

Filosofia Mecânica

Questão: Como explicar a gravidade sem forças à distância?

Você realmente entende o que está acontecendo quando solta uma pedra e vê ela cair? Por que ela cai? Porque ela é atraída. Mas por que ela é atraída? Porque todos os corpos se atraem. Mas por que eles se atraem, ou melhor, qual é o mecanismo que está por trás disso?

Podemos ficar perguntando porquê para sempre? Ou uma hora temos que parar e aceitar uma resposta dogmaticamente? E, mudando o foco da pergunta, por que queremos obter respostas? E por que às vezes nos satisfazemos com uma resposta, sentimos uma felicidade de termos compreendido uma questão, só para mais tarde descobrir que tínhamos deixado de perceber uma ambiguidade, e que o prazer da compreensão era só uma ilusão? Qual a diferença entre explicar e compreender?

As concepções tradicionais da matéria e da gravidade, antes do século XVII, eram basicamente três: o hilemorfismo aristotélico, o atomismo greco-romano e o naturalismo animista.

1. Hilemorfismo e a Física Aristotélica

O *hilemorfismo* é a filosofia desenvolvida por Aristóteles de que todas as coisas consistem de matéria (*hile*) e forma (*morfe*). Por “matéria” entende-se um substrato (matéria prima) que só existe potencialmente, e que só existe em ato junto com uma forma (sobre potência e ato, ver seção V.4). A mudança das coisas é explicada por quatro tipos de causas: o fator material, a forma, a causa eficiente e a causa final (ou propósito). Haveria quatro elementos básicos, terra, água, ar e fogo, cada qual tendo um par de qualidades distintivas: terra é fria e seca; água é fria e úmida; ar é quente e úmido; fogo é quente e seco. Os elementos tendem a se ordenar em torno do centro do mundo, cada qual em seu “lugar natural”. Se um elemento é removido de seu lugar natural, seu “movimento natural” é retornar de maneira retilínea: terra e água tendem a descer, ar e fogo tendem a subir. O “movimento violento” envolve a remoção de um corpo de seu lugar natural, ou é o resultado do exercício de uma força por um agente.

Para Aristóteles, todo movimento tem um agente (um motor) e um paciente (o movido). A fonte do movimento é uma força (*dunamin* ou *ísquis*). No movimento natural a força é interna, e no movimento violento ela é externa, tendo que haver contato contínuo entre o motor e o movido. Assim, para explicar porque uma pedra arremessada continua se movendo na horizontal, Aristóteles tinha que postular a “antiperistasis”, ou seja, o ar deslocado pela frente da pedra retornaria para a parte traseira da pedra e nela exerceria uma força!

O paradigma de *movimento violento* é uma pessoa empurrando um objeto, como uma caixa de madeira em uma superfície lisa. A distância (S) percorrida em um intervalo de tempo (T) é proporcional à força exercida (F) dividida pelo peso do corpo (P), sendo que este peso inclui também a resistência do meio: $F/P = S/T$. Aristóteles tinha uma noção clara de que, abaixo de uma certa força exercida, o movimento pode cessar (devido ao atrito estático) (*Física* VII.5, 249b30-250a28).

O paradigma do movimento natural é a queda de um corpo em um fluido, como água. Neste caso (*Física* IV.8, 215a24-b10), a força é o peso do corpo (P), e a resistência (R) exprime a densidade do meio: $P/R = S/T$. Aristóteles também descreveu o movimento para cima de uma porção de fogo com a mesma lei, indicando que a velocidade seria proporcional

ao volume do objeto (*De caelo*, 309b11-15). O filósofo da ciência Stephen Toulmin (1961) salientou que esta lei é correta no domínio de observação restrito em que o corpo atinge uma velocidade terminal de queda, sendo uma versão simplificada da lei de Navier-Stokes. Há dois trechos em que Aristóteles indica ter noção de que, na queda dos corpos, há alteração de velocidade (*Física*, 230b24-28; *De caelo*, 277b4-5).

Em sua *Física* (IV.8, 215b12-22), Aristóteles trata da possibilidade do *vazio*. Como este não oferece resistência, o movimento de queda seria infinitamente rápido, o que é inadmissível. Assim, *o vazio não existiria*. Porém, em outros trechos, menciona que a velocidade de queda dos corpos depende do peso. Na *Física* (VIII, 216-220), considera que se não houvesse um meio a ser vencido (ou seja, se a queda fosse no vazio), as velocidades de quaisquer corpos seriam as mesmas!

Esse resumo indica que “Aristóteles não era um idiota”,¹⁰³ que fundou suas teorias em observações, e que tinha uma noção confusa de que a queda dos corpos poderia envolver variação de velocidade. O aristotélico Estráton de Lâmpsaco (c. 340-268 AEC) argumentaria que a queda dos corpos graves no ar não se dá com velocidade uniforme, usando como evidência o *barulho* que um corpo faz ao se chocar com o solo, pois ao cair de uma grande altura o barulho é bem maior do que quando cai de uma altura pequena.

2. Atomismo Greco-Romano

O atomismo grego surgiu com Leucipo de Mileto (início do séc. V AEC) e foi desenvolvido por seu discípulo Demócrito de Abdera (c. 460-370 AEC). Posteriormente ele se estabeleceu como escola em Atenas no “Jardim” de Epicuro (341-270 AEC), e foi difundido no mundo romano por Lucrecio (c. 99-55 AEC), em seu famoso poema *Da natureza das coisas*.

Segundo esta visão, só teriam realidade os átomos e o espaço vazio. Cada átomo, individualmente imperceptível para os nossos sentidos, teria uma forma e um tamanho imutável, e seria indivisível. Haveria um número infinito de átomos espalhados no vazio infinito. Eles estariam em movimento contínuo, chocando-se frequentemente uns com os outros. Nas colisões, os átomos poderiam rebater ou então se ligar através de ganchos ou formas complementares. As propriedades primárias dos átomos, para Demócrito, seriam três: a *forma* de cada átomo (o que inclui o tamanho), sua *posição* (o que inclui sua orientação em relação a outros átomos), e o *arranjo* de um conjunto de átomos. Epicuro adicionou o *peso* a esta lista.

Epicuro incumbiu-se da tarefa de responder às críticas de Aristóteles ao atomismo. Dentre essas, estava a crítica à concepção de como os mundos teriam se originado. Segundo Demócrito, os átomos originariamente estariam “caindo” no vazio, todos na mesma direção paralela. Átomos maiores cairiam com maior velocidade, se chocariam com os mais lentos e, assim, se iniciariam movimentos em todas as direções, que acabariam formando os mundos, num dos quais nós viveríamos (os outros mundos estariam espalhados pelo espaço infinito). Vimos que Aristóteles mencionou que, se houvesse o vazio, os átomos deveriam cair com a mesma velocidade, e assim não poderiam se chocar uns com os outros, para formar os mundos. Epicuro (ou Lucrecio, segundo alguns autores) resolveu o problema da formação dos mundos introduzindo um pequeno movimento aleatório lateral (“*clinamen*”), um movimento

¹⁰³ Comentário de CASPER, B.M. (1977), “Galileo and the fall of Aristotle: a case of historical injustice?”, *American Journal of Physics* 45, 325-30. Ver também KATZ, J. (1943), “Aristotle on velocity in the void”, *American Journal of Philology* 64, 432-5, e TOULMIN, S. (1961), *Foresight and understanding*, Harper & Row, New York, p. 50.

sem causa, para explicar a progressiva agregação dos átomos. Esse movimento sem causa de “átomos espirituais” seria também usado para explicar a liberdade da alma.

Os atomistas eram *materialistas*, pois consideravam que, na morte, os átomos espirituais se desagregariam, ou seja, a alma seria fruto da matéria. No séc. XVII, o atomismo seria discutido especialmente por Pierre Gassendi, dentro da visão de mundo do catolicismo.¹⁰⁴

3. Naturalismo Animista

Outra corrente que foi importante nos primórdios da ciência pode ser chamada de *naturalismo animista*. Por “naturalismo” entende-se uma visão de mundo que parte da existência da natureza, ou de nossa experiência perceptiva desta natureza, e que concebe que a natureza possui uma certa unidade e segue leis próprias. Ela se opõe a duas outras classes de visões de mundo. As visões mitológicas e teológicas partem da existência de deuses antropomórficos, de um Deus único, de escrituras sagradas ou do acesso direto do indivíduo a um mundo sobrenatural. E as visões humanistas e subjetivistas tomam o ser humano como a medida de todas as coisas, ou fundam o mundo no “sujeito epistemológico”, isto é, nas intuições primeiras do observador que conhece ou concebe o mundo. As teorias científicas (e as posições em filosofia da ciência) geralmente adotam uma postura naturalista, apesar de haver posições que mesclam essas visões de mundo.

O naturalismo animista é uma posição naturalista, próxima da atitude científica, mas que considera que a natureza tem uma espécie de alma ou vida. Na Antiguidade, ela pode ser associada aos pitagóricos, ao taoísmo na China e ao estoicismo, entre outros. No Renascimento, o naturalismo animista ressurgiu com vigor, e considerava que a natureza seria imbuída de uma espécie de alma, que fazia as partes separadas (como as de um imã) desejarem se unir novamente, regidos por forças de simpatia e antipatia. Para a escolástica aristotélica, havia uma ordem racional da natureza que o intelecto poderia penetrar. Por contraste, o naturalismo renascentista salientava o mistério de uma natureza opaca à razão, só cognoscível através da experiência.

Os representantes típicos desta corrente eram os alquimistas, como o suíço Paracelso (1493-1541) e o alemão Andreas Libavius (1560-1616). A finalidade da alquimia era conseguir a transmutação dos metais em ouro e descobrir um elixir da vida eterna e cura de todas as doenças. Introduziram a ideia de utilizar agentes químicos na medicina, além das ervas medicinais. A concepção alquímica da matéria baseava-se em três princípios: sal, enxofre e mercúrio. O naturalismo renascentista foi também influenciado pelo *hermetismo*, uma tradição semi-religiosa e mágica vinda da Antiguidade, que ensinava que o homem é capaz de descobrir elementos divinos dentro de si, defendendo uma afinidade mística entre o mundo e a humanidade, entre o macrocosmo e o microcosmo. Essa afinidade seria também a base teórica da astrologia.

Uma das mais importantes obras dentro da tradição do naturalismo renascentista foi o *De magnete*, escrito em 1600 pelo inglês William Gilbert (1544-1603). O magnetismo seria uma “matéria telúrica”, a “alma da Terra”, concebendo a Terra como um grande imã. O magnetismo seria um poder não-corpóreo, já que a intervenção de objetos entre dois imãs não afeta a atração. Contrastou eletricidade e magnetismo da seguinte maneira: a primeira

¹⁰⁴ Um relato detalhado dos atomistas está em LANGE, F.A. (1974), *The history of materialism*, trad. E.C. Thomas, Arno Press, Nova Iorque (1ª ed. em alemão: 1866; 2ª ed.: 1875). É dele a hipótese discutível de que Epicuro teria introduzido o *clinamen* para responder a Aristóteles (p. 26). Uma boa fonte da história da ciência grega é: LLOYD, G.E.R. (1970), *Early Greek science: Thales to Aristotle*, e LLOYD (1973), *Greek science after Aristotle*, ambos da Norton, Nova Iorque.

envolveria uma ação da matéria, com força e coesão; a segunda seria uma ação da forma, com união e concordância. Johannes Kepler (1571-1630) foi influenciado por esta tradição, ao conceber que o Sol seria a *anima motrix* (alma motiva) que exerceria uma força nos planetas, fazendo-os orbitar em torno de si. Imaginou que essa atração seria de natureza magnética.¹⁰⁵

Em suma, para o naturalismo animista a gravidade é explicada por uma atração entre os corpos, que possuem uma espécie de alma, e que é semelhante ao amor entre os seres vivos. Da mesma maneira que um filho separado da mãe é por ela atraído, e que um imã separado em dois deseja se unir novamente, assim também os princípios de simpatia e antipatia regeriam o comportamento dos corpos celestes.

4. Lei da queda e leis do movimento planetário

Vimos que o estudo da queda dos corpos se iniciou na Antiguidade. Aristóteles considerava que os corpos pesados caem com velocidade constante em meio resistivos. Estráton e Filopono (séc. VI EC) argumentavam que na queda livre a velocidade aumenta com o passar do tempo. Na Idade Média, as Escolas de Merton (em Oxford) e de Paris iniciaram a descrição geométrica do movimento acelerado, exprimindo a velocidade média \bar{v} de um corpo em termos da velocidade inicial v_0 e final v : $\bar{v} = \frac{1}{2}(v - v_0)$ (CLAGETT, 1959). Galileo (1638) mostrou que, em tempos iguais, as distâncias percorridas por corpos em queda livre variam com os números ímpares, o que equivale em notação moderna a $\Delta x = \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$, onde Δx é a distância percorrida em uma queda, a partir do repouso, Δt o intervalo de tempo de queda, e a a aceleração.

Paralelamente a Galileo, Johannes Kepler utilizou os dados astronômicos de Tycho Brahe para formular três leis do movimento planetário. [1ª lei] A trajetória de um planeta é uma elipse, com o Sol localizado em um dos focos da elipse. [2ª lei] A lei das áreas diz que a área do setor subentendido pelo movimento planetário, centrado no Sol, em um certo intervalo de tempo, é uma constante (1609). [3ª lei] O período T de revolução de um planeta e o seu raio médio r em torno do Sol estão relacionados de tal maneira que $T^2/r^3 = \text{cte}$ (lei sesquiáltera, 1618) (cf. Cohen, 1967).¹⁰⁶

5. A Filosofia Mecânica

Os trabalhos de Copérnico e Galileu abriram o caminho para o ressurgimento da antiga tradição “mecanicista”, representada na Antiguidade pelos atomistas, mas adquirindo uma nova forma no que viria a ser chamado de *filosofia mecânica* (termo introduzido por Robert Boyle), em que os princípios explicativos envolvem apenas matéria (entendida como inerte ou passiva) e movimento.

Curiosamente, esta visão de mundo da filosofia mecânica surgiu no seio do cristianismo, como uma reação contra o naturalismo animista, a partir do padre Marin

¹⁰⁵ Sobre o naturalismo renascentista, ver WESTFALL, R.S. (1971), *The construction of modern science*, Cambridge U. Press, pp. 25-31, e também RONAN (1987), *História ilustrada da ciência da Universidade de Cambridge*, 4 vols., J. Zahar, Rio de Janeiro; Círculo do Livro, São Paulo (orig. em inglês: 1983), vol. III, pp. 11-15, 28-36. Na seção II.1 mencionamos a importância da intuição para a *Naturphilosophie*, herdeira do naturalismo animista no séc. XIX romântico alemão.

¹⁰⁶ CLAGETT, M. (1959), *The science of mechanics in the Middle Ages*, University of Wisconsin Press, Madison. COHEN, I.B. (1967). *O nascimento de uma nova física: de Copérnico a Newton*, trad. G. de Andrada e Silva, Edart, São Paulo (original em inglês: 1960; 2a ed. revisada: 1985).

Mersenne (1623).¹⁰⁷ Para ele, a ameaça das doutrinas naturalistas estava na concepção de que a matéria seria “ativa”, o que retiraria de Deus e dos próprios seres humanos a responsabilidade pelas questões humanas. Se não houvesse atividade alguma na matéria, como queria Mersenne, Deus teria que ser invocado para explicar essa atividade.

Na filosofia mecânica, portanto, matéria e espírito estavam separados. A matéria seria regida apenas por causas eficientes externas, provenientes de choques (colisões), e seria “inerte”, sem atividade ou potência internas, o que seria expresso no “princípio de inércia” da mecânica clássica. Acabava-se com o “mistério do mundo” do naturalismo animista, e salientava-se a transparência do mundo à razão. Deus teria criado o Universo de uma só vez, pondo a matéria em movimento de uma vez por todas. Este movimento se conservaria, seria indestrutível. O mundo material mover-se-ia apenas em consequência dos choques entre os corpos, como o mecanismo de um relógio, seguindo a necessidade das leis da física.

Na física, a concepção mecanicista tornou-se hegemônica durante uns oitenta anos a partir de 1644, sendo compartilhada por cientistas (Descartes, Huygens, Hooke, Boyle, o jovem Newton) e filósofos (Gassendi, Mersenne, Hobbes). Esta visão de mundo seria lentamente destruída pela ascensão da física de Newton e da astronomia de Kepler no continente europeu, a partir de 1720. Com isso, a noção de força gravitacional passou a ser aceita sem que se postulasse um mecanismo subjacente, como os que veremos na seção X.6.

6. A Física e Cosmologia de Descartes

René Descartes (1596-1650) ganhou fama com seu *Discurso do método* (1637), que continha um apêndice, *A Geometria*, no qual mostrou como escrever curvas geométricas em termos de equações algébricas, e vice-versa (Pierre de Fermat também estava desenvolvendo isso, de maneira independente). Em 1644 publicou o *Princípios de filosofia*, que buscou explicar todos os fenômenos físicos (incluindo químicos, geológicos e astronômicos) em termos de matéria em movimento.¹⁰⁸

A matemática tinha um papel central na concepção cartesiana. A geometria, que lidava com formas no espaço, podia ser deduzida a partir das ideias claras e distintas do intelecto. A física tratava de matéria em movimento. Um engenhoso passo de Descartes foi *identificar a matéria com a extensão*, de tal maneira que a física passaria a ser uma geometria de figuras em movimento (“extensão” significa espaço, volume). Identificando matéria e extensão, quatro consequências eram imediatamente tiradas: *i*) Como o espaço é infinito, também o seria a matéria. *ii*) Como o espaço é homogêneo, haveria a mesma matéria por toda parte. *iii*) Como o espaço é infinitamente divisível, assim também seria a matéria, o que negava o atomismo. *iv*) Como não faria sentido pensar num espaço sem extensão, não haveria espaço sem matéria: o vácuo seria impossível.

Descartes partiu de um princípio *a priori* (anterior à experiência) para derivar as leis gerais da física, a perfeição de Deus, e sua consequente invariabilidade. Porém, observamos mudança no mundo, significando que Deus quis que o mundo estivesse em movimento. Há portanto variação, mas tal variabilidade deve ser a mais simples possível, a mais “invariável” possível. Isso equivaleria a um ato contínuo de conservação da quantidade de movimento (*quantitas motus*) total do Universo. Tal quantidade, segundo Descartes, seria medida pelo

¹⁰⁷ Ver GAUKROGER, S. (1999), *Descartes: uma biografia intelectual*, Contraponto, Rio, pp. 191-8.

¹⁰⁸ DESCARTES, R. (2005), *Princípios de filosofia*, trad. Heloísa Burati, Rideel, São Paulo, pp. 189-93 (orig. em latim: 1644). As Figs. X.1 e 2 são retiradas deste livro, e feitas em xilogravura por Frans von Schooten, o jovem. Sobre a filosofia mecânica em Descartes, pode-se também consultar DIJKSTERHUIS, E.J. (1986), *The mechanization of the world picture*, trad. C. Dikshoorn, Princeton U. Press, pp. 403-18 (orig. em holandês: 1950), e WESTFALL (1971), op. cit. (nota 105), pp. 30-42.

produto da quantidade de matéria (massa) do corpo pela velocidade do mesmo corpo: $m \cdot v$. O princípio de conservação de quantidade de movimento diz então que a soma da quantidade de movimento ($m \cdot v$) de todos os corpos do Universo é sempre a mesma. É um princípio que ainda se aceita hoje em dia, e quem o formulou pela primeira vez foi Descartes, a partir da ideia clara e distinta de Deus. Na verdade, o princípio hoje aceito tem uma diferença importante, que é que a velocidade precisa ser tomada como um “vetor” (com direção), e não simplesmente como um “escalar” (um número simples, sem direção).

Com isso, passa a enunciar três leis da natureza. A primeira é uma lei de *inércia geral*: cada coisa permanece no estado em que está, enquanto não encontra outras causas exteriores. Assim, um objeto tem a tendência natural de manter sua forma, por exemplo. A segunda lei é a da *inércia linear*: todo corpo que se move tende a continuar seu movimento em linha reta, com a mesma velocidade. Essa ideia surgiu com Galileu, mas para o cientista italiano o movimento inercial acabava sendo um movimento circular em torno da Terra. Para Descartes, em contrapartida, o movimento inercial (livre de causas) é sempre linear. A terceira lei envolve um conjunto de sete regras para descrever o choque entre os corpos, mas os filósofos naturais da época mostrariam que essas leis estavam erradas, levando Huygens, Wallis e Wren a formularem independentemente as leis corretas, em torno da década de 1660.

Ao tratar do movimento circular (*Princípios de filosofia*, II, §39, III, §58-59), Descartes considerou um corpo que gira em uma corda (uma funda, Fig. X.1), estipulando que a pedra tem uma tendência (*conatus*) de se mover, por inércia, em linha reta (pela tangente). E essa tendência é permanente, conforme podemos sentir pela força com a qual a pedra girante puxa, tensiona, a corda. Isso corresponderia a um *conatus* radial, centrífugo, que explicaria por exemplo o movimento de uma bola em um tubo girante (Fig. X.2).

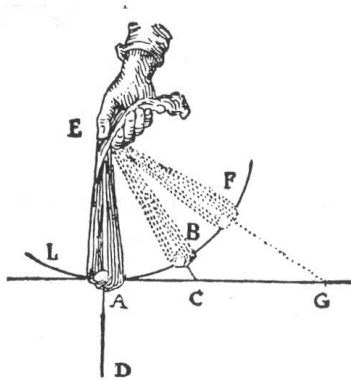


Figura X.1. Pedra descrevendo movimento circular em uma funda. Ao ser liberada, ela sai em linha reta pela tangente ACG.

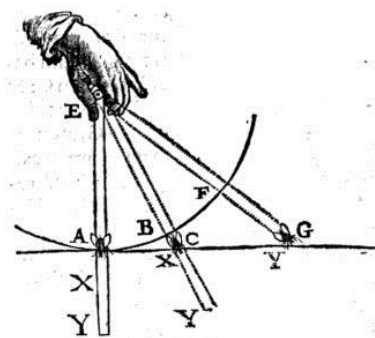


Figura X.2: Inseto em um tubo girante tende a se mover centrifugamente. (Xilogravuras de funda. Ao ser liberada, ela sai em linha reta pela tangente ACG. DESCARTES, [1644] 2005, III, § 59)

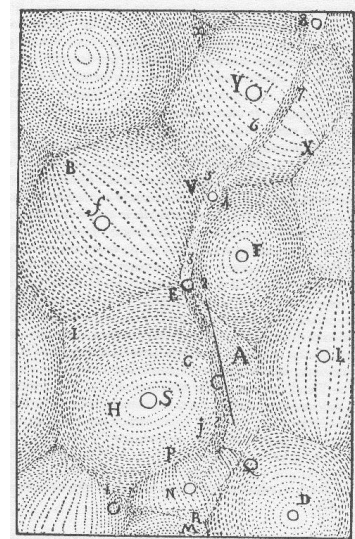


Figura X.3. Vórtices associados a diferentes estrelas. O Sol (S) está cercado pelas trajetórias circulares de seus planetas. Vê-se também a trajetória de um cometa por entre as células de cada vórtice.

A *cosmologia* de Descartes baseava-se na noção de que cada estrela tinha em torno de si um grande vórtice, que giraria da maneira como faz o nosso sistema solar (Fig. X.3). Ou seja, o Sol é uma dentre as várias estrelas, e os planetas orbitam à sua volta porque são carregados por uma espécie de redemoinho de matéria. Descartes fez observações de redemoinhos em tonéis de vinho, e pode-se observar que objetos flutuantes giram em torno de

si mesmos no mesmo sentido que a rotação do líquido: ora, é exatamente isso que acontece com os planetas do Sistema Solar!

Haveria três tipos de matéria. O 1º elemento, chamado também de “matéria sutil”, seria constituído de lascas minúsculas que teriam se separado do choque entre a matéria dos outros tipos. Elas teriam um movimento muito rápido, seriam luminosas e formariam a matéria do Sol e das outras estrelas. Teriam migrado para o centro do vórtice por causa da tendência da matéria mais grossa de se afastar do centro. O 2º elemento seria constituído por partículas arredondadas que preencheriam os céus. Seria a matéria transparente que carregaria os planetas em órbita circular. O 3º elemento seria a matéria mais grossa que constitui a Terra, os planetas e os cometas. Ela seria opaca, apesar de o ar ser tão fino que aparece transparente. A “matéria celeste”, que a tudo permeia, seria constituída principalmente do 2º elemento, mas também conteria a matéria sutil e fragmentos do 3º elemento, incluindo ar (*Princípios de filosofia*, IV, § 25).

O 3º tipo de matéria, que nos cerca, é cheio de interstícios, como uma esponja, e essas fendas estão sempre preenchidas pela matéria celeste, já que o vácuo é impossível. Da mesma maneira que uma esponja aumenta de tamanho quando ela é embebida em água, a matéria terciária expande quando é aquecida e preenchida pela matéria celeste.

A *quantidade de matéria* (o que viria a ser chamada “massa”) é dada pelo volume ocupado pela matéria terciária. Sendo assim, por que dois objetos de igual volume (digamos 1 litro), um de chumbo e outro de cera, têm pesos diferentes? A explicação de Descartes é que o chumbo tem poucos interstícios, ao passo que a cera tem muitos. Assim, o volume efetivamente ocupado pela matéria celeste é bem maior na cera do que no chumbo.

7. Explicação da Gravidade segundo a Filosofia Mecânica

Por que sentimos que o chumbo é mais pesado do que a cera? Qual a origem da gravidade? Descartes considerava que a Terra gira em torno de seu eixo movido pelo vórtice de matéria celeste. Na superfície da Terra, tal matéria se move mais rapidamente do que os corpos grossos, como se fosse um vento. Sua tendência para sair para fora (em movimento “centrífugo”, assim como a funda mencionada acima) seria maior do que os corpos de matéria terciária, mais lentos. Essa saída da matéria celeste (que se daria inclusive por entre os interstícios dos corpos mais grossos) tende a criar um vácuo embaixo da matéria terciária, de forma que esta tem uma tendência a preencher este (quase) vácuo, descendo verticalmente (a mesma explicação era também dada em termos de diferenças de pressão da matéria celeste). Assim, os corpos caem, devido à rotação da matéria celeste em torno da Terra, para preencher o espaço deixado por essa matéria celeste. A explicação para a órbita da Lua em torno da Terra é a mesma: matéria celeste se afasta da Terra, devido ao movimento do vórtice em torno de nosso planeta, e a Lua é obrigada a preencher o vácuo que se formaria, desviando assim de seu trajeto retilíneo natural.

Mas por que um corpo mais pesado que cai em nossa mão gera uma sensação mais intensa de força? Ora, os corpos caem com a mesma aceleração, como demonstrara Galileu (desprezando-se, é claro, o efeito retardador do ar). Pelas leis do choque, um corpo com mais matéria terciária (como o litro de chumbo) transmite mais quantidade de movimento (velocidade) para a nossa mão do que o corpo com menos matéria terciária (como o litro de cera). Assim, o chumbo que cai em nossa mão é mais difícil de segurar.

E se os dois corpos estiverem *parados* em nossa mão? Neste caso, por que o litro de chumbo é mais difícil de segurar do que o de cera? Aí eu não sei, pergunte ao René!

A teoria da gravitação de Descartes tinha um problema sério, que era o fato de que a tendência centrífuga da matéria celeste de se afastar do centro de rotação, digamos da Terra,

se dava apenas no plano perpendicular ao eixo da Terra. Por que então os corpos caem em direção ao centro da Terra, mesmo fora do Equador?

Christiaan Huygens (1629-95) buscou resolver este problema em seu *Discurso sobre a causa do peso*, redigido em 1669 mas só publicado em 1690.¹⁰⁹ Substituiu o vórtice cilíndrico de Descartes por um vórtice esférico, imaginando que as partículas da matéria etérea giram em torno da Terra em todas as direções. A velocidade v dessas partículas obedeceria à relação $v^2/r = g$, onde r é o raio da Terra e g a aceleração dos corpos em queda livre. Uma pedra que fosse solta no ar seria atingida em sua parte superior por matéria celeste de velocidade maior, e assim, segundo ele, tenderia para o centro da Terra. Para sustentar sua teoria, Huygens realizou experimentos em uma mesa giratória com um recipiente cilíndrico de água, com seu centro no eixo de rotação da mesa. Pedacos de cera levemente mais pesados do que a água, que se encontravam no fundo do recipiente, tendiam para o centro do recipiente (isto é, para o eixo de rotação) a partir de uma certa velocidade de rotação, já que não conseguiam acompanhar o movimento da água (devido ao atrito com o fundo do recipiente).

A teoria mecânica dos vórtices planetários explicava bem o fato de os planetas se moverem no mesmo plano em torno do Sol, em movimento aparentemente circular, e de suas rotações e revoluções se darem no mesmo sentido. Nas palavras de Huygens (1686): “Os planetas nadam em matéria. Pois, se não o fizessem, o que impediria os planetas de se afastarem, o que os moveria? Kepler quer, erroneamente, que seja o Sol.”

A teoria da gravitação de Newton (1687) foi a primeira a explicar as leis de Kepler, e a evidência experimental a favor de órbitas elípticas levou tanto Huygens quanto Leibniz a tentar formular uma explicação mecânica para elas, em 1690 (até Newton tentou fazer isso, como aparece na Questão 21 de seu livro *Opticks*). O primeiro efeito da obra de Newton foi então o fortalecimento da teoria mecânica dos vórtices planetários. Mas a partir de 1720, a nova geração de físicos no Continente Europeu se convenceu da superioridade do programa newtoniano.¹¹⁰

8. Teoria Cinética da Gravitação

Em 1782, muito tempo depois da queda da filosofia mecânica, George Louis LeSage, em Genebra, encontrou uma maneira elegante de explicar a lei da gravitação de Newton por meio de princípios mecânicos (ou seja, envolvendo apenas forças de contato). Sua teoria pode ser chamada uma “teoria cinética da gravitação”, inspirada na ideia formulada por Daniel Bernoulli para gases, em 1738. Na verdade, sua teoria é semelhante a uma proposta feita por um matemático suíço, amigo de Newton, Nicolas Fatio de Duillier, em torno de 1693.

A ontologia de LeSage envolve “corpúsculos ultramundanos”, bastante leves e velozes, que bombardeariam todos os corpos pesados de todos os lados. Um corpo perdido no espaço receberia um número de impactos mais ou menos igual de todos os lados, permanecendo assim em um estado inercial. Mas quando dois corpos estão próximos, como a Terra e a Lua, um deles bloquearia parte dos corpúsculos ultramundanos que atingiria o outro, como na formação de uma sombra. Desta forma, os corpos se atrairiam. LeSage ajustou seus parâmetros de forma a obter a lei da gravitação de Newton. Para explicar porque corpos mais densos exercem maior força gravitacional, LeSage teve que adotar a teoria cartesiana da matéria, e supor que um corpo menos denso tem mais espaço vazio em seu interior, por onde uma parte dos corpúsculos ultramundanos passaria sem ser bloqueada.

¹⁰⁹ DIJKSTERHUIS (1986), op. cit. (nota 108), pp. 461-3. Ver também MARTINS, R.A. (1989), “Huygens e a gravitação newtoniana”, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* (série 2) 1, 151-84.

¹¹⁰ BAIGREE, B.S. (1988), “The vortex theory of motion, 1687-1713: empirical difficulties and guiding assumptions”, em Donovan, A.; Laudan, L. & Laudan, R. (orgs.), *Scrutinizing science*, Synthese Library 193, Kluwer, Dordrecht, pp. 85-102.

No século XIX a teoria cinética da gravitação foi bastante discutida como um tipo de teoria de éter. No séc. XX, foi defendida por Charles Brush (1928), e o interesse nela continua dentre detratores da física “oficial” (ver livro de Edwards, 2002). Ideias semelhantes têm sido propostas em contextos mais sofisticados, como o programa de “gravitação induzida” ou “emergente”, iniciada pela proposta de Andrei Sakharov (1967) de uma gravitação einsteiniana induzida por flutuações quânticas.¹¹¹

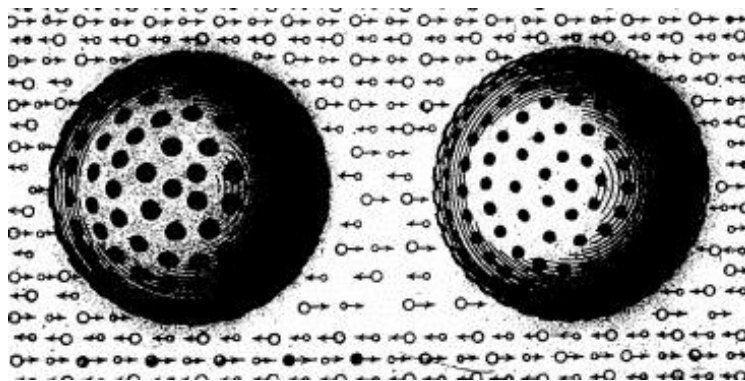


Figura X.4: Par de corpos macroscópicos com densidades diferentes atravessados por correntes de corpúsculos ultramundanos. Detalhe de figura que apareceu em publicação de Le Sage (obtido de EVANS, 2002, p. 11).

¹¹¹ BRUSH (1976), op. cit. (nota 78), vol. 1, pp. 21-22. Este menciona alguns autores que retomaram a ideia. Ver também: EDWARDS, M.R. (org.) (2002), *Pushing gravity: new perspectives on Le Sage's theory of gravity*, Apeiron, Montreal, que contém dois artigos do historiador brasileiro Roberto de A. Martins sobre experimentos do italiano Qurino Majorana (1919) para detectar efeitos de absorção da gravidade. A Fig. X.4 é retirada deste livro, do artigo de EVANS, J. “Gravity in the century of light: sources, construction and reception of Le Sage's theory of gravitation”, pp. 9-40.