

O Conceito de “Força” em Newton

Questão: Qual o estatuto ontológico do conceito de força?

1. Newton: Mecanicismo com Forças à Distância

O trabalho de Isaac Newton (1642-1727) pode ser visto, por um lado, como a culminação da tradição de pesquisa da filosofia mecânica, ao enunciar suas três leis da mecânica (princípio de inércia, definição de força, e princípio de ação e reação). No entanto, especialmente em seu estudo da lei de atração gravitacional, introduziu a concepção de uma força que age à distância. Ao fazer isso, injetou no programa mecanicista um elemento da tradição do naturalismo animista (de Kepler), e foi bastante criticado por isso. Acabou adotando uma postura “instrumentalista” de renunciar à busca de uma explicação mecânica para esta atração.

Em sua juventude, Newton era partidário da concepção mecânica de Descartes e Huygens, adotando a visão atomista divulgada principalmente por Pierre Gassendi. No período 1664-66, estudou a mecânica de Descartes e assimilou o princípio de inércia e as leis do choque entre corpos. A noção de “força”, “a potência de uma causa”, era concebida como uma pressão de um corpo sobre outro, estando restrita a choques entre corpos. Desses autores, herdou a noção de que a força exercida por um corpo em outro, durante um choque, é igual à força recebida. Passou a estudar os movimentos circulares, imaginando uma bola que está presa em uma arena circular, e move chocando-se constantemente com as paredes da arena. Derivou uma expressão para a força “centrífuga”, que descreve o movimento de fuga em relação ao centro (e não uma atração), escrita modernamente como $F = mv^2/r$.

Alguns relatos fazem referência ao episódio em que Newton, em 1666, teria visto uma maçã cair em seu jardim, e então teve a ideia de que esta tendência à queda em direção à Terra se estenderia até a Lua (ver HERIVEL, 1965, pp. 65-69, e WESTFALL, 1980, p. 154). Independentemente da veracidade do relato da maçã, Newton de fato empreendeu um cálculo comparando a aceleração da “queda” da Lua em sua órbita circular (em relação à tangente, usando a lei de Galileu, $d = \frac{1}{2} at^2$) com a previsão fornecida por uma lei em que tal aceleração cai com o inverso do quadrado da distância ($1/r^2$). Com os dados disponíveis na época, encontrou uma discrepância de uns 15%, e deixou a questão de lado.¹¹²

Ao finalizar esses estudos, Newton abandonou a mecânica e foi trabalhar com matemática e com óptica. Em 1675, após realizar importantes pesquisas em óptica, esboçou uma visão de mundo que seguia Descartes em sua concepção de que a gravidade podia ser explicada a partir do movimento das partículas do éter, que ocupariam todo o espaço. No entanto, adotava um princípio de “sociabilidade” para explicar algumas reações químicas. Neste ano, ficou sabendo de uma correção para o valor de um grau de latitude, medida pelo astrônomo francês Jean Picard em 69,1 milhas inglesas, ao invés do valor de 60 milhas que Newton usara em seu cálculo da queda da Lua em 1666. Com essa correção, a lei da força gravitacional que ele havia explorado passou a explicar bem o movimento da Lua.

Em 1679, recebeu um convite de Robert Hooke (1635-1703) para reexaminar o problema dos movimentos planetários. Após algumas dificuldades iniciais, Hooke lhe sugeriu usar uma lei de *atração* com uma força proporcional a $1/r^2$. Deu alguns passos adiante, mas teve uma crise nervosa e acabou abandonando as pesquisas, recuperando-se ao longo de cinco

¹¹² HERIVEL, J. (1965), *The background to Newton's Principia*, Clarendon, Oxford. WESTFALL, R.S. (1980), *Never at rest: a biography of Isaac Newton*, Cambridge U. Press. Seguimos também o relato geral de WESTFALL (1971), op. cit. (nota 105), pp. 120-59, e DIJKSTERHUIS (1986), op. cit. (nota 108), pp. 463-91.

anos. Finalmente, em 1684, o astrônomo Edmund Halley visitou Newton, perguntando ao exímio matemático qual seria a trajetória de um corpo orbitando com uma força de atração proporcional a $1/r^2$, ao que Newton respondeu que seria uma elipse, conforme tinha calculado cinco anos antes para o problema de Hooke. As peças então se encaixaram, e Newton retomou seu trabalho em mecânica, recebendo estímulo e auxílio financeiro de Halley. Disso resultou a publicação da grandiosa obra *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Princípios naturais da filosofia natural, 1687), conhecido como “Principia”.¹¹³

Outra obra importante de Newton foi seu *Opticks* (1704). Nesta, estendeu sua concepção – de que existem forças que atuam à distância entre todos os corpos – para todas as partículas, inclusive átomos e partículas de luz. Tais forças poderiam ser de atração, o que explica a coesão dos corpos e a capilaridade, e também de repulsão, como na expansão dos gases. O magnetismo seria outro exemplo importante de forças atuando à distância. Reações químicas também poderiam ser explicadas por meio da atração e repulsão no nível microscópico. Ao final do séc. XVIII, essa concepção tornar-se-ia o paradigma dominante (especialmente para o grupo que trabalhava em torno de Laplace), no que às vezes é chamado a visão “astronômica” da natureza: partículas imponderáveis (sem peso) sujeitas a forças de atração e repulsão.¹¹⁴

2. Lei da aceleração no movimento circular

A lei da aceleração no movimento circular, escrita modernamente como $a = v^2/r$, foi enunciada em publicação pela primeira vez por Christiaan Huygens em sua obra *Horologium oscillatorium*, em 1673. A sua demonstração do resultado só viria a ser publicada postumamente em 1703, como *De vi centripeta*, tendo sido redigida em 1659 (YODER, 1988, pp. 19-26).¹¹⁵

Newton encontrou esta lei, de maneira independente, em torno de 1666, sendo enunciada em dois de seus manuscritos (Ms. III e IVa), transcritos em HERIVEL (1965). A lei de aceleração circular aparece no cálculo feito por Newton das forças centrífugas devidas à rotação (medida no equador) e à revolução da Terra, que ele constatou serem desprezíveis em face da força gravitacional (respectivamente 1:350 e 1:5000). Isso resolvia um problema levantado por Ptolomeu contra a possibilidade de a Terra se mover, segundo o qual os objetos na superfície da Terra seriam lançados para o espaço se esta se movesse (HERIVEL, p. 11).

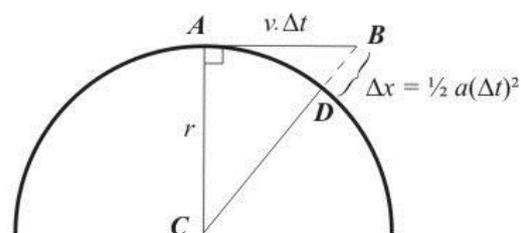


Figura XI.1: Aproximação parabólica: considerando que o desvio da tangente é devido à “queda” da Lua em direção da Terra, obtém-se a lei da aceleração circular usando o teorema de Pitágoras, $r^2 + (v \cdot \Delta t)^2 = (\frac{1}{2}a\Delta t + r)^2$, e tomando o limite em que D tende a A, desprezando-se o termo $(\Delta t)^4$, e obtém-se $a = v^2/r$.

¹¹³ Como “Principia” é um termo em latim, o “c” pode ser pronunciado como um “k” (latim clássico), como um “tchi” (latim italianizado), ou simplesmente com a pronúncia em português. NEWTON ([1687] 2008), *Principia*, op. cit. (nota 70). NEWTON, I. ([1704] 1996), *Óptica*, trad. André K.T. Assis, EDUSP, São Paulo.

¹¹⁴ FOX, R. (1974), “The rise and fall of Laplacian physics”, *Historical Studies in the Physical Sciences* 4: 89-136.

¹¹⁵ YODER, Joella G. (1988), *Unrolling time: Christiaan Huygens and the mathematization of nature*, Cambridge U. Press.

HERIVEL (pp. 11, 70) infere que a lei da aceleração circular foi obtida no Ms. III pela chamada “aproximação poligonal”, sem o uso explícito da lei de Galileo (esse tipo de demonstração aparece no *Principia* de 1687, no final do Escólio da Proposição IV, Teorema 4). No entanto, no Ms. IVa, a maneira como Newton derivou a lei da aceleração circular envolveu o uso da lei de Galileo para o movimento acelerado, $\Delta x = \frac{1}{2} a (\Delta t)^2$, e a chamada “aproximação parabólica” ou “desviacional”. Esta consiste em supor que o movimento circular da Lua, fugindo da tangente, é devido à “queda” da Lua com aceleração constante, como se fosse um projétil na superfície da Terra caindo em trajetória parabólica em um campo gravitacional constante (Fig. XI.1). Os detalhes da demonstração de Newton, fazendo uso de uma proposição de Euclides, estão em HERIVEL (1965, p. 192-98). Nesta derivação no Ms. IVa, Newton enunciou a lei da aceleração circular em termos do período $T = 2\pi r/v$ (o tempo de uma revolução), o que em notação moderna fica: $a = 4\pi^2 r/T^2$.

3. A Lei $1/r^2$ da Gravitação

Ao recordar o episódio da queda da maçã, por volta de 1714, Newton indicou que chegara à ideia da força $1/r^2$ a partir da junção da 3ª lei de Kepler com a lei da aceleração circular (HERIVEL, p. 67). Uma vez tendo chegado à lei da aceleração circular $a = 4\pi^2 r/T^2$, é plausível que ele tenha imediatamente pensado em comparar este resultado com $T^2/r^3 = \text{cte}$, a 3ª lei de Kepler, obtendo $a = (4\pi^2/\text{cte})/r^2$ para a aceleração da força gravitacional. Newton já tinha travado contato com a astronomia kepleriana a partir de 1664 (WESTFALL, 1980, p. 94). O próprio Newton mencionou que Huygens chegara à lei de atração gravitacional $1/r^2$ em 1673 (BALL, 1893, p. 71), provavelmente por este caminho, e Halley também o fez (DUGAS, 1957, p. 216).¹¹⁶

No entanto, este não é o único caminho para se chegar à lei de atração $1/r^2$. A hipótese de que a Terra atrai a Lua com uma força que cai com $1/r^2$ havia sido aventada por alguns autores, como Kepler, que a rejeitou, e pelo

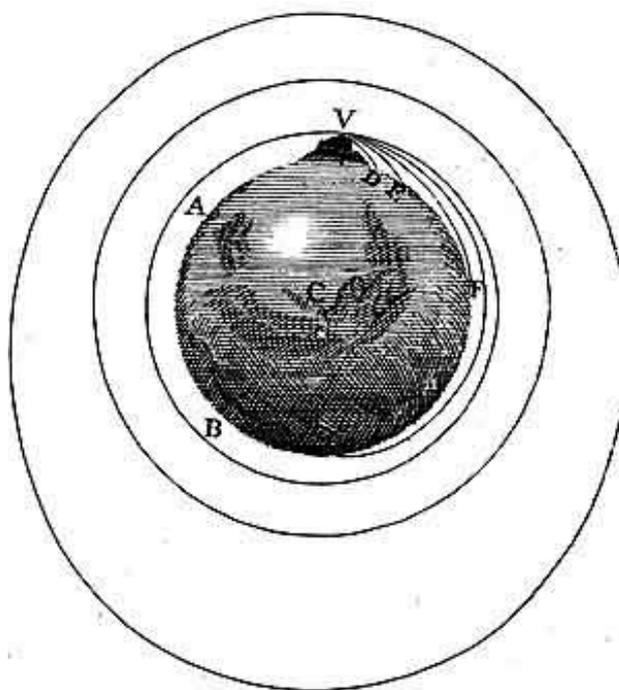


Figura XI.2: Canhão de Newton. Diferentes trajetórias da bala de um canhão em queda, disparado de uma montanha. À medida que a velocidade tangencial aumenta, a distância percorrida antes de atingir a Terra aumenta, até se atingir a órbita circular, que é também um regime de “queda livre”. Para velocidades tangenciais maiores, obtêm-se órbitas fechadas elípticas.¹¹⁷

¹¹⁶ BALL, W.W.R. (1893), *An essay on Newton's "Principia"*, Macmillan, London. DARRIGOL, O. (2012), *A history of optics: from Greek Antiquity to the nineteenth century*, Oxford U. Press. DUGAS, R. (1957), *A history of mechanics*, trad. J.R. Maddox. Routledge & Kegan-Paul, London (original em francês: 1955). WILSON, C.A. (1970), “From Kepler's laws, so-called, to universal gravitation: empirical factors”, *Archive for the History of Exact Sciences* 6: 89-170.

¹¹⁷ NEWTON, I. (2008), “O sistema do mundo” (rascunho do Livro III do *Principia*, publicado postumamente em 1728), op. cit. (nota 70), p. 338.

astrônomo francês Ismaël Boulliau (latinizado Bullialdus), em sua *Astronomia philolaica* (1645). Boulliau aceitava as leis de Kepler, mas criticava a afirmação deste de que a *virtus movens* do Sol variaria com o inverso da distância ($1/r$), achando mais plausível a lei $1/r^2$, por analogia com o caso da intensidade da luz, que sabidamente tinha este comportamento (ainda mais porque, em alguns momentos, Kepler associava o poder gravitacional do Sol à luz que emite). Newton fez menção a Boulliau posteriormente, mas provavelmente só o leu em torno de 1685 (cf. WILSON, 2002, p. 204). É curioso que Boulliau, aceitando a 3ª lei de Kepler (envolvendo o raio médio da órbita elíptica) e a lei de força gravitacional $1/r^2$, poderia ter chegado à lei da aceleração circular independentemente dos caminhos de Huygens e Newton, mas não o fez.

A lei $1/r^2$ para a intensidade *luminosa* fora proposta por Kepler em 1604, tendo sido testada experimentalmente (de maneira independente) pelo jesuíta belga François de Aguilón em 1613 (cf. DARRIGOL, 2012, p. 110). O próprio Newton usou esta lei de intensidade luminosa em 1675, mencionando inclusive a possível analogia com o caso gravitacional (cf. BALL, 1893, p. 71). Não foi só Boulliau que chegou à lei gravitacional $1/r^2$ a partir da analogia óptica, mas também Hooke (cf. DUGAS, 1957, p. 216).

Conforme mencionado na seção XI.1, o cálculo do teste da Lua não forneceu o resultado esperado e Newton deixou de lado a hipótese da força $1/r^2$, até ser instado em 1679 por Hooke a considerar esta possibilidade, em troca de cartas. Hooke trabalhava então com a hipótese de uma força centrípeta (apontando para o Sol, no caso dos planetas) que varia com $1/r^2$, mas considerava que a órbita elíptica de Kepler seria só uma aproximação a uma certa órbita “elípticoide” real. Além disso, Hooke via a atração gravitacional como uma lei universal:

Todos os corpos celestes sem exceção exercem uma atração ou poder de gravitação para seus próprios centros [...]; e conseqüentemente não só o Sol e a Lua têm uma influência no corpo e movimento da Terra, e a Terra sobre eles, mas também [os planetas] ♃, ♄, ♀, ♂, ♁, e ♃ têm, devido aos seus poderes atrativos, uma considerável influência sobre seu movimento [da Terra], da mesma maneira que o correspondente poder atrativo da Terra tem uma influência considerável sobre cada um dos seus movimentos também. (HOOKE, [1674] 1679, pp. 27-28)¹¹⁸

Em 1675, Newton exploraria a hipótese de que o comportamento do éter levaria à lei $1/r^2$ para o sistema solar; isso indica que ele ainda não tinha uma noção da gravitação *universal* (WILSON, 1970, pp. 135-6).

4. Definições e Leis no *Principia*

O Livro I do *Principia* não falou em gravitação, mas apresentou os princípios gerais da mecânica, com definições básicas e as suas três leis. Com estas leis e a noção de força centrípeta (força central), Newton derivou as três leis de Kepler. No Livro II, considerou sistemas com fluidos, e criticou a concepção cartesiana de vórtices para o sistema solar. No Livro III, aplicou sua teoria para a descrição detalhada do sistema solar, mostrando que a lei da gravitação é a mesma para as luas de Júpiter, para os planetas em torno do Sol e para um corpo caindo na superfície da Terra. Enunciou então a lei da gravitação universal.

¹¹⁸ HOOKE, R. (1679), “An attempt to prove the motion of the earth from observations”, in Hooke, R. *Lectioes Cutlerianae*, John Martyn, London, pp. 1-28 (original: 1674).

É interessante enfocarmos os conceitos fundamentais apresentados por Newton¹¹⁹, buscando entender se esses fundamentos são extraídos da observação ou formulados teoricamente.

Seguindo o método axiomático de Euclides, como era costume no séc. XVII, Newton parte de oito definições. A primeira é do conceito de *massa*, que chamava “quantidade de matéria”, e define como o produto da densidade e do volume. Tal definição passou a ser considerada problemática, já que ele não define o que seria “densidade”. Com o desenvolvimento do texto, certas propriedades de “massa” deixaram claro que ela se distingue da noção de “peso”, conceitos esses que antes de Newton não eram distinguidos claramente (salvo em Kepler).¹²⁰

A segunda definição é de “quantidade de movimento”, hoje em dia às vezes chamada de “momento linear”, que seria o produto da massa e da velocidade. As definições 3, 4 e 5 apresentam uma lista de três tipos de “força”. O que chama de “força inata da matéria” (*vis insita*) é o que chamamos de inércia, uma tendência do corpo de resistir à ação de forças externas, e de permanecer em seu “estado”, seja ele de repouso ou movimento retilíneo uniforme. A “força imprimida é uma ação exercida sobre um corpo para modificar seu estado”. É o nosso conceito atual de *força*, e é exemplificado pela percussão ou pela pressão (como era costume na filosofia mecânica) e também pela força centrípeta (o que era uma novidade). A força centrípeta, descrita na sexta definição, é aquela dirigida para um ponto, e exemplificada pela gravidade (atuando sobre projéteis e sobre a Lua), pelo magnetismo, pela força dos planetas (neste momento ainda não identificado com a gravidade) e pela força de uma funda (ou seja, a força elástica ou a tensão em uma corda).

Nas definições seguintes, caracteriza três tipos de “quantidades” de uma força centrípeta. A primeira é a “quantidade absoluta”, que no caso de uma força elétrica estaria relacionada com a *carga* de um corpo. Ele não apresenta este exemplo, mas sim o da força magnética, cuja “carga” estaria relacionada ao tamanho do ímã e à sua intensidade. No caso de uma força gravitacional, a quantidade absoluta seria a massa do corpo que gera a força (o que poderíamos chamar a “carga gravitacional”).

A “quantidade aceleradora” de uma força centrípeta seria simplesmente sua aceleração, a “velocidade que ela gera em um determinado tempo”. Na superfície da Terra, a quantidade aceleradora é igual para dois corpos, “retirando ou descontando a resistência do ar”. Já em montanhas elevadas, ela é menor.

Na definição 8, apresenta a “força motriz”, que equivale à nossa noção atual de força contínua (em oposição à força impulsiva, que é de curta duração), e é exemplificado pelo peso. O enunciado exprime claramente a noção de uma força contínua, que em um “determinado intervalo de tempo” gera um movimento, ou seja, gera uma variação na quantidade de movimento. Esta definição se aproxima bem da nossa concepção atual da expressão $F = ma$, ao contrário da 2ª lei expressa por Newton, como veremos a seguir.

Newton pôde assim afirmar (p. 282) que “a força de aceleração está para a força motriz assim como está a celeridade para o movimento”, ou seja, $a/F = v/p$, já que a quantidade de movimento é $p = mv$ e a força motriz é $F = ma$.

No escólio que se segue, diz que não irá definir tempo, espaço, lugar e movimento, pois esses conceitos “são bem conhecidos de todos”. Vimos na seção VII.3 sua definição de tempo absoluto, e exploraremos na seção XII.2 sua concepção de espaço absoluto.

¹¹⁹ Trechos relevantes de Newton se encontram na excelente coletânea de COHEN & WESTFALL (2002), op. cit. (nota 70), pp. 152-7, 278-91.

¹²⁰ Ver JAMMER, M. (2000), *Concepts of mass in classical and modern physics*, Princeton University Press. Versão em português em preparação pela Editora Contraponto.

Analogamente, haveria um “lugar” (volume) absoluto e um relativo, e também um movimento absoluto e um movimento relativo.

Mais adiante no Livro 1, Newton apresenta suas famosas três leis. A 1ª lei é o *princípio de inércia*, que afirma que um corpo permanece em seu estado de movimento uniforme (velocidade constante) “a menos que seja compelido a modificar esse estado por forças imprimidas sobre ele”.

A 2ª lei afirma que “a variação do movimento é proporcional à força motriz imprimida, e ocorre na direção da linha reta em que essa força é imprimida”. Por “movimento” entende-se a quantidade de movimento $p = mv$ (introduzimos o negrito para designar grandezas vetoriais). A interpretação mais natural para o leitor moderno é supor que Newton está afirmando que a força motriz é a derivada temporal do momento linear, ou seja, $F = d/dt(mv)$, que seria equivalente a $F = ma$.

Dijksterhuis (1986, pp. 470-4), porém, observa que a noção de força usada por Newton em seus cálculos é de uma força impulsiva I , como em um choque entre corpos, que resulta em uma variação finita de momento: $I = \Delta(mv)$. Para sustentar esta interpretação, o historiador holandês refere-se ao Corolário 1 que se segue às leis, cujo enunciado é o seguinte:

“Um corpo que sofre a ação de duas forças simultâneas descreve a diagonal de um paralelogramo no mesmo tempo em que descreveria os lados do paralelogramo por essas forças, separadamente” (ver Fig. XI.3).

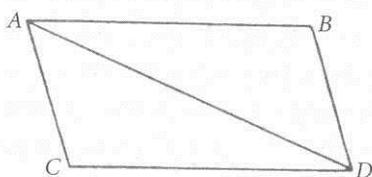


Figura XI.3: Paralelogramo descrevendo os movimentos resultantes de forças impulsivas exercidas em A.

Newton salienta que o movimento de A para B, etc., é uniforme, de forma que está claro, neste caso, que a força exercida em A é impulsiva. A 2ª lei garante que as duas forças agindo em A agem de maneira independente, resultando no movimento de A para D. Este é um bom exemplo de uma soma *linear* de causas.

É verdade que Newton parecia ter a noção de uma força que age de maneira contínua, como exprimiu em sua Definição 8 (e também em seu Corolário 2, que não mencionamos), mas a utilização da 2ª lei em seus cálculos envolve sempre uma força impulsiva. Quem consolidou a concepção moderna de $F = ma$, para forças de todos os tipos, foi Leonhard Euler (1707-83), em 1750¹²¹.

A 3ª lei de Newton é a *lei de ação e reação*: “para cada ação existe sempre uma reação igual e contrária”. Se um corpo A exerce uma força F_{AB} sobre um corpo B, então necessariamente haverá uma força $-F_{AB}$ sendo exercida em A.

O Corolário 3 mostra como o princípio de conservação da quantidade de movimento segue das 2ª e 3ª leis. O Corolário 4 mostra que o “centro de gravidade” de corpos interagentes permanece em seu estado de movimento inercial.

¹²¹ TRUESDELL, C. ([1960] 1968), “A program toward rediscovering the rational mechanics of the age of reason”, in *Essays in the history of mechanics*, Springer, Berlim, pp. 84-137. Ver pp. 112-7.

5. A Natureza da Força: Newton era realista?

Qual é a natureza da força gravitacional e das forças em geral? Haveria por trás da força gravitacional uma *vera causa*, um processo real que resulta nos movimentos observados? Ou seria o conceito de força apenas uma construção matemática obtida a partir dos movimentos observados?¹²² Newton oscilou entre essas duas concepções.

Em seu famoso “Escólio Geral”, escrito em 1713, na 2ª edição do *Principia*, Newton afirma (in COHEN & WESTFALL, 2002, pp. 154-5):

Até hoje, entretanto, não pude descobrir a causa dessas propriedades da gravidade dos fenômenos, e não invento hipóteses; pois o que quer que não seja deduzido dos fenômenos deve ser chamado de hipótese, e as hipóteses, sejam elas metafísicas ou físicas, de qualidades ocultas ou mecânicas, não têm lugar na filosofia experimental.

Para entender o que Newton quis dizer com isso, é preciso distinguir duas acepções do termo “hipótese”. (i) No sentido mais usual hoje em dia, uma hipótese é qualquer tese que conjecturamos sem que ela ainda tenha sido submetida a teste. (ii) No sentido usado por Newton, é uma conjectura a respeito da natureza não-observável que estaria por trás dos fenômenos observáveis.

Na verdade, antes de escrever o *Principia*, Newton trabalhou em uma teoria “mecanicista” da gravitação (ou seja, só com forças de contato, como em Descartes, ver seção X.6). Isso aparece em uma carta a Boyle em 1678, e reaparece na Questão 21 do *Opticks*. Tendo fracassado em sua tentativa, declarou então que “não invento hipóteses” (*hypotheses non fingo*), ou seja, que não há necessidade de estipular causas ou mecanismos ocultos, já que a expressão matemática da lei de atração universal é suficiente para que se explique o movimento dos corpos celestes.

Usando as definições do Caps. III, diríamos que esta atitude de Newton é antirrealista, ou fenomenista (em sentido amplo), ao se recusar a especular sobre as causas ocultas por trás do fenômenos da atração gravitacional. A tradição mecanicista de Descartes e Huygens era realista (assim como o atomismo grego), já que concebiam mecanismos envolvendo partículas invisíveis que dariam conta dos fenômenos macroscópicos observados. Newton foi formado nesta tradição (recebendo influências também do naturalismo animista, uma visão também realista), e assim ele tinha uma atitude basicamente realista. Um exemplo claro de uma tese realista é sua defesa do espaço absoluto, que veremos no próximo capítulo. Outro exemplo é sua tese de que a luz consiste de partículas emitidas com diferentes velocidades, cada cor correspondendo a uma velocidade (seção XVIII.2).

No entanto, ao anunciar que não se preocuparia em inventar hipóteses a respeito das causas da força gravitacional, adotou uma postura antirrealista. Dentre as posições antirrealistas delineadas no Cap. IV, ele parece se enquadrar melhor no *descriptivismo*, no sentido de se contentar em descrever o comportamento visível dos corpos gravitacionais por meio da lei da gravitação universal. Mas esta atitude parece ter se restringido apenas à questão da força gravitacional.

¹²² Essa maneira de apresentar a distinção é baseada na seguinte interessante bibliografia sobre os problemas filosóficos da mecânica clássica: HESSE, MARY (1964), “Resource letter PhM-1 on philosophical foundations of classical mechanics”, *American Journal of Physics* 32, 905-11.

6. Teorias hipotéticas e abstrativas

Mesmo que o “*hypotheses non fingo*” tenha sido uma atitude pontual por parte de Newton, ela teria bastante impacto em meados do séc. XIX, quando disseminou-se a concepção descritivista de que a Física não deve se preocupar com mecanismos ocultos, que basta conhecer o estado inicial e as condições de contorno observáveis, para daí fazer previsões utilizando as leis de movimento. No séc. XIX, o trabalho que lançaria esse projeto antirrealista seria a *Teoria analítica do calor* (1822), de Joseph Fourier, que descrevia situações de equilíbrio e condução térmica de maneira matemática, sem se comprometer com a natureza última do calor, com o debate de se o calor era uma forma de movimento de partículas ou uma substância consistindo de um fluido sem peso (“calórico”). Este trabalho foi uma das fontes de inspiração para o positivismo do séc. XIX, que se iniciou com o filósofo Auguste Comte (KOLAKOWSKI, porém, considera David Hume, filósofo do século anterior, como o primeiro positivista completo).

Apesar de sua atitude descritivista com relação às causas da força gravitacional, Newton considerava que as forças existiam de fato, ou seja, era um realista com relação à entidade “força”. No séc. XIX, Mach desenvolveria um positivismo radical no qual o próprio conceito de força seria visto como uma mera construção mental, um termo teórico (não observável) redutível a grandezas observáveis, como acelerações e massas (como veremos na seção XVI.2).

Com a ascensão do positivismo e da Termodinâmica em meados do séc. XIX, o engenheiro William Rankine (1855) traçou uma influente distinção entre dois tipos de teorias científicas.¹²³

(1) *Teorias hipotéticas* (transcendentes, microscópicas) enunciam relações entre entidades hipotéticas que não são observáveis, como os mecanismos ocultos da filosofia mecânica ou os átomos da teoria cinética dos gases.

(2) *Teorias abstrativas* (fenomenológicas, macroscópicas) formulam apenas relações entre propriedades observáveis, como foi feito por Fourier, em sua teoria do calor, e pela termodinâmica. A afirmação de Newton de que não inventaria hipóteses a respeito da natureza da lei da gravitação é própria de uma teoria abstrativa.

¹²³ RANKINE, W.J.M. ([1855] 1881), “Outlines of the science of energetics”, in *Miscellaneous scientific papers*, org. W.J. Millar. Charles Griffin & Co., London, pp. 209-28; discutido por NAGEL (1961), op. cit. (nota 32), Cap. 6. Uma tradução para o português será disponibilizado em nosso curso. KOLAKOWSKI (1981), op. cit. (nota 50).