

O atomismo grego e a formação do pensamento físico moderno

(Greek atomism and the formation of modern physical thought)

C.M. Porto¹

Departamento de Física, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 22/2/2013; Aceito em 14/3/2013; Publicado em 15/10/2013

Este trabalho faz uma apresentação do atomismo grego, tanto na formulação original de Demócrito e Leucipo quanto na versão de Epicuro, e de suas influências, diretas ou indiretas, na formação do pensamento físico moderno. Fazemos uma exposição resumida das características essenciais dessa doutrina e mostramos como a sua redescoberta, no início da Era Moderna, ofereceu, juntamente com o cartesianismo, uma alternativa à visão de mundo aristotélica, então predominante. Destacamos como essa concepção alternativa, mais adequada ao novo pensamento físico nascente, se difundiu nos meios científicos, obtendo expressão nas obras de Galileu, Boyle e Newton, entre outros. Finalizamos fazendo um breve histórico da teoria cinética dos gases, que, a partir da hipótese atômica, lançou as bases de uma descrição microscópica quantitativa da matéria. Mostramos como essa teoria forneceu os elementos para a explicação do chamado movimento browniano, obtendo o que foi por muitos considerada a primeira confirmação experimental da concepção corpuscular da matéria.

Palavras-chave: atomismo, teoria cinética, física moderna.

In this work we make an exposition on Greek atomism, as much in the original formulation by Democritus and Leucippus as in its Epicurean version, as well as on its direct or indirect influences over the development of modern physical thought. We make a brief presentation of the essential features of this doctrine and show how its rediscovery, at the beginning of Modern Age, offered, besides Cartesianism, an alternative to the Aristotelic world view then prevailing. We emphasize how this alternative conception, more congenial to the emerging new physical thought, spread itself amid scientific media and obtained living expression in the works of Galileo, Boyle and Newton, among others. We end with a short historical overview of the kinetic theory of gases, which, after the atomic hypothesis, set forth the basis for a quantitative microscopic description of matter. We also show how this theory provided the elements for a scientific explanation of the so called Brownian movement, achieving what many considered as the first experimental confirmation of the corpuscular view of matter.

Keywords: atomism, kinetic theory, modern physics.

1. Introdução

Recentemente tem se observado cada vez mais frequentemente a inclusão nos currículos de física, tanto ao nível do ensino superior, quanto do ensino básico, de abordagens históricas da ciência [1]. Tais abordagens têm um nítido interesse para os estudos na área de ensino de física por oferecerem uma visão da realidade concreta do desenvolvimento do pensamento científico, evidenciando, por meio do conhecimento de suas etapas, as dificuldades cognitivas a serem vencidas na formação e aquisição dos conceitos físicos e na construção da descrição científica da natureza [2].

No entanto, a opção por essa abordagem histórica esbarra muitas vezes na carência de literatura didática com esse viés. Este trabalho tem, portanto, o objetivo de tentar contribuir para a superação dessa deficiência,

tratando de uma das principais correntes filosóficas da antiguidade clássica, o atomismo [3–6], e de como ela influenciou, direta ou indiretamente, o pensamento físico moderno, fornecendo uma base conceitual para a descrição corpuscular da matéria.

O trabalho se organiza, pois, da seguinte forma: na primeira seção fazemos um apanhado daquilo em que consistiu o atomismo grego, em sua versão original, formulada por Leucipo e Demócrito. Procuramos apresentar a maneira pela qual essa doutrina, ao postular a existência de um substrato imutável subjacente a todas as transformações do mundo material, o átomo, se constituiu em uma solução para o conflito primordial da filosofia grega, entre a racionalidade do conceito do ser e a constatação empírica da incessante mutabilidade da realidade a nossa volta [4]. Procuramos exibir os elementos essenciais dessa doutrina e, em particu-

¹E-mail: claudio@ufrj.br.

lar, a resposta que ofereceu ao desafio da explicação da ocorrência da ordem no Universo. A resposta elaborada pelos atomistas não fez qualquer recurso ao que, na conceituação aristotélica posterior, corresponderia às modalidades causais de forma e finalidade, constituindo, sob um olhar retrospectivo, um primeiro exemplo de um modo de pensamento que se tornaria posteriormente o paradigma da ciência moderna.

Na seção seguinte apresentamos uma variante do atomismo tradicional, elaborada pelo também filósofo grego Epicuro. Enfatizamos a principal modificação introduzida por ele na versão democritiana, qual seja, a inclusão do peso como atributo essencial dos átomos, ao lado das características geométricas de forma e tamanho. Salientamos de que modo a incorporação desse atributo como elemento causal dos movimentos incessantes da matéria impôs à doutrina novos desafios na explicação dos fenômenos da natureza e como Epicuro encontrou resposta para eles na flexibilização do determinismo mais rígido adotado por seus precursores [3, 4].

Na seção três, fazemos um brevíssimo resumo do resgate do atomismo durante a Renascença, após o relativo ostracismo provocado pela dissolução da civilização romana do Ocidente. Chamamos a atenção para a fusão do pensamento atomístico então redescoberto com elementos de outras correntes filosóficas.

Na seção quatro, procuramos salientar o fato importantíssimo para a história da ciência de como, ao ser resgatado nos primórdios da Era Moderna, o atomismo proporcionou ao pensamento ocidental, paralelamente ao cartesianismo, uma visão de mundo alternativa ao aristotelismo prevalecente. Destacamos sobretudo o conflito entre os elementos essenciais da doutrina atomística e a filosofia e ciência aristotélicas [7]. Já na seção cinco fazemos justamente uma comparação entre o atomismo e o cartesianismo, mostrando aspectos comuns e dessemelhantes entre essas duas formas de pensamento.

Na seção seis, chegamos às influências do atomismo sobre a formação do pensamento físico moderno. Mostramos como essa influência se efetivou rapidamente no meio científico ao longo de todo o século XVII, seja de forma mais explícita, como, por exemplo, em pensadores como Gassendi [8], ou, em outros casos, de forma mais indireta, talvez pelo simples compartilhamento de uma atmosfera intelectual em que a hipótese atomística se apresentava como um elemento revitalizador do pensamento científico e filosófico. Demos especial relevo ao pensamento de Galileu, de Boyle e de Newton, mostrando, no entanto, que mesmo os cientistas e pensadores que assumiram uma concepção corpuscular da matéria não adotaram integralmente ou na mesma medida todos os elementos fundamentais do atomismo original [7].

Na seção sete, fizemos um pequeno histórico do processo de elaboração da teoria cinética dos gases, iniciado

por Daniel Bernoulli, ainda no século XVIII, e coroado principalmente pelos trabalhos de Clausius, Maxwell e Boltzmann, no século XIX. Mostramos que essa teoria forneceu um arcabouço para a formulação por Einstein, em 1905, de uma explicação do chamado movimento browniano, considerada por muitos a primeira confirmação experimental mais direta da validade da hipótese corpuscular da matéria [9].

Finalmente, a esta seção seguem-se as conclusões do trabalho.

2. O surgimento do atomismo: Demócrito e Leucipo

O atomismo foi uma doutrina filosófica, formulada inicialmente no século V a.C., na Grécia, por Leucipo e seu discípulo Demócrito de Abdera. Podemos considerá-la uma resposta para um dos problemas fundamentais apresentados pela filosofia grega, qual seja, o do entendimento do caráter mutável do nosso mundo, com a resolução do conflito entre o conceito de ser e a percepção da mudança (movimento) [4, 10].

Leucipo foi discípulo de Melissos e Zenão, filósofos da escola eleática,² cuja figura de maior destaque foi Parmênides. Para os eleatas, a mudança seria essencialmente um processo através do qual algo que é deixa de ser, ou seja, uma passagem do ser ao não-ser. Segundo o pensamento eleático, o não-ser não pode ser pensado pela razão, visto que tudo o que é pensável é, de alguma forma, algo. Deste modo, conceber uma passagem ao não ser é um absurdo lógico e, assim, a idéia de mudança é algo que afronta o entendimento. Em outras palavras, o conceito de ser exige como atributo básico a estabilidade e a permanência. O eleatismo expunha assim um aparente conflito fundamental entre a percepção empírica e a compreensão racional, levando a uma negação da confiabilidade dos nossos sentidos como forma de apreensão da realidade: o mundo dos fenômenos, captados pelos nossos sentidos e que atestam permanentemente a ocorrência de mudanças, é uma ilusão, frontalmente contrária à razão.

A solução proposta por Leucipo e levada adiante por Demócrito consistiu em conciliar a possibilidade das mudanças perceptíveis por nossos sentidos com a existência de algo que permanece inalterado e, por conseguinte, faz jus à designação de *ser*. Para Leucipo e Demócrito, o mundo material é composto de infinitos entes minúsculos, incriáveis e indestrutíveis, denominados átomos, que se movem incessantemente por um vazio e não possuem outras propriedades além de tamanho e forma geométrica. Nessa concepção, os objetos que se colocam diante de nossos sentidos são, na realidade, formados pela combinação de muitos desses átomos.

Segundo Leucipo e Demócrito, características como por exemplo cor, sabor e cheiro correspondem à ma-

²Referente à cidade de Eléia, colônia grega situada onde hoje é a Itália.

neira pela qual os nossos sentidos percebem as estruturas formadas pelas combinações dos átomos; utilizando uma linguagem moderna, poderíamos dizer que não são mais propriedades intrínsecas aos objetos, mas representações subjetivas que fazemos deles. A diversidade que observamos nas características desses objetos se reduz, portanto, à existência de diferentes tipos de átomos e também às diferentes maneiras como esses átomos se organizam para formá-los.

É convenção o doce, convenção o amargo; é convenção o quente, convenção o frio; é convenção a cor; a realidade são os átomos e o vazio. [11]

Um dos elementos mais importantes dessa teoria se refere à questão de como ocorrem as combinações e arranjos dos átomos. Conforme vimos, esses átomos não possuem outras qualidades que não sejam geométricas e de extensão. Por conseguinte, a ação de uns sobre os outros se dá exclusivamente por ações mecânicas casuais e locais. Segundo o historiador Theodor Gomperz, Demócrito aparentemente ensinava que os átomos se combinavam através de encaixes mecânicos associados a suas formas ou então pela simples justaposição circunstancial, como o “aprisionamento” de um átomo por um grupo de outros [3]. No entanto, a movimentação incessante desses átomos através do vazio, alimentada ainda pelas sucessivas colisões entre eles, faria com que todas essas estruturas formadas se reorganizassem constantemente. Assim se explicavam as mudanças que permanentemente observamos nos objetos.

Entretanto, esse mecanicismo de caráter semi-aleatório se defrontava com uma questão básica: para o atomismo de Demócrito existiam diferentes tipos de átomos, associados a diferentes estruturas materiais (por exemplo, elementos como a água e a terra eram originados de diferentes tipos de átomos) ou a diferentes formas de percepção por nossos sentidos (substâncias de sabores doces ou ácidos também se relacionavam a formas geométricas distintas). Como então, a partir de uma disposição inicialmente aleatória, explicar a concentração de átomos de natureza semelhante em determinados locais, formando um Universo com um razoável nível de organização? Como explicar, por exemplo, as vastas áreas de terra separadas de oceanos de água? Essa era uma pergunta básica, que já havia inquietado pensadores anteriores, como Empédocles de Agrigento e sua doutrina dos quatro elementos: terra, água, ar e fogo [4,12]. Para Empédocles, a concentração dos elementos em determinadas localizações, formando as porções macroscópicas que observamos, se dava através de uma ação de “afinidade” e de “discórdia” entre eles. Todavia, para os atomistas não existiam essas predisposições essenciais da matéria; todo o processo se dava meramente pelas ações mecânicas entre os átomos. Citando Gomperz:

A hipótese de Demócrito responde unicamente à necessidade de explicação científica; seu único objetivo é resolver, sem nenhum desígnio acessório e de modo absolutamente imparcial, a seguinte questão: como pôde acontecer que em tal ou tal ponto da infinita extensão do vazio, em tal ou tal ponto do incessante decurso do tempo, tenha ocorrido essa separação, essa ordenação das massas de matéria, das quais o mundo que nos cerca não é certamente um exemplo isolado? [13]

A solução para esse problema proposta pela escola atomística consistia em supor que os átomos em movimento se agregavam, formando uma espécie de “turbilhão”, que arrastava os demais. A chave desse raciocínio está no fato de que átomos com características físicas diferentes seriam arrastados de maneiras diferentes por esses turbilhões, de tal modo que se produziria uma separação natural entre as diferentes “espécies” de átomos e, por outro lado, uma aglomeração das espécies semelhantes. Essa explicação exclusivamente mecânica substituiria a idéia de uma afinidade ou uma rejeição entre as essências.

Finalizemos esta descrição bem resumida da teoria de Leucipo e Demócrito salientando um aspecto fundamental do Universo atomístico: toda a matéria nele presente é formada por átomos, dentre os diversos tipos existentes. Não existe, portanto, uma matéria celeste de natureza diferente da matéria terrestre. Dito de outra forma, não existe a separação radical e essencial entre o mundo celeste e o mundo terrestre, que é um elemento central, por exemplo, da Cosmologia de Aristóteles e que, no dizer de Pierre Duhem [14], erigiu uma barreira de difícil transposição ao desenvolvimento do pensamento físico e cosmológico, só superada no início da era moderna.

3. O Atomismo da escola epicurista

Ao final do século IV A.C, o filósofo grego Epicuro formulou uma variante da teoria atomística proposta por Leucipo e Demócrito [3, 4]. Também para Epicuro a realidade material seria constituída de unidades indivisíveis, permanentes, que se movem através do vazio e cujos agrupamentos formam a diversidade dos corpos que conhecemos. Entretanto, se para os primeiros atomistas os átomos eram dotados apenas de forma e tamanho, Epicuro atribuiu-lhes outra propriedade essencial: o peso. A introdução do peso como elemento essencial e irreduzível da matéria permitia, segundo Epicuro, a explicação do movimento incessante a que estão submetidos os átomos, a saber, em razão de seu peso eles sempre tendem a se movimentar para “baixo”.

No entanto, essa dinâmica proposta por Epicuro introduzia elementos aristotélicos contraditórios com a

essência da concepção atomística de Demócrito e Epicuro. De fato, de acordo com o atomismo original, os átomos movimentavam-se em um universo infinito, sem qualquer tipo de direcionamento que não aqueles conferidos pelas colisões e outras ações mecânicas impostas pelos demais. Em um universo infinito como esse, o conceito de “embaixo” e “em cima”, dos quais a cosmologia finitista aristotélica se serviu tão coerentemente [4, 10, 14], torna-se imediatamente problemático. Epicuro insistiu na manutenção desse elemento contraditório, definindo o embaixo como a direção que se estende diretamente abaixo de nossos pés, definição que, segundo G. Reale [15], é, muito mais do que geocêntrica, antropocêntrica.

Além desse caráter incoerente introduzido na filosofia atomística, a explicação do movimento dos átomos pela naturalidade da queda ocasiona outras dificuldades: como explicar que esses átomos em queda se congreguem para formar os corpos visíveis? Em outras palavras, por que os átomos, em movimento para baixo, não caem, sem se tocar, ao longo de trajetórias paralelas entre si?

Para solucionar esse problema, Epicuro concebeu a hipótese de que, a qualquer momento, os átomos em queda pudessem se desviar minimamente de suas trajetórias retilíneas originais, permitindo-se assim o contato entre eles e seus “vizinhos”. Em outros termos, em função desses pequenos desvios fortuitos (denominados *clínamen*), os átomos colidiam com seus vizinhos, desencadeando toda a espécie de movimentos (inclusive ascendentes) e possibilitando a sua combinação. Nas palavras do erudito romano Cícero:

[Epicuro], quando compreendeu que se todos os corpos fossem movidos da região superior, como foi dito, perpendicularmente, não seria possível o encontro de um átomo com o outro [...], excogitou um artifício expediente: afirmou que o átomo pode declinar um pouquinho, com um deslocamento mínimo, e assim torna-se possível que os átomos se encaixem, se unam, adiram um ao outro, do que se originam o Universo e todas as suas partes e tudo que ele contém. [16]

Entretanto, a solução proposta por Epicuro, centrada na casualidade dos desvios das trajetórias naturais, apresentava uma fragilidade clara em termos da ausência de uma explicação causal. Novamente segundo Cícero:

[Epicuro] afirma: “o átomo sofre desvio”. Em primeiro lugar, por que? Os átomos foram concebidos por Demócrito como dotados de outra força motora, que ele

chamava de “força de choque”; para ti, Epicuro, o movimento depende exclusivamente da gravidade e do peso. Qual é, pois, a razão extraordinária na natureza que provoca o desvio do átomo? Será que eles mesmos tiram a sorte entre si sobre quais deviam desviar-se e quais não? E por que desviam apenas um mínimo intervalo, e não dois ou três intervalos? Tudo isso é expressão de uma veleidade e não uma posição doutrinal. Ele não diz, de fato, que o átomo se desloca do seu lugar e desvia porque movido do exterior; nem que naquele espaço vazio no qual se move o átomo existam causas que impeçam o movimento perpendicular de alto a baixo; nem que no próprio átomo tenha-se verificado uma mudança capaz de fazê-lo abandonar o movimento natural decorrente do seu peso. [17]

Em que pese a crítica anterior, a filosofia epicurista foi uma forma abrangente de pensamento, da qual a física foi apenas um dos aspectos. Aparentemente, Epicuro introduziu o elemento fortuito dos desvios repentinos para conciliar essa física com sua ética, amenizando o determinismo causal do atomismo original e assim reservando um papel mais decisivo à liberdade humana [15].

4. O ressurgimento do atomismo na Era Moderna

O atomismo grego, sobretudo na versão epicurista, obteve uma penetração na sociedade romana, principalmente através do poeta Lucrécio e de sua obra intitulada *De rerum natura* (*Da Natureza das Coisas*). Todavia, com o colapso daquela civilização, essa escola de pensamento caiu em um relativo ostracismo.

No entanto, o renascimento cultural do século XV promoveu um esforço intenso pela recuperação das obras produzidas pela antiguidade clássica. Como parte desse esforço, em 1417, o estudioso florentino Poggio Bracciolini descobriu na biblioteca de um mosteiro medieval³ um dos pouquíssimos manuscritos conservados da obra de Lucrécio.⁴ A imprensa, então recém surgida, permitiu a produção quase imediata de outros exemplares e, por conseguinte, a ampliação do acesso à obra. Paralelamente a isso, através da recuperação da obra do filósofo grego Diógenes Laércio, a sociedade europeia também tomou conhecimento de três cartas de Epicuro expondo sua doutrina.

A recuperação dessas fontes contribuiu muitíssimo para a difusão do atomismo na Europa renascentista [19] e para que esse passasse, a partir daí, a influenciar significativamente o pensamento filosófico e ci-

³Conjectura-se que se tratava da abadia beneditina de Fulda, situada onde hoje é a Alemanha [18].

⁴Aparentemente restavam à época apenas três, dois dos quais teriam sido encontrados posteriormente à descoberta de Poggio [18].

entífico. Entretanto, dado que o interesse pela antiguidade clássica resultou no resgate, não só dessa, mas de outras correntes filosóficas, o pensamento atomístico ressurgiu, em muitos casos, fundido a elementos de outras escolas, principalmente neoplatônicos. Em especial, o caráter mecanicista da doutrina original, que restringia a causação do movimento exclusivamente a ações locais de agentes materiais externos, foi substituída em alguns pensadores por elementos animistas, atribuindo-se ao objeto movente um certo autogoverno de seu movimento, conforme uma intencionalidade própria. A título de exemplo, Giordano Bruno, certamente um dos personagens mais renomados desse primeiro momento do reflorescimento do atomismo (antes que essa doutrina se estabelecesse definitivamente no pensamento científico do século XVII), concebeu um Universo atomístico, infinito e formado por átomos em movimento, porém dotado de uma alma universal, idéia essa que provinha do neoplatonismo grego dos primeiros séculos da Era Cristã. Para Giordano Bruno, cada átomo possui uma participação nessa alma universal e esse princípio não material dirige o seu movimento. Na realidade, o pensamento de Giordano Bruno, um homem que ficou notabilizado na história da ciência pela adesão veemente ao copernicanismo, era uma mistura eclética de diferentes tendências: às inspirações atomísticas presentes na sua visão de Universo alinhavam-se, entre outros, elementos neoplatônicos e esotéricos [20, 21].

5. Atomismo versus aristotelismo

De acordo, portanto, com o que vimos na primeira seção, podemos dizer que o atomismo clássico, na nossa linguagem moderna, se compõe de quatro elementos básicos [7, 22]:

1) Indivisibilidade das unidades elementares e inalteráveis (corpúscularidade) da matéria;

2) Existência do vazio, através do qual se movem os átomos [23];

3) Reducionismo, isto é, entendimento das propriedades dos objetos materiais em termos de movimentos e organizações dos corpúsculos elementares, em si mesmos, dotados apenas de extensão, forma e movimento.

4) Mecanicismo: concepção segundo a qual os movimentos são exclusivamente causados pela ação local (de contato) de agentes externos materiais. Com base nessa concepção, são rejeitadas fundamentalmente quatro noções: I) espontaneidade, que significa a autogeração do movimento; II) ação a distância, que viola a localidade da causação; III) existência de causas incorpóreas, que viola o estrito materialismo da causalidade e IV) a idéia de causas finais: descarta-se a idéia de

que os processos naturais ocorram com vistas ao cumprimento de qualquer finalidade; as únicas causas desses processos são as outrora chamadas de eficientes [14];

Esses elementos contradizem frontalmente aspectos essenciais da filosofia, da cosmologia e da ciência de Aristóteles, ainda amplamente predominantes nos meios acadêmicos europeus dos séculos XV e XVI. Começamos pela questão do vácuo, em que a doutrina atomística é radicalmente contrária à filosofia aristotélica. De fato, para Aristóteles, a noção da existência do vazio é uma contradição lógica [24, 26]. Por isso, seu modelo cosmológico correspondia a um Universo completamente preenchido pela matéria (pleno). Como, para ele, a existência de algo atualmente (isto é, com realidade naquele momento) infinito não fazia sentido, um Universo infinito, implicando uma extensão infinita de matéria, não era cabível; seu Universo era uma região esféricamente limitada.⁵

Essa concepção da impossibilidade do vazio e, conseqüentemente, da necessidade de uma extensão material contínua, conduz a outra dificuldade de conciliação entre a filosofia aristotélica e o atomismo. De fato, Aristóteles colocou várias restrições lógicas à idéia de que uma extensão contínua possa se formar a partir de um conjunto discreto de unidades básicas [7]. Assim sendo, o contínuo material de que se constitui o nosso mundo não poderia surgir da composição de átomos indivisíveis.

Quanto ao mecanicismo, eliminava da ciência a noção essencial da existência de quatro modalidades de causa (materiais, formais, eficientes e finais), que tão importante papel desempenharam para a coerência e organicidade do aristotelismo. Realmente, para Aristóteles, as transformações que ocorrem espontaneamente no nosso mundo são processos de realização de potencialidades que já estavam latentes nos seres, conforme suas essências. Por exemplo, uma semente de um vegetal não se transformará em qualquer espécie, mas sim naquela da qual é semente. Em outras palavras, a forma do ser é um elemento causal que determinará sua evolução. Aristóteles chamava isso de causa formal. Assim, pois, os objetos feitos dos elementos terra e água caem porque esses elementos são pesados: há em suas características (forma) algo que determina seu comportamento.

Do mesmo modo, é um aspecto fundamental do pensamento de Aristóteles o entendimento que as transformações espontâneas sempre são processos que caminham em direção a uma finalidade a se cumprir. Se os objetos feitos de terra e água do exemplo anterior caem, é porque, no Universo hierarquicamente ordenado, cada coisa ocupa o lugar que lhe é devido e o lugar destinado aos elementos pesados é próximo ao seu centro.

Considerando-se esses vários elementos, vemos que

⁵Por esse raciocínio se vê que, pelo contrário, a aceitação da idéia de vácuo eliminava o principal obstáculo filosófico à concepção de um Universo infinito. Esse foi, justamente, o caminho trilhado por Giordano Bruno.

a doutrina atomística diferia profundamente do pensamento de Aristóteles, constituindo-se, na verdade, sobretudo para a ciência, em uma importante alternativa à visão de mundo aristotélica.

6. Comparações entre o mecanicismo atomístico e o cartesiano

Em verdade, a concepção mecanicista da natureza, que se constituiu em elemento essencial da Revolução Científica e sobre a qual se assentou a visão de mundo moderna, se dividiu em duas vertentes principais: a primeira delas representada pelo atomismo; a segunda, pelo pensamento de René Descartes. As duas correntes apresentaram entre si semelhanças e diferenças fundamentais.

De fato, assim como o atomismo, o cartesianismo teve um caráter francamente reducionista e mecanicista. Descartes também distinguiu nos objetos os atributos que lhe são inerentes dos que são, na realidade, um produto da nossa percepção subjetiva. Assim fazendo, despiu a matéria de qualquer qualidade que não fosse meramente a extensão.

Procedendo assim, sabemos que a natureza da matéria ou do corpo, considerada em geral, não consiste em ser dura, pesada ou colorida, ou naquilo que afeta os nossos sentidos de qualquer outra maneira, mas simplesmente em ser uma substância extensa em comprimento, largura e profundidade. [25]

Da mesma maneira, para ele, os processos naturais eram causados unicamente pelas colisões dos objetos com agentes materiais externos, obedecendo a leis de caráter universal. Exemplo típico dessa concepção é fornecido pela sua explicação do movimento dos corpos celestes: Descartes havia estabelecido como princípio fundamental de sua filosofia da natureza a lei da inércia, ou seja, de que os corpos permaneceriam em movimento retilíneo com velocidade constante, a menos que fossem disso desviados por ações externas; portanto, assim se moveriam os corpos celestes, caso estivessem livres de contato material. No entanto, o Universo cartesiano era completamente preenchido por uma matéria tênue, cujos movimentos formavam vórtices, que, por sua vez, empurravam os corpos nela imersos, desviando-os de seu movimento retilíneo e determinando, em seu lugar, as trajetórias curvas observadas. Desta forma se explicava o que posteriormente Newton descreveu como uma atração gravitacional exercida mutuamente pelos corpos.

Entretanto, em que pesem esses componentes reducionista e mecanicista, o cartesianismo possuía diferenças fundamentais em relação ao atomismo. Assim como Aristóteles, Descartes rejeitava o vazio como uma

contradição lógica. Também para ele, toda extensão espacial era forçosamente material. Portanto, seu Universo, como já antecipamos, era um contínuo material. Essa concepção de um Universo pleno não era compatível com a idéia de unidades materiais básicas e indivisíveis. Pelo contrário, para Descartes, a matéria, enquanto um contínuo, era infinitamente divisível. Assim, a opção plenista adotada pelo cartesianismo determinou uma oposição fundamental à doutrina atomística.

Também descobrimos que não podem existir átomos ou partes da matéria que por natureza sejam indivisíveis, pois, por menores que suas partes sejam, todavia, porque são necessariamente extensas, podemos sempre em pensamento dividir qualquer uma delas em duas ou mais partes menores, e podem por conseguinte admitir a divisibilidade. (...) Portanto, falando de maneira absoluta, a menor partícula extensa é sempre divisível, como é próprio de sua natureza. [27]

A concepção plenista e rigidamente mecanicista de Descartes não foi capaz, contudo, de fornecer uma física de natureza quantitativa. Essa foi, certamente, já de início, uma de suas grandes fragilidades.

A crítica ao cartesianismo segundo uma perspectiva atomística partiu do francês Pierre Gassendi (1592-1655). Mesmo que tenhamos, conforme declarava Descartes, uma noção muito clara e distinta da extensão matemática como infinitamente divisível, segundo Gassendi, nada garante que a realidade material tenha esse caráter, ou seja, nada obriga que a nossa concepção racional corresponda à realidade objetiva. A visão corpuscular não pode, portanto, ser descartada em favor de uma suposta certeza prévia.

Gassendi empreendeu então uma tentativa de conciliar a doutrina atomística com o Cristianismo, eliminando da primeira aspectos que conflitavam fundamentalmente com a religião cristã [21]. Assim, em sua versão os átomos não eram eternos, mas foram criados por Deus e um dia serão aniquilados por Ele. No entanto, em sua busca de conciliação, Gassendi se afastou do mecanicismo estrito da doutrina original. Para ele, o movimento e as colisões dos átomos não obedecem a uma aleatoriedade cega, mas são controlados por uma permanente intervenção Divina. Com isso, reintroduziu na ciência uma causalidade imaterial e final. Nas palavras de G.Reale: “E, com efeito, a nova ciência - com Galileu e Bacon, mas também com Descartes, Hobbes e Spinoza - eliminara o finalismo, mas Gassendi o readmite” [28]

7. O atomismo no pensamento científico moderno

Os diversos pensadores e cientistas que adotaram uma concepção atomística não necessariamente adotaram na mesma proporção os quatro elementos originais relacionados anteriormente. Em particular, vários dos que foram adeptos do reducionismo não compartilharam igualmente o mecanicismo [7].

Mencionemos como primeiro exemplo disso Galileu Galilei. Galileu também defendeu a universalidade da matéria, a mesma para a Terra e para os Céus, e o que entendemos como a subjetividade das qualidades de sabor, cor, etc., produtos da nossa percepção de um certo agregado de unidades materiais.

Eu, porém, digo que, assim que concebo uma matéria ou substância corpórea, me sinto necessariamente levado a conceber, ao mesmo tempo, que ela é determinada ou figurada com esta ou aquela figura, que ela em relação a outras é grande ou pequena, que ela está neste ou naquele lugar, neste ou naquele tempo, move-se ou está parada, toca ou não toca outro corpo, que ela é uma, poucas ou muitas e não posso por qualquer imaginação separá-la dessas condições; mas que ela deva ser branca ou vermelha, amarga ou doce, sonora ou muda, de agradável ou desagradável odor, isso não me sinto forçado, na mente, a ter de apreendê-la necessariamente acompanhada de tais condições; pelo contrário, se não fôssemos dotados de sentidos, talvez o discurso ou imaginação por si mesmos jamais chegariam a elas. [29]

Citemos ainda:

Mas que os corpos externos, para excitar em nós os sabores, os odores e os sons, requeira-se outra coisa a não ser grandezas, figuras, multiplicidades e movimentos lentos ou velozes, eu não o creio. [29]

Vemos, portanto, que Galileu aderiu firmemente às hipóteses reducionistas. Entretanto, sua análise do problema da queda dos corpos não seguiu um mecanicismo rígido. Realmente, para ele os corpos caem em direção à Terra por uma tendência inerente de dela se aproximarem; a gravidade é uma disposição interna dos corpos e não uma causalidade exercida a partir de fora [30]. Nesse sentido, sua descrição escapa à abordagem mecanicista.

No entanto, em que pesem as variações de concepção, a visão atomística da natureza foi aceleradamente se difundindo e se fortalecendo ao longo de todo

o século XVII, obtendo a adesão de nomes como Christiaan Huygens, Robert Hooke e Robert Boyle, entre outros.

Em sua obra *A Origem das Formas e Qualidades de Acordo com a Filosofia Corpuscular*, de 1666, Boyle expôs o seu pensamento de que todos os fenômenos naturais podem ser explicados a partir dos conceitos de matéria e movimento [31]. Em especial, ele ofereceu uma contribuição de destaque à visão atomística, ao aplicá-la à descrição dos fenômenos químicos [32], seguindo uma linha já esboçada, em termos distintos, pelo físico e químico alemão Daniel Sennert [33].

Segundo Boyle, os elementos químicos não seriam estruturas fundamentais, porém aglomerados de átomos, e suas propriedades não decorreriam de características inerentes a essas unidades atômicas, mas sim do modo como se movimentam e organizam. Tampouco, para ele, as reações químicas entre substâncias ocorriam em razão de afinidades ou repulsões entre objetos, mas pela correspondência mecânica entre as formas e tamanhos das unidades de uma substância e os espaços porosos de outra, por onde as primeiras se movimentam e onde se encaixam [34].

A “filosofia corpuscular” defendida por Boyle e outros influenciou Isaac Newton. Os estudiosos hoje concordam que a concepção de Newton sobre a matéria tem por base a sua corpuscularidade fundamental [35]. Essa visão se manifesta, por exemplo, na “Questão 31” de seu livro intitulado *Óptica*:

(...)parece-me provável que Deus, no princípio tenha formado a matéria em partículas sólidas, pesadas, duras, impenetráveis e móveis(...) [36]

Em relação à defesa de um mecanicismo rígido o consenso entre os estudiosos parece mais distante. Ao longo de seus escritos, Newton se expressou de maneira até certo ponto ambígua sobre a existência ou não de um éter, elemento indispensável aos mecanismos cartesianos de impulsão sobre as partículas e à observância de um mecanicismo estrito [35]; referências de Newton a esse éter ocorreram até mesmo nos escritos da maturidade. Entretanto, sua teoria da atração gravitacional é uma teoria matemática de ação exercida a distância, o que contraria diretamente o princípio mecanicista de que toda ação causal deve ser local. Mais ainda, Newton conjecturou que os fenômenos naturais poderiam ser explicados em termos microscópicos por atrações e repulsões entre partículas:

Não têm as partículas dos corpos certos poderes, virtudes ou forças pelos quais agem à distância, não apenas sobre os raios luminosos, refletindo-os, refratando-os e inflitando-os, mas também umas sobre as outras, produzindo uma grande parte dos fenômenos da natureza? Pois é bem sabido

que os corpos agem uns sobre os outros pelas atrações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade; e esses exemplos mostram o teor e curso da natureza, e fazem não ser improvável que haja outros poderes atrativos além desses. [36]

Também em outro trecho Newton expressou seu afastamento do mecanicismo atomístico, em favor da atuação de forças de atração:

As partes de todos os corpos sólidos homogêneos que se tocam plenamente se ligam com muita força. E para explicar como isso pode acontecer, alguns inventaram átomos com gancho, o que equivale a evitar a questão; (...) Prefiro inferir de sua coesão que suas partículas atraem-se mutuamente por alguma força, a qual, no contato imediato, é extremamente intensa(...) [36]

Em razão desse caráter sugerido de ação a distância, a teoria newtoniana da gravitação foi recebida por muitos cientistas e pensadores com profundas reservas. No entanto, diante da insistência de Newton de que sua teoria não se apoiava em hipóteses e poderia ser verificada diretamente, alguns estudiosos levantaram a indagação se ele não teria adotado uma concepção puramente instrumental dessa teoria, ou seja, se ele não a enxergava como uma simples descrição matemática, sem compromisso com a realidade da ação a distância e do vácuo como explicação última da natureza⁶ e, sim, conciliável com a possibilidade de redução a mecanismos locais de causação.

Como quer que seja, mesmo que isso não representasse fielmente a concepção newtoniana (o que é objeto de discussão entre os estudiosos), a interpretação de sua teoria gravitacional que prevaleceu entre seus discípulos foi a concepção realista de forças efetivamente agindo entre corpos separados pelo vácuo.

Finalizemos a seção com um último comentário: como bem enfatizou Koyré [37], ainda que Kepler tenha sido pioneiro na proposição de uma força a agir sobre os corpos celestes e a causar seu movimento, bem como de um conceito de atração entre corpos, essa atração ainda se exercia apenas entre corpos “aparentados”, isto é, corpos de essências de alguma maneira afins. A idéia de uma afinidade de essências ainda possuía um apelo significativo sobre o pensamento científico. Consequentemente, ainda havia uma distância a ser percorrida até que se chegasse à idéia de um caráter universal da atração gravitacional, tal como foi formulado por Newton. Para a consolidação dessa idéia de universalidade era preciso adotar a visão de uma matéria homogênea em sua essência e, por conseguinte, submetida aos mesmos mecanismos. Para tanto, segundo Koyré, a con-

tribuição da visão atomística defendida por Gassendi, Boyle e outros foi inestimável.

8. A teoria cinética e as evidências a favor da hipótese atômica

Apesar de sua progressiva difusão pelo pensamento científico, podemos dizer que durante alguns séculos o atomismo foi apenas uma hipótese filosófica e física, sem implicações ou evidências experimentais.

Em 1738 Daniel Bernoulli formulou as bases de uma teoria cinética dos gases, fundamentada no modelo atomístico. Através desse modelo, Bernoulli estabeleceu uma relação entre a pressão exercida por um gás sobre as paredes do recipiente no qual está contido e uma energia associada à vibração dos átomos desse gás. Mesmo assim, em 1820 e 1845, respectivamente, a Royal Society rejeitou artigos, considerados descabidos, dos ingleses John Herapath e John James Waterston, versando sobre teoria cinética dos gases, em que eles relacionavam, não só a pressão, como já havia feito Bernoulli, mas também a temperatura de um volume de gás, ao movimento dos átomos nele contidos. Diga-se, a bem da verdade que os cálculos de Herapath, aparentemente, não eram completamente corretos [9].

No entanto, em 1857, o físico alemão Rudolf Clausius, já conhecido por seus estudos em Termodinâmica, obteve a publicação de um artigo intitulado *O Tipo de Movimento que Chamamos Calor* [38], fundamentado na teoria cinética. De fato, em seu esforço de combater a idéia do calor como uma substância (calórico) e, pelo contrário, explicá-lo mecanicamente em termos de trabalho e energia associados à constituição da própria matéria, Clausius relacionou corretamente a pressão e a temperatura de um volume de gás ao movimento dos supostos átomos ali contidos, mais precisamente, à velocidade média desses átomos. Com isso, ele fornecia uma interpretação conceitual apropriada da temperatura em termos da energia cinética dos átomos em movimento. Por meio dessa relação, Clausius foi capaz de obter uma estimativa da ordem de grandeza da velocidade média dos átomos de um gás. Diante dos altos valores encontrados, porém, surgiram questionamentos associados à velocidade dos processos de causação; se os átomos se moviam tão rapidamente, a velocidade dos processos físicos mediados por eles seria muito maior do que o que era observado na prática. Para rebater esses questionamentos, em 1858 Clausius introduziu o conceito de livre caminho médio, como sendo a distância percorrida por átomos durante o intervalo de tempo entre duas colisões sucessivas com outros átomos contidos no volume em questão. Em outras palavras, sua solução era: como o movimento era interrompido, a velocidade das possíveis processos mediados pelos átomos

⁶Segundo o grande historiador da ciência Alexandre Koyré, para Newton jamais se tratou de uma verdadeira força de atração entre corpos separados pelo vácuo (A. Koyré, *Études Newtoniennes*, Gallimard, Paris, 1968).

não correspondia diretamente à velocidade média desses objetos em caminho livre; pelo contrário, era sempre muito menor.

Em 1860, James Clerk Maxwell aprofundou o trabalho de Clausius, levando em consideração que os diferentes átomos presentes em qualquer volume se moviam a diferentes velocidades. Assim, mais apropriado do que utilizar nos cálculos um valor médio de velocidade, comum a todos os átomos, seria utilizar uma distribuição estatística de velocidades, representada por uma função matemática. Com base nessa proposta, em 1866 Maxwell foi capaz de mostrar que, a partir da teoria cinética, dotada das distribuições de velocidade que tinha introduzido, era possível calcular parâmetros macroscópicos do gás como, por exemplo, sua viscosidade. Por sua vez, baseado nesse cálculo da viscosidade, o químico austríaco Josef Loschmidt obteve uma estimativa para o tamanho dos átomos. Desta forma, começavam a surgir as primeiras implicações quantitativas da teoria atomística, que podiam ser comparadas com dados experimentais.

Entretanto, o grande nome do desenvolvimento da teoria cinética foi o físico austríaco Ludwig Boltzmann. Em 1868, Boltzmann publicou um trabalho fornecendo uma sustentação física mais clara para a forma da distribuição de velocidades proposta por Maxwell, que por esse motivo passou a se chamar “distribuição de Maxwell-Boltzmann”. Mais ainda, Boltzmann generalizou a expressão de Maxwell para sistemas formados não somente por partículas livres, mas também interagentes.

O próximo grande passo de Boltzmann se deu em 1872, quando demonstrou que um modelo de colisões newtonianas de esferas atômicas conduz à distribuição de velocidades proposta originalmente por Maxwell e fisicamente fundamentada por ele próprio. A partir daí, Boltzmann estabeleceu, sempre em termos da constituição atomística da matéria, uma série de importantíssimos resultados ligados à Segunda Lei da Termodinâmica e ao conceito de entropia, que redefiniu em bases microscópicas.

Credenciado por essa importantíssima contribuição à abordagem microscópica da física, Boltzmann se tornou o principal advogado da hipótese atomística na intensa polêmica científica acerca de sua validade [39]. Disse ele

Talvez a hipótese atomística seja um dia suplantada por outra; talvez, mas não é provável. [40]

De fato, mesmo no final do século XIX, a hipótese atômica ainda enfrentava uma forte oposição, tanto de natureza física quanto filosófica, cujos principais representantes eram o físico e filósofo Ernest Mach e o químico Wilhelm Ostwald. Mach, sobretudo, era adepto de uma concepção sensualista, segundo a qual os conceitos físicos deveriam ser uma tradução direta

de experiências proporcionadas pelos sentidos. Evidentemente, os átomos não eram objeto de percepções sensoriais; constituíam um pressuposto teórico, que os críticos como Mach renegavam como um elemento metafísico e, portanto, espúrio. Como outros, Mach aceitava a hipótese atomística apenas de uma forma puramente instrumental, isto é, como uma representação matemática, desprovida de caráter realístico.

A teoria atômica possui na ciência física uma função que é similar à de certas representações matemáticas auxiliares. É um modelo matemático para a representação dos fatos. Embora vibrações sejam representadas por curvas senoidais, o processo de resfriamento por exponenciais e o comprimento de queda por quadrados do tempo, ninguém admitiria que vibrações tenham qualquer coisa a ver com funções angulares ou circulares, ou queda com quadrados. [41]

No entanto, em 1905 (seu chamado “ano miraculoso”), Albert Einstein publicou um trabalho propondo uma explicação quantitativa do fenômeno do movimento errático de grãos de pólen em suspensão, denominado “movimento browniano”, em homenagem ao cientista Robert Brown, o primeiro a observá-lo experimentalmente [42, 43]. Einstein explicava esse movimento em termos de colisões incessantes dos grãos de pólen com as partículas do fluido no qual estavam imersos, segundo uma concepção “atomística” (nesse caso, molecular) da matéria.

Com efeito, se, conforme a teoria cinética, essas moléculas de fluido estão em movimento constante, então elas colidem incessantemente com as partículas de pólen que se encontram em suspensão. O resultado dessas colisões, baseando-se na descrição dos movimentos moleculares tal como oferecidos pela teoria cinética, apresenta concordância com os dados experimentais do movimento browniano, fornecendo um indício forte a favor da realidade da hipótese atomística e sugerindo a conclusão de que a teoria cinética tivesse sido verificada indiretamente. Mais ainda, a explicação não só era extremamente consistente, como proporcionava uma estimativa para as dimensões desses “átomos”.

Esse resultado foi tão contundente que até mesmo um crítico severo como Wilhelm Ostwald, que durante toda a polêmica entre Boltzmann e Mach a respeito da validade da hipótese atomística se alinhou às fileiras desse último, se convenceu da realidade da natureza corpuscular da matéria. De fato, em 1908, Ostwald, escrevendo uma nova introdução para o seu livro *Esboço de Química Geral*, afirmou abertamente sua conversão à crença na existência dos átomos.

Finalmente, em 1909, o físico francês Jean Perrin realizou uma série de cuidadosos experimentos sobre o movimento browniano, que corroboraram a explicação proposta por Einstein e consagraram definitivamente a

hipótese corpuscular da matéria. Com efeito, mesmo para muitos cientistas ainda céticos, a análise cinética do movimento browniano apresentada por Einstein e confirmada por Perrin constituiu uma evidência experimental da teoria atomística sustentada por Boltzmann. Daí em diante, as reservas em relação a ela foram amplamente superadas. Para tanto, também vieram a colaborar significativamente a descoberta e os estudos da natureza das partículas subatômicas. Algumas dessas partículas, por sua vez, se revelaram como compostas de objetos mais fundamentais. Outras, no entanto, ditas realmente elementares, resistem até hoje às investigações a respeito de uma possível estrutura interna, permanecendo como indivisíveis. São as verdadeiras herdeiras do conceito de “átomo”.

Por fim, com a física quântica a idéia da corpuscularidade da matéria invadiu o terreno aparentemente consolidado da natureza ondulatória da radiação. Novamente através do trabalho de Einstein, descobriu-se na radiação um caráter dual: circunstancialmente ondulatório ou corpuscular. Essa dualidade se estendeu também à matéria, desaguando na mecânica ondulatória de Erwin Schrödinger, em que os objetos microscópicos são representados por uma função (de onda) matemática, que contém toda a informação acessível sobre eles. Com o advento da mecânica quântica, segundo Werner Heisenberg [44], cumpria-se a última etapa do programa reducionista do atomismo: enquanto essa doutrina destituía o objeto microscópico de toda qualidade sensível, preservando-lhe, porém, os elementos espaciais, a mecânica quântica, ao reduzi-lo a uma mera função matemática, eliminava os últimos resquícios de representação concreta da matéria.

9. Conclusão

O atomismo foi uma doutrina filosófica, surgida na Grécia Antiga como uma solução para o aparente paradoxo lógico da idéia de mudança entendida como a passagem do ser ao não-ser; haveria uma realidade permanente subjacente a toda mudança que constatamos empiricamente a nossa volta: os átomos eternos e imutáveis. As diversas transformações captadas por nossos sentidos seriam decorrências dos incessantes processos de reorganização desses átomos, para nós invisíveis e, em si mesmos, dotados unicamente de propriedades geométricas de forma e tamanho.

A versão original do atomismo, proposta por Leucipo e Demócrito, era composta, conforme nosso entendimento moderno, de quatro elementos essenciais: 1) corpuscularidade da matéria; 2) existência do vazio, através do qual se movem os átomos; 3) redução de todas as propriedades sensíveis dos objetos a meras formas de percepção subjetiva dos modos de organização dos átomos de que são formados (reducionismo); e 4) mecanicismo, isto é, a redução de toda causação à ação externa de agentes materiais, por

meio de contato, excluída qualquer idéia de causa formal ou de finalidade. Já a versão proposta por Epicuro incorporava a gravidade como propriedade essencial dos átomos, caracterizando-a como uma tendência intrínseca à “queda”, e, assim, introduzindo um elemento formal nas categorias causais, flexibilizando, portanto, o mecanicismo estrito da versão original.

Com o colapso da civilização romana do ocidente, a doutrina atomística permaneceu durante séculos em um relativo ostracismo, até ser resgatada, no Renascimento. Ao assim ressurgir, no início da Era Moderna, o atomismo ofereceu ao homem, juntamente com o cartesianismo, uma visão de mundo alternativa ao pensamento aristotélico então vigente, em grande medida conflitante com ele e, ao mesmo tempo, bastante adequada à nova concepção científica nascente. Em especial, ao despirem a matéria de inclinações essenciais e restringirem suas qualidades unicamente a elementos geométricos como forma e extensão, conferindo-lhe, portanto, uma natureza homogênea favorável à universalidade das leis físicas; ao fornecerem uma descrição dos processos naturais isenta dos conceitos de causalidade formal e final, e adotarem, em seu lugar, um mecanicismo estrito, tanto o cartesianismo quanto o atomismo tradicional contribuíram decisivamente para a formação da concepção física moderna.

No entanto, apesar dos elementos comuns, cartesianismo e atomismo divergiram fundamentalmente em relação a dois aspectos centrais da concepção científica da natureza, por sinal, intimamente ligados: a continuidade (divisibilidade infinita) ou descontinuidade (corpuscularidade) essencial da matéria e a validade ou não da idéia de vazio; a rejeição lógica a essa idéia conduziu Descartes à adoção da equivalência entre matéria e extensão e, conseqüentemente, à opção por um Universo plenamente preenchido. Contudo, enquanto a ciência cartesiana, a partir de seus pressupostos plenistas, não foi capaz de produzir uma descrição quantitativa dos processos físicos, a visão corpuscular, desenvolvida, entre outros, por Gassendi e Boyle, encontrou seu desfecho na física newtoniana, que se tornou um paradigma de ciência quantitativa, rigorosamente fiel aos princípios epistemológicos de verificação experimental.

Em que pese sua rápida difusão pelo meio científico ao longo dos séculos XVII e XVIII, o atomismo permaneceu como um pressuposto filosófico sem implicações quantitativas ou experimentais, até que, tomando-o por base, foi formulada a teoria cinética dos gases, inicialmente por Daniel Bernoulli, no século XVIII e, posteriormente, já no século XIX, por Clausius, Maxwell e Boltzmann, principalmente. Com Ludwig Boltzmann essa abordagem microscópica dos fenômenos físicos adquiriu um novo grau de abrangência e sistematização. Em termos da teoria cinética assim formulada foi possível, em primeiro lugar, obter algumas previsões teóricas de parâmetros como a viscosidade dos gases e, sobretudo, uma explicação consistente do fenômeno mi-

croscópico denominado movimento browniano, feito realizado por Albert Einstein em 1905 e corroborado pelos estudos experimentais de Jean Perrin, em 1909. Após esse sucesso, as reservas em relação à realidade física da hipótese corpuscular rapidamente cederam lugar a uma ampla aceitação. Reforçada por outros modelos teóricos e descobertas experimentais, como por exemplo a das partículas subatômicas, a concepção corpuscular tornou-se elemento inquestionável da visão física a respeito da matéria.

Referências

- [1] MEC, Governo Federal, *PCNEM, Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, parte III, PCN+, Orientações Curriculares Nacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio* (MEC/Sentec, Brasília, 2002).
- [2] J.S. Sandoval e L.C. Cudmani, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **15**, 100 (1993).
- [3] T. Gomperz, *Os pensadores da Grécia: História da Filosofia Antiga* (Ed. Ícone, São Paulo, 2011), tomo I.
- [4] G. Reale, *História da Filosofia Antiga* (Ed. Loyola, São Paulo, 1994), v. 1.
- [5] C. Bailey, *The Greek Atomists and Epicurus* (Claredon Press, Oxford, 1928).
- [6] C.C.W. Taylor, in: *Primórdios da Filosofia Grega*, org. por A.A. Long (Ideias & Letras, São Paulo, 2008).
- [7] A. Pyle, *Atomism and its critics: From Democritus to Newton* (Thoemmes Press, Bristol, 1997).
- [8] B. Rochot, *Les Travaux de Gassendi, sur l'Epicure et sur l'Atomisme, 1619-1658* (De Vrin, Paris, 1944).
- [9] D. Lindley, *Boltzmann's atom* (Free Press, New York, 2001).
- [10] C.M. Porto, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **31**, 4602 (2009).
- [11] H. Diels, *Fragmente der Vorsokratiker*, de 388,18 a 389,24, citado por T.Gomperz, *Os pensadores da Grécia: História da Filosofia Antiga* (Ed. Ícone, São Paulo, 2011), tomo I, p. 281.
- [12] J.P. Baptista, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 116 (2003).
- [13] T. Gomperz, *Os pensadores da Grécia: História da Filosofia Antiga* (Ed.Ícone, São Paulo, 2011), tomo I, p. 294.
- [14] P.M.M. Duhem, *Le Système du Monde: Histoire des Doctrines Cosmologiques de Platon a Copernic* (Hermann, Paris, 1913-1959), v. 1.
- [15] G. Reale, *História da Filosofia Antiga* (Ed. Loyola, São Paulo, 1994),v.3.
- [16] Cícero, *De fato* 10, 22s, citado por G. Reale, *História da Filosofia Antiga*(Ed. Loyola, São Paulo, 1994), v. 3, p. 182.
- [17] Cícero, *De fato* 20, 46s, citado por G. Reale, *História da Filosofia Antiga*(Ed. Loyola, São Paulo, 1994), v. 3, p. 182.
- [18] S. Greenblatt, *The Swerve: How the World Became Modern* (W.W. Norton & Co., New York, 2011).
- [19] A. Rupert Hall, *From Galileo to Newton* (Dover, London, 1981).
- [20] F. Yates, *Giordano Bruno e a Tradição Hermética* (Cultrix, São Paulo, 1987).
- [21] G. Reale e D. Antiseri *História da Filosofia* (Ed. Paulus, São Paulo, 1990), v. 2.
- [22] E.J. Dijksterhuis, *The mechanization of the world picture* (Oxford University Press, Oxford, 1961).
- [23] ver Refs. [2],[3],[4],[5],[14]; ver também T. Kuhn, *A Revolução Copernicana* (Edições 70, Lisboa); E. Grant, *Much a do about Nothing* (Cambridge University Press, Cambridge, 1981).
- [24] R.A. Martins, *Trans/Form/Ação*, **16**, 7 (1993).
- [25] R. Descartes, *Princípios de Filosofia* (Rideel, São Paulo, 2007), cap. 2, IV, p. 60.
- [26] F.R.R. Évora, *Cadernos de História e Filosofia das Ciências - Campinas*, **15**, 127 (2005).
- [27] ver Ref. [25] cap. 2, XX, p. 68.
- [28] ver Ref. [17], p. 589-590.
- [29] G. Galilei *O Ensaíador*, par. 48, citado por A. Fantoli, *Galileu: Pelo Copernicanismo e Pela Igreja* (Ed. Loyola, São Paulo, 2008), p. 248.
- [30] A. Koyré, *Estudos Galilaicos* (Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1992).
- [31] M.A. Stewart, *Selected philosophical papers of Robert Boyle* (Hackett Publishing Co., Indianapolis, 1991).
- [32] A. Clericuzio, *Elements, Principles and Corpuscles: a Study of Atomism and Chemistry in ths Seventeenth Century* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000).
- [33] E.J. Dijksterhuis, *The Mechanization of the World Picture*(Oxford University Press, Oxford, 1961).
- [34] M. Boas, in: *Isaac Newton: Papers & Letters on Natural Philosophy*, edited by I.B. Cohen (Harvard University Press, Cambridge, 1958).
- [35] M. Boas and A.R. Hall, in: *Newton*, editado por I.B. Cohen e R. Westfall, (Contraponto Editora, Rio de Janeiro, 2002).
- [36] I. Newton, *Óptica* (EdUSP, São Paulo, 2002), Questão 31, p. 274-293.
- [37] A. Koyré, *Études Newtoniennes* (Gallimard, Paris, 1968).
- [38] R. Clausius, *Phil. Mag.* **XIV**, 108 (1857).
- [39] L. Boltzmann *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 259 (2006).
- [40] L. Boltzmann, *Almanach der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, Viena, 234 (1886).
- [41] E. Mach, *Die Mechanik in ihrer Entwicklung* (Leipzig, 1933), p. 467.
- [42] A. Einstein, in: *O Ano miraculoso de Einstein*, editado por J. Stachel (Ed.UFRJ, Rio de Janeiro, 2005).
- [43] S.R.A. Salinas, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 263 (2005).
- [44] W. Heisenberg, *Philosophical Problems of Quantum Physics* (Ox Bow Press, Woolbridge, 1979).