol. 32, No. 4, 2009, p. 1072-1082.

empreendendo essa investigação com notável sucesso”¹³. O sucesso da investigação de Dalton se pauta nas seguintes conclusões: a) os elementos são compostos de minúsculas partículas indivisíveis, denominadas *átomos*; b) os átomos de cada elemento são parecidos, mas diferem dos átomos de todos os demais elementos (define o peso atômico como a massa de um átomo de hidrogênio); c) não há criação nem destruição de matéria durante as transformações químicas; d) a combinação química ocorre quando os átomos de dois ou mais elementos formam uma *firme união*, ou molécula.

O trabalho de Dalton foi a primeira aplicação sistemática e bem-sucedida do atomismo às observações quantitativas. Entretanto, um problema ainda persistia no atomismo químico moderno, contra o qual Dalton já havia investido. A questão da indivisibilidade do átomo era crucial para a manutenção da teoria, sem ela faltaria a base firme para a teoria química, conforme as leis de Prout e do próprio Dalton. Um problema, contudo, fez-se presente: a partir de um volume de oxigênio e um de nitrogênio, dois volumes de óxido de nitrogênio são formados. Se a partir de um átomo de oxigênio e um de nitrogênio formou-se dois óxidos de nitrogênio, isso significa que os átomos foram divididos, o que perverteria o princípio da indivisibilidade do átomo¹⁴. A solução para esse problema veio por meio das leis volumétricas de Joseph Gay-Lussac (1778-1850) e da hipótese de Amadeo Avogadro (1776-1856).

A lei volumétrica dos reagentes gasosos em uma reação química foi enunciada por Lussac em 1808 e apresentada à “Sociedade de Arcueil” em 1809, e diz:

Gases [...] combinam-se entre si em proporções muito simples, e a contração de volume que eles experimentam durante a combinação também segue uma lei regular. Compostos de substâncias gasosas umas com as outras são sempre formados nas razões mais simples (nas proporções mais simples) e de forma que quando um dos termos é representado pela unidade, o outro é 1 ou 2 ou no máximo 3 [...]¹⁵.

Seguindo a tradição empirista do início do século XIX que valorizava as propriedades mensuráveis, como volume e equivalente, e questionando o uso de entidades não visíveis como os átomos, a lei de Lussac especifica que “i) as combinações dos gases sempre ocorrem em proporções simples de volume; ii) quando o produto da reação é ela mesma um gás, seu volume também forma uma proporção simples com aquelas de seus componentes”¹⁶. Foram justamente as ideias de Lussac sobre a combinação gasosa que deram a Avogadro a possibilidade de formular, em 1811, as hipóteses de que as partículas elementares não são

¹³ DALTON, 1805 *apud* OKI, 2009, p. 1073.

¹⁴ ROCHA, Gustavo Rodrigues. *História do atomismo*: como chegamos a conceber o mundo como o concebemos. Belo Horizonte: Argumentvm, 2007.

¹⁵ LUSSAC, 1809 *apud* OKI, 2009, p. 1074.

¹⁶ ROCHA, 2007, p. 74.

necessariamente átomos, mas podem ser grupos de átomos unidos em moléculas; e de que volumes iguais de gases contêm números iguais de moléculas.

Introduzindo suas próprias ideias sobre a constituição de moléculas, Avogadro usou preferencialmente o termo molécula em lugar de átomo na defesa do seu ponto de vista. Os dois termos eram usados no início do século XIX, embora os significados atribuídos diferissem dos atuais. Na sua hipótese mais popular, ele admitia que volumes iguais de gases diferentes, nas mesmas condições de temperatura e pressão continham o mesmo número de moléculas¹⁷.

Avogadro demonstrou que a sua hipótese estava de acordo com as observações de Lussac. Sua hipótese implica que as massas relativas das moléculas podem ser determinadas sem mesmo precisarmos observar um átomo ou molécula individual, basta medir as massas relativas das amostras macroscópicas sob condições ideais.

Apesar da exatidão e utilidade, a hipótese de Avogadro não condizia com princípios aceitos na época. A diferenciação entre os conceitos de átomo e molécula não aconteceu com facilidade naquele período. Foi somente com a expansão gradual da lista de elementos que ocorrem naturalmente que acabaram por conduzir à tabela periódica desenvolvida de maneira independente por Julius Lothar Meyer (1830-1895) e Dmitri Ivanovitch Mendeleev.

Em 1869 eram conhecidos 63 elementos naturais quando Mendeleev publicou a sua tabela que refletia a periodicidade dos elementos. Na prática, o que Mendeleev fez foi preparar um conjunto de cartões nos quais as propriedades dos elementos eram catalogadas separadamente e, ao ordenar e reordenar os cartões, percebeu que as propriedades (peso atômico, gravidade específica, volume, valência, calor específico, etc.) recorriam periodicamente (por isso, tabela periódica) na organização dos cartões, de acordo com o peso atômico crescente. Assim, em virtude dessa regularidade entre pesos atômicos, foi possível prever, de uma forma razoavelmente acurada, várias propriedades físicas e químicas dos elementos que estavam faltando. Para isso, como ele descobriu que diversos elementos químicos não haviam ainda sido descobertos, deixou espaços em branco na tabela para que fossem preenchidos futuramente na medida da descoberta de tais elementos. Foi o que aconteceu, por exemplo, com um elemento de peso atômico 44 que teria que ser encontrado para ocupar o espaço seguinte ao cálcio. Em 1879 o químico sueco Lars Fredrik Nilson (1840-1899) descobriu o escândio.

¹⁷ OKI, 2009, p. 1074.

Posteriormente, duas novidades foram importantes para o desenvolvimento da tabela periódica: a primeira com relação aos gases nobres, que pareceram, inicialmente, não ter um lugar na tabela periódica, mas que depois, devido ao fato de não formarem combinações químicas graças à conexão mútua destes elementos, foram considerados um grupo especial; a segunda extensão, de grande importância para a fundamentação teórica da tabela periódica, foi a presença de isótopos, que se tornaram evidentes através do estudo da radioatividade. Contudo, a razão fundamental dessas observações, e da periodicidade das propriedades dos elementos, permaneceu desconhecida. Apenas meio século depois do trabalho de Mendeleev esses fenômenos receberiam um modelo explicativo através da estrutura eletrônica dos átomos¹⁸.

Até o fim do século XIX as teorias químicas não conseguiam dar conta do comportamento do átomo. Os físicos desse período achavam insatisfatória a descrição do átomo feita por Dalton, visto que, essa não enquadraria no sistema newtoniano dos princípios físicos, bem como não dava conta do comportamento elétrico da matéria, isto é, não explicava o comportamento elétrico dos gases quando combinados à eletricidade. Foi o químico e físico britânico William Crookes (1832-1919) que, em 1879, apresentou o resultado de suas pesquisas envolvendo descargas elétricas através do gás.

Os experimentos com descarga elétrica nos gases raros já haviam retido a atenção de Faraday (1839), de Geissler (1860) e de Hittorf (1860), mas o estudo completo do que G. H. Wiedemann (1826-1899) chamou de “raios catódicos” se deu com Crookes. Com o uso de um tubo de gás concebido pelo próprio Crookes, que continha um cátodo e um ânodo (elétrodos positivo e negativo), desenvolveu experimentos que permitiam que uma carga elétrica passasse pelo tubo. O resultado de suas observações foi o de que raios de composição e origem desconhecidos saíam do tubo quando eletricidade passava através do gás nele. Com isso, Crookes conseguiu identificar várias características desses raios, dentre elas, a de que os mesmos se propagam em linha reta e produzem fosforescência e calor em determinados materiais para os quais Crookes não encontrava uma resposta definitiva. Foi justamente o esforço para entender a natureza dos raios catódicos que propiciou uma ligação direta para a descoberta da estrutura e do comportamento dos átomos.

PRIMEIROS PASSOS NA DESCOBERTA DO COMPORTAMENTO DOS ÁTOMOS: A RADIAÇÃO IONIZANTE

¹⁸ ROCHA, 2007, p. 75.

A marca histórica do início da descoberta da radiação ionizante foi o dia 8 de novembro de 1895, quando Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923) retomou seus experimentos sobre a descarga elétrica nos gases rarefeitos.

Tendo enviado a descarga elétrica produzida por uma potente bobina de indução para o seu tubo de Crookes cuidadosamente envolvido em papel negro, ficou surpreendido com a fluorescência de um *écran* de platino-cianeto de bário abandonado em cima da mesa, e ainda mais pela persistência dessa fluorescência quando o *écran* foi afastado dois metros. Roentgen teve imediatamente a intuição genial de que a emissão proveniente do tubo devia ser análoga a uma luz¹⁹.

Entretanto, essa emissão era diferente da luz, uma vez que, a visão não a percebe, excita a fluorescência do platino-cianeto de bário, mas não produz efeito de calor, não reflete e nem sobre refração, polarização ou concentração por uma lente e nem interferência²⁰. Mesmo assim, Röntgen dá sequência aos seus experimentos metodologicamente conduzidos, utilizando-se de uma série de materiais alternativos (porta pintada por pigmento branco constituído de carbonato de chumbo, fio metálico enrolado em bobina, bússola e lâminas de metais diversos). Com esses experimentos, percebeu que os raios saíam do tubo e penetravam várias substâncias e objetos na sala, e que a origem da emissão se situava no ponto de impacto do feixe catódico com a parede do tubo que se tornava fluorescente. Depois de investigar o efeito por semanas, Röntgen dirigiu os raios para chapas de fotografias sensíveis e conseguiu registrar os ossos da mão da sua esposa em 22 de dezembro de 1895. Em virtude do uso do símbolo científico “X” para o que não se conhece, ele chamou aqueles raios de raio X. Pela sua descoberta do raio X, Röntgen se tornou o primeiro a receber o Prêmio Nobel de Física em 1901.

Algumas questões, entretanto, ficaram para as quais respostas eram necessárias: os raios catódicos seriam luz ou eletricidade? Seriam onda luminosa ou partícula material?

Antoine Henri Becquerel (1852-1908) que em 1896 estudava a fosforescência produzida por diversos tipos de rochas que brilhavam no escuro, ficou particularmente interessado pelos resultados de Röntgen e passou a testar a hipótese da relação entre os raios X e a luz. Em seu relatório à Academia de Ciência em Paris, em 24 de fevereiro de 1896, Becquerel informou que a fosforescência das rochas expostas à luz ultravioleta do sol também emite raios X. Entretanto, percebeu que algo estava errado, visto que as chapas fotográficas estavam registrando imagem, apesar de estarem guardadas numa gaveta escura. Foi aí que Becquerel deduziu que o urânio presente em um pedaço de sulfato potássico de urânio guardado

¹⁹ PIZON, Pierre. *O Átomo e a História*. Trad. A. Faia. Porto: Afrontamento, 1975. p. 67. (Col. Viver é Preciso)

²⁰ PIZON, 1975.

dentro da gaveta estava emitindo radiação sem ser exposto à luz solar. “Essa emissão chamada ‘radiação urânica’ é o ‘primeiro exemplo’ de um metal que apresenta um fenômeno do tipo de uma fosforescência invisível; apresenta-se semelhante aos raios X emitidos pelo tubo de Crookes, em particular pelas propriedades ionizantes, mas difere deles por uma energia incomparavelmente mais elevada”²¹.

Marie Curie (1867-1934) que estava fascinada com as descobertas dos raios X de Röntgen e com a radiação invisível do urânio por Becquerel, em 1896, escolheu como problema de tese de doutorado as seguintes questões: *Qual era a fonte da energia que escurecera as chapas fotográficas de Becquerel? O que eram os raios que emanavam do urânio?* Para responder a essas questões M. Curie fez um estudo sistemático de diversos minerais recorrendo às propriedades ionizantes da emissão por meio de um eletrômetro de piezoquartzo²² que fora concebido pelo seu esposo Pierre Curie (1859-1906) em 1885. Com o uso do eletrômetro M. Curie descobre que na pechblenda havia um corpo desconhecido cuja emissão superava em intensidade o urânio e o tório. Esse corpo fora designado por ela de polônio (cujo nome foi dado em homenagem à Polônia). Meses depois, ela anuncia a existência de outro elemento chamado rádio (que se tratava de um elemento um milhão de vezes mais radioativo que o urânio). Inventou o termo “radioatividade”, do latim *radius*, que significa “raio” para definir a espontaneidade da emissão e o seu caráter atômico. Foi M. Curie quem desenvolveu a teoria de que *a emissão dos raios tinha que ser um fenômeno advindo do interior do próprio átomo de urânio* e que átomos de elementos diferentes poderiam possuir um componente básico comum.

Ernest Rutherford (1871-1937) foi quem, em 1907, fez uma síntese dos conhecimentos adquiridos pelo casal Curie edificando a teoria das transformações radioativas fundamentada nas seguintes premissas: I) corpos radioativos sucedem uns aos outros; II) tais corpos permanecem em equilíbrio quando a produção é igual à destruição espontânea; III) apresentam suas individualidades químicas quando estão isolados.

A partir desses trabalhos, notou-se que certos elementos de grande peso atômico espontaneamente se desintegram em elementos de peso atômico menor. Além disso, a desintegração é acompanhada por emissão de raios, cuja investigação revelou serem de três tipos, que foram chamados de alfa, beta e gama. Os raios alfa e beta foram identificados como feixes rápidos de partículas materiais que tinham, respectivamente, carga elétrica positiva e negativa, e que se diferenciavam da química orgânica pela massa e pela velocidade²³.

²¹ PIZON, 1975, p. 67.

²² O eletrômetro de piezoquartzo media a débil corrente elétrica que emanava do urânio e de outras substâncias.

²³ ROCHA, 2007, p. 76.

Rutherford demonstrou ser evidente que a radioatividade é própria dos elementos cujas massas atômicas são muito elevadas. Depois da radiação gama (radiação eletromagnética) antecipada por Becquerel e do feixe beta (feixe de elétrons de energia anormalmente elevada) descoberta por Becquerel e Pierre Curie em 1900 e, por fim, do feixe alfa (não desviado pelo campo magnético, mas detido pelo alumínio) descoberto por Paul Villard, também em 1900, Rutherford demonstrou, em 1906, que a partícula alfa, de carga elétrica positiva, é constituída pelo hélio sob a forma ionizada, isto é, com núcleos de hélio desprovidos dos seus elétrons.

Enfim, o que se pode concluir das pesquisas com radiação ionizante é que “a emissão radioativa é uma emissão permanente de radiações eletromagnéticas, de elétrons, de núcleos de hélio, todos dotados de uma energia variável, mas sempre considerável, que só poderia ser proveniente da própria matéria na ausência de qualquer dependência de uma energia exterior”²⁴. Tal fenômeno radioativo, portanto, só pode ser proveniente do núcleo do átomo, de uma transformação atômica que implicasse a substituição em filiação de um a outro elemento.

PLANCK, EINSTEIN E A TEORIA DOS QUANTA DE ENERGIA E DE LUZ

As novas descobertas do século XIX agregaram uma série de novos conhecimentos que as teorias clássicas até então vigentes não davam conta de explicar. Descobertas acerca da estrutura eletrônica dos átomos, da radioatividade, do efeito fotoelétrico faziam crescer cada vez mais o conhecimento acerca da luz, da energia e da matéria. E a Física, que até então conseguia explicar os fenômenos na esfera do macro, já não dava conta de elucidar os fenômenos recentemente estabelecidos à escala do átomo. A natureza da luz, da eletricidade e do magnetismo excitava o espírito da Física contemporânea na tentativa da descoberta dos seus fundamentos últimos. A explicação para esses fenômenos, até então, era dada pela teoria do eletromagnetismo de J. C. Maxwell (1831-1879), que foi resumida em suas equações de 1865. Essa teoria postula que a luz é uma onda eletromagnética que se propaga num ambiente imaterial cognominado éter. Apesar dos experimentos de A. A. Michelson (1852-1931) de E. Morley demonstrarem (1838-1923), em 1887, que a invariabilidade da velocidade da luz, “ao subir e ao descer o éter”, negaria a existência do próprio éter, H. A. Lorentz (1853-1928) conseguiu, em 1893, desenvolver um meio algébrico para validar as equações de Maxwell. A validação desse artifício matemático se deu em 1896 quando Lorentz explicou a modificação das raias do espectro luminoso quando submetido ao campo magnético.

Em 1897, Joseph John Thomson (1856-1940) demonstrou que pelo menos um tipo da radiação emitida do tubo de raios catódicos de Röntgen consistia, segundo sua denominação, em um fluxo de pequenos corpúsculos, que vieram a ganhar o nome de elétrons. A descoberta dos elétrons levantara

²⁴ PIZON, 1975, p. 77.

dificuldades para a teoria da radiação luminosa, visto que, se a luz era produzida por elétrons que giravam ou vibravam, deveria mudar continuamente a cor conforme os elétrons fossem perdendo a energia por radiação. Entretanto, o testemunho do comprimento de onda constante no espectro óptico provava que não era assim. “Por outro lado, a termodinâmica, a radiação do corpo negro, a distribuição do espectro num recinto vazio, a relação entre o espectro e a temperatura do corpo emissor, levantaram o problema da natureza da energia, da sua conservação e das suas trocas com a matéria”²⁵.

De acordo com a teoria eletromagnética clássica, toda a energia de um corpo quente deveria estar concentrada num comprimento de onda curta. Isso explicaria o fato de que na radiação de um corpo negro (carvão ou ferro, por exemplo), o brilho de tais materiais deveria apresentar cor azul. Entretanto, o que se vê, na prática, é o brilho do carvão em brasa vermelho. Em 1900, Max Planck (1858-1947) publicou o seu famoso trabalho sobre o estudo da radiação do corpo negro onde consegue eliminar essa dificuldade ao tratar o eletromagnetismo da mesma forma que se tratava a termodinâmica. No lugar de átomos idealizou campos eletromagnéticos gerados por pequenos osciladores. Cada um deles poderia assumir certa quantia da energia eletromagnética que era compartilhada entre outras dessas entidades elementares.

Planck sugeriu que a energia dos átomos não podia ser emitida continuamente, era irradiada por fracções; por outras palavras, que a energia, exatamente como a matéria, era atômica, e que a sua atomicidade não estava na energia em si mas numa curiosa quantidade-acção (ou energia multiplicada pelo tempo). Havia, por conseguinte, um quantum (ou quantidade suficiente de acção) constante, a constante de Planck ($h = 6,6 \times 10^{-27}$ ergo por segundo), que controlava a quantidade de todas as trocas de energia nos sistemas atômicos²⁶.

As trocas entre a energia da onda eletromagnética e a matéria efetuam-se por porções descontínuas e invisíveis, múltiplos de uma quantidade fundamental que é o *quantum*: constante de ação que controlava a quantidade de todas as trocas de energia dos sistemas atômicos. Com isso, Planck acabara por descobrir a estrutura quântica da radiação eletromagnética. Mesmo assim, ele não avaliava de modo realista o seu trabalho e via todo o seu esforço somente como um artifício matemático para se obter a resposta esperada. A sua noção de “pacotes de energia”, fazia-o acreditar que os tais pacotes não surgiam das ondas de luz em si, mas de algumas propriedades dos átomos que emitiam e absorviam radiação somente em quantidades discretas. “Apenas cinco anos após o trabalho de Planck, o *quantum* de luz foi

²⁵ PIZON, 1975, p. 79.

²⁶ BERNAL, J. D. *Ciência na História*. Trad. António Neves Pedro. Lisboa: Livros Horizontes, 1969. p. 741. vol. 4

entendido como uma entidade física existente independentemente do mecanismo de sua emissão ou absorção pelos átomos”²⁷.

Foi Albert Einstein (1879-1955) quem, em 1905, partindo da hipótese do *quantum* de luz (que em 1920 irá receber o nome de fóton), não só derivou a fórmula de Planck, como explicou fenômenos até então inexplicáveis, como o efeito fotoelétrico²⁸. Raciocinando sobre o conceito do *quantum* de energia de Planck, Einstein argumentou que a luz existe em pequenos pacotes, isto é, em porções descontínuas e indivisíveis de corpúsculos que viajam no vácuo à velocidade de 300.000 km/s, caracterizados por uma energia ligada à frequência da onda eletromagnética por intermédio do *quantum* de energia de Planck. A existência do *quantum* de luz correndo livremente pelo espaço pressupunha a garantia da explicação das leis empíricas a respeito do efeito fotoelétrico.

Com efeito, parece-me que as observações da “radiação do corpo negro”, fotoluminescência, produção de raios catódicos por luz ultravioleta, e outros fenômenos relacionados associados com a emissão ou a transformação da luz parecem mais facilmente entendidos se supusermos que a energia da luz seja distribuída descontinuamente no espaço²⁹.

A ideia dos *quanta* de luz de Einstein não teve aceitação imediata da comunidade dos físicos. No geral, eles não gostavam dela porque não reverenciava a descrição de ondas como luz, resumida elegantemente nas equações de Maxwell. Einstein havia invertido a imagem ondulatória da luz e regressado à ideia de Newton, segundo a qual, a luz era feita de partículas. Entretanto, essa ideia se tornou um fato quando um montante de experimentos que provaram que as energias dos elétrons libertados cresciam com a frequência da luz. Em virtude dessa teoria, em 1921, Einstein ganhou o Prêmio Nobel de Física, e não pela Teoria da Relatividade.

O MODELO ATÔMICO DE RUTHERFORD

Embora as pesquisas com os raios X, a luz e as ondas de rádio continuassem no início do século XX, uma vez que a descoberta dos raios X levou a pesquisas sobre o átomo, inevitavelmente, a partir de

²⁷ ROCHA, 2007, p. 87.

²⁸ O efeito fotoelétrico figurava-se bem misterioso, pois que a energia dos elétrons arrancados ao metal por uma luz qualquer é independente da do feixe luminoso, isto demonstra que a teoria da luz como onda era falsa ou, no mínimo, insuficiente.

²⁹ EINSTEIN, Albert. On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light. In: *Einstein's Miraculous Year: Five Papers that Changed the Face of Physics*. John Stachel (Ed.), Princeton University Press, 2005. p. 178.

agora, o foco das pesquisas se transfere para as partículas subatômicas a exemplo do elétron, do fóton e das partículas alfa.

A descoberta dos elétrons, que estariam carregados negativamente, levou os físicos à suposição da existência de alguma matéria com carga positiva nos átomos. Entretanto, diante da falta de informação a esse respeito, eles só tinham como pensar vagamente a respeito de tal realidade. Até o presente momento, ninguém havia apresentado uma imagem convincente do átomo. Foi assim que, em 1897, J. J. Thomson disparando uma corrente elétrica através do gás contido em um tubo de vidro, libertou elétrons dos átomos. Como quase nada se sabia sobre como os elétrons distribuíam-se na matéria, ele propôs o modelo atômico do “pudim de ameixas”, no qual elétrons carregados negativamente ficavam cravejados como ameixas em uma massa de carga positiva. O átomo era supostamente mantido coeso em virtude da atração entre os elétrons e as cargas positivas que se misturavam ao longo do pudim.

Em 1907, quando Rutherford retornara para a Universidade de Manchester, Inglaterra, prosseguiu seu diálogo com Becquerel a respeito do comportamento das partículas alfa emitidas por materiais radioativos. De Becquerel, Rutherford teve a informação de que as partículas alfa, pelo que indicavam os experimentos, pareciam desviar-se em moléculas de ar que se encontravam pelo caminho. Em 1909, juntamente com os seus colegas Hans Geiger (1882-1945) e Ernest Marsden (1889-1970), Rutherford embrenha-se na tentativa de descobrir por que isso ocorria. Para isso, dispararam partículas alfa pesadas contra uma chapa de folha de ouro extremamente fina e descobriram que a cada oito mil partículas alfa uma ricocheteava quando batia na chapa. Muitas tinham a direção invertida, sendo desviadas por ângulos grandes, obtusos, como se tivessem atingido algo duro. Rutherford falou, numa palestra proferida no final da sua vida, sobre a época em que Geiger e Marsden fizeram o experimento pela primeira vez:

Então me lembro de que dois ou três dias depois Geiger me procurou muito entusiasmado e disse: “Conseguimos obter algumas das partículas alfa que vinham de trás...”. Era sem dúvida o acontecimento mais inacreditável que eu jamais testemunhara na minha vida. Era quase tão inacreditável como se você tivesse disparado uma bala de 38cm num lenço de papel e ela tivesse voltado e batido em você³⁰.

Em 1911, Rutherford ventilou que, para as partículas alfa ricochetear, a maior parte do átomo deveria estar reunida em um minúsculo núcleo compacto, duro e maciço carregado em seu centro. Daí sua rejeição pelo modelo de J. J. Thomson, pois o modelo do “pudim de ameixas” não podia explicar tal fenômeno. Esse modelo concebia o átomo como uma mistura de cargas positivas e negativas que não eram duras ou pesadas o suficiente para poder bloquear uma partícula alfa. Ao invés disso, em 7 de março de

³⁰ ANDRADE, E. N. da C. *Rutherford and the Nature of the Atom*. Nova York: Doubleday, 1964. p. 11.

1911, em uma reunião da Sociedade Filosófica e Literária de Manchester, Rutherford anunciou sua comprovação experimental de que o átomo é dotado de uma carga elétrica concentrada em uma região ultraminúscula, envolvida por uma distribuição esférica uniforme de eletricidade oposta e de igual quantidade. Em outras palavras, o átomo consiste em um centro com carga positiva, ou “núcleo”, que contém quase toda sua massa, e é cercado por uma nuvem de elétrons com carga negativa. Dois meses depois, o modelo do átomo nuclear estava publicado no volume 21 da *Philosophical Magazine*³¹, mostrando que o núcleo atômico concentra toda a carga elétrica positiva e praticamente toda a massa do átomo. Era o início da era da física nuclear contemporânea.

Pela descrição que fez do átomo, Rutherford recebeu várias honrarias e foi sagrado cavaleiro em 1914. Ele recebeu, inclusive, o Prêmio Nobel de Química pela “pesquisa sobre a desintegração de elementos e sobre a química das substâncias radioativas”, mas nunca recebeu o Prêmio Nobel de Física. Embora seu trabalho fornecesse a base para a atual compreensão do átomo, sabe-se que o mesmo sofre de restrições importantes. Diversos físicos, incluindo o próprio Rutherford, concluíram que, se o modelo estivesse correto, teria que haver uma razão que justificasse o fato de os elétrons em órbita não serem sugados para dentro do núcleo com carga positiva. O modelo de Rutherford, contudo, era inteligível, mas o seu átomo era instável mecânica e eletromagneticamente falando. Tal fato, marcou o início do esforço conjunto para encontrar um mecanismo que pudesse equilibrar a estrutura do átomo.

O ÁTOMO DE NIELS BOHR E A EXPLICAÇÃO DA ESTABILIDADE DOS ELÉTRONS

Em 1911 o dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962) chega à Inglaterra para estudar no Cavendish com J. J. Thomson. O projeto inicial era estudar o núcleo do “pudim de ameixa” de Thomson, mas as divergências entre os dois a respeito das suas concepções de átomo fizera com que Bohr deixasse o Cavendish para trabalhar com Rutherford em Manchester, em 1912. Uma vez que as concepções de Bohr e Rutherford eram convergentes em muitos aspectos, o resultado da parceria foi um trabalho frutífero no entendimento da estrutura do átomo.

Rutherford desenvolvera um modelo planetário constituído segundo uma lei análoga à da gravitação, onde as cargas elétricas no núcleo e as cargas eletrônicas no átomo desempenhavam o papel da gravitação no universo. Entretanto, conforme a percepção de Bohr, tal modelo tornava-se insustentável em virtude da sua instabilidade manifesta. Mas quais eram, de fato, os problemas encontrados por Bohr a ponto de considerar o modelo de átomo de Rutherford instável?

³¹ RUTHERFORD, E. The Scattering of α e β Particles by Matter and the Structure of the Atom. *Philosophical Magazine*, 21, series 6 (April, 1911).

Fundamentalmente, as leis da Eletrodinâmica Clássica. Os elétrons, sendo partículas carregadas negativamente, ao serem submetidas a uma força de atração coulombiana do núcleo positivo, deveriam emitir uma radiação, perdendo gradativamente energia e acabando por cair no núcleo. Haveria uma perda contínua de energia, o que contrariava os resultados experimentais da espectroscopia atômica que tinham sido obtidos no final do século XIX³².

Em resumo, o modelo de átomo de Rutherford não estava de acordo nem com o eletromagnetismo e nem com as leis dos espectros de emissão ou absorção.

Em *Sobre a Constituição de Átomos e Moléculas*, de 1913, Bohr trata das dificuldades enfrentadas pelo modelo de Rutherford:

Numa tentativa de explicar algumas das propriedades da matéria neste modelo atômico deparamos, todavia, com dificuldades de natureza muito séria derivadas da aparente instabilidade do sistema de elétrons [...]. Contudo, a maneira de considerar um problema dessa espécie sofreu alterações em anos recentes devido ao desenvolvimento da teoria da radiação de energia e à confirmação direta de novos pressupostos introduzidos nessa teoria, encontrada em experiências relacionadas com fenômenos muito diferentes tais como calores específicos, efeito fotoelétrico, raios Röntgen, etc. O resultado da discussão dessas questões parece ser um reconhecimento geral de que a eletrodinâmica não consegue descrever o comportamento de sistemas de dimensões atômicas³³.

Para resolver o problema, Bohr sugeriu que as teorias de Planck e Einstein a respeito da luz – que consistia de quantidades descontínuas de energia denominadas *quanta* – poderia ser aplicada ao átomo. Seu pensamento foi sobre a possibilidade de a quantização ser uma propriedade fundamental de toda energia. Se assim o fosse, poder-se-ia explicar porque o átomo era estável. O problema a ser desvendado, então, era: as órbitas fixas em torno do núcleo poderiam estar relacionadas a quantidades fixas de energia? Com o problema em foco, Bohr se esforçava para pensar uma teoria que pudesse lhe dar uma resposta ao mesmo tempo conceitual e matemática, quando foi informado de uma fórmula que Joseph Balmer (1825-1898) havia desenvolvido e que fornecia a frequência da luz emitida por átomos. De imediato, Bohr associou

³² MARTINS, Jader Benuzzi. *A história do átomo: de Demócrito aos quarks*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2001. p. 52.

³³ BOHR, N. *Sobre a Constituição dos Átomos e Moléculas*. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1963. p. 95-96. vol. 2

a referida fórmula com a teoria dos *quanta* de Planck e Einstein para descrever o comportamento dos elétrons que orbitavam em torno do núcleo. A aplicação da fórmula aos *quanta* demonstrou que:

- a) Os elétrons negativamente carregados trafegam por órbitas em torno de um núcleo carregado positivamente, à maneira dos planetas orbitam o Sol;
- b) Os elétrons são conservados próximos ao núcleo por meio de forças eletrostáticas (atração mútua entre cargas positivas e negativas);
- c) Um sistema atômico possui um número de estados nos quais nenhuma emissão de radiação se efetua. Possui, portanto, uma energia constante. Esses estados são denominados “estados estacionários do sistema”;
- d) De todas as órbitas infinitas permitidas pela teoria clássica, somente são possíveis aquelas nas quais o momento angular orbital do elétron é um múltiplo inteiro n da constante de Planck h ³⁴;
- e) Por fim, um elétron que salta de uma órbita para outra acarreta um aumento ou uma liberação de um *quantum* de energia.

Segundo Bohr, os elétrons podem se mover entre órbitas subindo e descendo na escala. Esses movimentos são conhecidos como saltos quânticos. Um átomo não emite radiação quando de seu estado estacionário; isso só ocorre quando faz uma transição, dá um salto, de um estado para o outro. A diferença de energia entre os níveis é adquirida ou perdida com o elétron absorvendo ou emitindo luz de uma frequência correspondente. Tal energia se apresenta na forma de radiação eletromagnética que pode ser vista sob forma de luz – isso produz as linhas espectrais. Em suma, o átomo não absorve nem emite radiação continuamente, somente por meio dos saltos quânticos.

A teoria de Bohr teve êxito imediato que fora amplificado com Henry Moseley (1887-1915) que, em 1913, demonstrou que ela explica totalmente a espectrografia dos raios X. Por uma série de experimentos, Moseley comprovou que a luz emitida quando elétrons passam por um estado de alta para baixa energia ocorria em forma de raios X – isso explica a relação entre elétrons e raios X. Demonstra também que existe uma correlação matemática entre a frequência de raios X de cada elemento e o seu número atômico. Se se conhece a frequência dos raios X, logo, pode-se determinar a quantidade de carga que há no núcleo.

Por fim, o modelo de Bohr permitiu fornecer uma base teórica à tabela periódica dos elementos químicos, mais precisamente, forneceu uma explicação para a ocorrência das ligações químicas. A

³⁴ “Os diferentes possíveis estados estacionários são constituídos por elétrons solitários, girando em torno de um núcleo positivo, com um momento angular L dado pela expressão:

$$L = n \cdot (h/2\pi)$$

Sendo h a constante de Planck e n um número inteiro e positivo, chamado usualmente de ‘número quântico’” (MARTINS, 2001, 54).

associação dos átomos para formar moléculas se dá quando há elétrons sem par na órbita exterior do átomo. Os elétrons são compartilhados pelos átomos para formar moléculas, como resultado da tendência que tem os elétrons para se distribuírem entre os átomos de modo que a energia de um grupo de átomos seja mais baixa do que a soma dos átomos componentes de tal grupo. A *valência* será, portanto, o número de elétrons sem par em sua órbita e a *covalência* será a ligação ou o compartilhamento de elétrons.

Grandes foram os passos dados por Bohr na construção da imagem da estrutura e funcionalidade do átomo na contemporaneidade.

[...] Teve habilidade de combinar numa síntese as quatro linhas diferentes: o núcleo duro da experiência de bombardeamento, as leis simples há muito descobertas por Balmer (1825-1898) relativas às frequências no espectro de hidrogênio, a regularidade dos comprimentos de onda dos raios X dos vários elementos, e a teoria dos quanta de Planck, que serviria para relacionar o conjunto³⁵.

Entretanto, a introdução de elementos estranhos à física clássica no modelo atômico, a exemplo do comportamento dual da radiação, acabou por conduzir a física para uma imagem diferente da realidade que obrigará ao desenvolvimento da mecânica quântica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo do presente artigo, conforme apresentado ao longo das páginas precedentes, foi o de apresentar a historiografia das teorias atômicas dos séculos XIX e XX, cujo realismo compôs, na contemporaneidade, as bases para os desenvolvimentos subsequentes que se deram com a mecânica quântica. A proposta aqui não foi a de apresentar uma reflexão crítica sobre o que fora produzido nesse período, nem, muito menos, levantar as abordagens metafísicas, uma vez que tais teorias dizem respeito à natureza da realidade e que, portanto, carregam uma ontologia de fundo. Nosso enfoque foi mostrar que por traz da abordagem do realismo fisicalista, encontra-se a preocupação com o real, cuja inexistência implicaria a própria impossibilidade da ciência. As teorias que aqui se apresentaram representam, com nuances diferentes, a preocupação com a demonstração da própria natureza física do real e de como ele se comporta. A par da assunção de que muitas dessas teorias ditas realistas trazem no seu bojo o compromisso com entidade não observáveis, ainda assim, não podem ser tratadas de idealistas ou de antirrealistas uma vez que não assumem o compromisso com a ideia de que a realidade somente é possível em virtude da existência do sujeito cognoscente que lhe dá o devido sentido. Por outro lado, o realismo ora aqui apresentado não professa nenhuma espécie de realismo ingênuo que professa a existência da

³⁵ BERNAL, 1969, p. 743.

realidade pela realidade, dispensando a presença e a importância do sujeito pensante. Ao invés disso, provendo o realismo fisicalista de alto grau de racionalidade, apesar de assumir que a realidade está posta e que existe independentemente da mente humana, ainda assim, defende a importância da razão no entendimento e no deciframento da natureza que se apresenta em linguagem cifrada. É a razão a responsável em dar inteligibilidade ao real, de exigir que a natureza apresente respostas às suas indagações e, por fim, de representar, por meio de uma linguagem própria (a linguagem científico-matemática), a configuração simbólica, portanto, sintática da natureza. Dessa forma, no processo de cognoscibilidade da natureza, faz-se necessário tanto uma representação semântica, que concerne aos significados das mensagens cifradas emanadas da natureza, quanto sintática, que representa a simbolização ou formalização das mensagens em uma linguagem que, fugindo da coloquialidade, faça-se entendida pela comunidade dos especialistas. Tudo isso, está uma dependência íntima da intervenção da razão que assume, desde o princípio, que, ainda assim, a realidade (ou o mundo) existe independentemente da nossa certificação racional.

SOBRE O AUTOR:

Eduardo Simões

Universidade Federal do Tocantins (UFT)

eduardosimoes@uft.edu.br**Artigo recebido em 01 de maio de 2020****Aceito para publicação em 01 de dezembro de 2020**