

A Fundamentação Empírica das Leis Dinâmicas de Newton

(The empirical foundations of Newton's laws of dynamics)

Silvio Seno Chibeni

Departamento de Filosofia - IFCH - Unicamp

Cx. Postal 6110, 13081-970 - Campinas - SP - Brasil

chibeni@unicamp.br - http://www.unicamp.br/~chibeni

Recebido em 2 de Setembro, 1998

Embora hoje seja praticamente consensual que qualquer teoria física bem-sucedida apóia-se na experiência, ainda é comum entre cientistas a visão segundo a qual as leis que formam as teorias são passíveis de receber confirmação ou refutação empíricas individualmente. Essa tese foi duramente criticada por epistemólogos da ciência contemporâneos, com base em argumentos filosóficos diversos. Neste trabalho procura-se ilustrar a sua insustentabilidade por meio de uma análise conceitual das leis da mecânica newtoniana. Palavras-chaves: mecânica newtoniana, Newton, filosofia da física.

Nowadays, there is little doubt that any respectable physical theory possesses empirical foundations. It has also been widely believed, since the inception of modern science in the seventeenth century, that the laws forming the theories are capable of being individually confronted with experience. This latter thesis has been severely criticised by contemporary philosophers of science, but it is still popular among scientists and laymen. In this paper this view is shown to be untenable through a conceptual analysis of one of the most successful physical theories, Newtonian mechanics. Keywords: Newtonian mechanics, Newton, philosophy of physics.

I. Introdução

Ao longo de toda a história da filosofia, confrontaram-se duas principais doutrinas sobre a natureza do conhecimento do mundo físico: empirismo e racionalismo. De acordo com os filósofos empiristas, todo o nosso conhecimento acerca das entidades e processos materiais provém da experiência, ou nela se apóia. Para os filósofos racionalistas, por outro lado, seria possível conhecer pelo menos algumas das leis fundamentais que regem os fenômenos materiais sem apelo a observações. Com o surgimento da ciência moderna, a partir do século XVII, a posição racionalista foi perdendo terreno, não obstante haver sido defendida por figuras da importância de Descartes, Leibniz e Kant. Hoje é virtualmente ignorada tanto por cientistas como por filósofos da ciência.

Uma importante questão epistemológica que surge dentro do campo empirista é a que diz respeito à *forma* pela qual as teorias que sintetizam e ordenam nosso conhecimento do mundo ligam-se à experiência, à *base*

empírica, como dizem os filósofos. É ainda bastante comum a opinião de que cada um dos princípios ou leis que integram as teorias físicas é “descoberto” a partir dos fenômenos, por um processo de observação e generalização. Outra possibilidade é manter que as leis não são propriamente descobertas, mas “inventadas”, a título de hipóteses, devendo, no entanto, passar por um confronto com a experiência antes de serem admitidas no corpo teórico. Foge ao escopo deste artigo comparar essas duas posições, e comentar as fortes objeções que os filósofos da ciência levantaram contra a primeira delas. Queremos apenas salientar que têm algo comum: a suposição que o vínculo da experiência com a teoria se faz via suas leis consideradas *individualmente*. Sobre esta tese houve virtual consenso até nosso século, quando uma série de argumentos filosóficos evidenciaram que ela não pode sustentar-se. Uma das críticas mais influentes foi a lançada por Willard Quine em 1951 (ver Quine 1980).

Neste trabalho não procuraremos sequer esboçar os intrincados debates filosóficos sobre esse assunto. Nosso

objetivo é chegar à mesma conclusão a que chegaram os epistemólogos por uma rota diferente: o exame direto dos fundamentos empíricos de uma das mais bem-sucedidas teorias científicas de todos os tempos, a mecânica Newtoniana.

É interessante notar que o próprio Newton procurou separar cuidadosamente, na exposição de sua teoria, as “definições” e as “leis”, sustentando implícita ou explicitamente que estas últimas eram a expressão refinada e generalizada de fatos empíricos. No Escólio Geral do final dos *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, por exemplo, após a famosa recusa de propor hipóteses para explicar a força gravitacional, acrescenta que

na filosofia experimental [...] as proposições particulares são inferidas a partir dos fenômenos e depois generalizadas por indução. Assim foi que a impenetrabilidade, a mobilidade e a força impulsiva dos corpos, bem como as *leis de movimento* e de gravitação foram descobertas. (P. 547; grifamos.)

Ao longo de sua gloriosa trajetória nos dois séculos subsequentes, a mecânica newtoniana foi objeto de diversas extensões e reinterpretações que, se nunca chegaram a pôr em dúvida sua correção empírica global, muitas vezes envolveram o deslocamento das fronteiras traçadas por seu criador entre definição e experiência, entre convenção e fato. Propostas nesse sentido abundaram especialmente na segunda metade do século XIX, com Kirchhoff, Thomson, Tait, Hertz, Helmholtz, Poincaré, ao lado de algumas outras figuras de menor importância. No entanto, foi a profunda crítica elaborada por Ernst Mach a partir de 1868 a que maior repercussão teve em todo o desenvolvimento posterior da mecânica e, quase se poderia acrescentar, de toda a física e filosofia da ciência. O objetivo de Mach era o de conferir clareza conceitual e teórica à mecânica e, principalmente, livrá-la das noções “metafísicas” de espaço e tempo absolutos.

Todavia, mesmo significando uma redefinição radical das distinções newtonianas, a proposta de Mach não questiona o pressuposto epistemológico fundamental de que há, afinal de contas, uma demarcação mais ou menos nítida entre proposições empíricas e proposições convencionais ou formais. A formulação alternativa de Mach envolve explicitamente a separação das “proposições experimentais” das “definições”. Logo após a sua exposição, Mach comenta, a seu respeito:

[Nela os enunciados] são, além disso, óbvios e claros; pois

não pode subsistir dúvida, relativamente a cada um, quanto ao seu significado ou quanto à sua fonte; e sabemos sempre se expressa uma experiência ou uma convenção arbitrária. (Mach 1974, p. 304)

É a partir desse referencial epistemológico tradicional que empreenderemos a análise das leis de Newton, na tentativa de mostrar, pelos numerosos problemas que engendra, a necessidade de seu abandono. Tendo em vista o perfil da *Revista Brasileira de Ensino de Física*, detalhes mais complexos serão evitados; também nos absteremos de reexaminar à luz das teorias da relatividade alguns dos problemas aqui discutidos. Igualmente, as questões históricas, relevantes para uma análise mais completa, só serão mencionadas brevemente e na medida estrita da necessidade.

II. O pano de fundo histórico e conceitual

Nossa familiaridade com a mecânica clássica torna difícil apreender o caráter revolucionário dessa teoria, relativamente a toda a tradição científica anterior. Somente o estudo cuidadoso da história da ciência permite perceber que seu desenvolvimento, ao longo dos séculos XVI e XVII, envolveu a rejeição não apenas de algumas leis, mas também de alguns dos conceitos, métodos e valores mais fundamentais da ciência e mesmo da concepção geral de mundo. Não há espaço aqui para fornecer sequer uma sinopse dessas transformações. No entanto, alguns pontos centrais devem ser lembrados, para melhor compreensão da análise fundacional das seções seguintes.

De forma muito simplificada, pode-se dizer que a implantação da nova mecânica deu-se sobre um pano de fundo cosmológico que remonta à Antigüidade Grega. Essa cosmologia foi consolidada por Aristóteles (384-322 a.C.). Segundo ele, o Universo é finito, esférico e cheio; não há vazio. A Terra ocupa o centro; os corpos celestes giram em esferas concêntricas, a primeira sendo a da Lua. Essa esfera divide o Universo em duas regiões completamente distintas. A região “supralunar” compõe-se de éter, uma substância imponderável cujo movimento natural é circular e eterno. No mundo “sublunar” tudo é formado de quatro elementos: terra, água, ar e fogo. Para esses elementos os movimentos naturais são sempre radiais, relativamente ao centro do Universo. Para os nossos propósitos, é importante observar que todo “movimento natural” se dá sem o concurso de forças. Forças são requeridas apenas para a produção dos demais movimentos, ditos “violentos” ou “forçados”, como o de uma flecha ou o de uma carroça.

Toda força se exerce por contato. No mundo sublunar, o repouso é o estado natural dos corpos; o movimento é sempre um processo, que visa a conduzir o corpo ao seu “lugar natural”.

Aristóteles desenvolveu uma física bastante complexa em torno dessas noções e princípios. Do ponto de vista intuitivo, era muito plausível, fato que explica em parte sua longa aceitação e o grande esforço intelectual exigido para sua substituição.

A física aristotélica era deliberadamente qualitativa. No século XIV, foram feitas em Oxford e Paris algumas tentativas relevantes, porém muito modestas relativamente ao que ainda estava por vir, de matematizar o estudo do movimento.

Porém a contribuição mais importante da Idade Média na direção de uma nova mecânica foi a chamada “teoria do *impetus*”. A grande dificuldade dos Antigos era explicar por que os corpos continuam seus movimentos violentos por algum tempo após o contato com o agente motor haver cessado. Alguns teóricos medievais, entre os quais se destacam Philoponos (séc. VI) e Jean Buridan (séc. XIV), propuseram então que, ao mover-se, os corpos adquirem uma “força interna”, o *impetus*, que os empurra quando o motor deixa de agir, gastando-se no entanto ao longo do movimento, até que o corpo pára. Uma primeira cunha introduzia-se, assim, no sistema aristotélico, com a violação do princípio da externalidade das causas do movimento violento.

Voltando à astronomia, convém lembrar que uma importante teoria astronômica quantitativa (geométrica) foi desenvolvida por Ptolomeu, no século II d.C. Ela preservava as características básicas da cosmologia aristotélica, entre as quais se destaca o geocentrismo. Em que pese a tentativa malsucedida de Aristarco de Samos (séc. III a.C.), foi somente a partir do século XVI que o geocentrismo começaria a ser questionado, com base no sistema astronômico heliocêntrico de Copérnico (1473-1543). A grande relutância à aceitação desse sistema deve-se principalmente à incompatibilidade completa da hipótese do movimento da Terra com a física de Aristóteles. Segundo ela, se a Terra de fato se movesse, ocorreriam os seguintes efeitos: 1. Corpos largados de torres cairiam a oeste da vertical; 2. Fortes ventos se produziriam de leste para oeste; 3. os corpos não ligados à terra seriam lançados ao ar; 4. A Lua seria deixada para trás pelo movimento anual da Terra;

5. Paralaxe estelar seria observada. Ora, como estas e outras conseqüências evidentemente não se verificam, estava claro que a Terra não se movia.

De forma *prima facie* implausível, o curso histórico acabou favorecendo Copérnico, com a necessária substituição da milenar física aristotélica. Esse processo heróico deveu-se à obstinação de alguns homens de gênio dos séculos XVI e XVII, entre os quais se destaca Galileo Galilei (1564-1642). Bruno (1548-1600), Kepler (1571-1630), Descartes (1596-1650) e Huygens (1629- 1695) devem também ser mencionados. Quando Newton (1642-1727) entrou em cena, o terreno achava-se já bem aplainado.¹

III. A primeira lei

Vejam inicialmente o texto dos *Principia* em que Newton enuncia sua primeira lei dinâmica, o chamado *princípio de inércia*:

LEI I: Todo corpo continua em seu estado de repouso, ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que seja obrigado a mudar esse estado por forças impressas sobre ele.

Dos pontos de vista histórico e conceitual, tal princípio tem uma importância fundamental, pois reclassifica os fenômenos de movimento, incluindo o movimento uniforme ao longo de uma linha reta na categoria de *estado*. Esse tipo de movimento deixa de requerer uma explicação causal, dando-se sem o concurso de forças. Isso contraria a tradição científica medieval e aristotélica, constituindo a característica conceitual mais inovadora da mecânica clássica.

O princípio de inércia já havia sido proposto, no que tem de essencial, tanto por Galileo como por Descartes. As fundamentações que cada um forneceu para o princípio opõem-se frontalmente uma à outra. Galileo alegava que ele era o resultado de certos experimentos, embora os historiadores reconheçam hoje que muitos desses experimentos eram apenas “de pensamento”. Em sua abordagem racionalista, por outro lado, Descartes deduziu a lei de inércia a partir de pressupostos metafísicos, particularmente a imutabilidade de Deus. Quanto a Newton, não apontou experimentos que pessoalmente tivesse feito para descobrir ou confirmar a lei

¹Para uma exposição histórica muito didática de alguns traços das teorias astronômicas e físicas anteriores a Newton, ver Lucie 1977. Dentre as inúmeras obras de historiadores da ciência sobre esse assunto, consultem-se, por exemplo, Kuhn 1957 e Cohen 1980; em português, é útil ler Cohen 1967 e Évora 1988. Uma boa introdução histórica à filosofia da ciência encontra-se em Losee 1980. Para os desdobramentos referentes às teorias da relatividade, ver Ghins 1991; e para uma crítica original dessas teorias, Assis 1998.

de inércia, porém como se vê no trecho citado na Introdução, considerava-a, junto com as outras duas leis, como havendo sido “inferida a partir dos fenômenos”.

Para começar a análise crítica dessa alegação, notemos que a lei de inércia contém essencialmente duas afirmações distintas: i) Se a força que age em um corpo é nula então ele seguirá em movimento retilíneo e uniforme (MRU); e ii) Se um corpo está em MRU então a força que sobre ele atua é nula. Para facilitar a visualização de nossos argumentos, representemos essas afirmações esquematicamente por

i) $F=0 \rightarrow \text{MRU}$

ii) $\text{MRU} \rightarrow F=0$.

(Naturalmente *não* se trata aqui de implicações lógicas, mas físicas: a condição $F=0$ acarreta fisicamente o estado de MRU; e tal estado indica, por motivos físicos, que $F=0$.)

Assim, para fornecermos confirmação empírica para a lei de inércia precisamos encontrar situações físicas nas quais a ocorrência de uma condição leve à ocorrência da outra. Precisamos pois de critérios empíricos para determinar se forças atuam em um corpo e para determinar se ele está em MRU.

Para que a lei de inércia possa expressar um fato sobre o mundo é obviamente indispensável que tais critérios independam da própria lei, ou seja, se dispusermos de um critério para $F=0$, não poderemos adotar como critério para MRU o fato de a força ser nula; e se tivermos um critério para MRU, nosso critério para $F=0$ não pode ser o fato de o corpo estar em MRU. Em ambos os casos a validade da lei de inércia seria *assumida*, e a lei teria um caráter puramente convencional.

Essas duas maneiras de entender a primeira lei de Newton têm sido defendidas por cientistas e filósofos da física. Muitos *definem* MRU como o movimento de corpos que não estão sujeitos à ação de forças; e outros *estipulam* como critério para a ausência de forças o fato de o corpo estar em MRU. Tais posições são legítimas; mas se adotadas deve-se estar preparado para reconhecer o caráter não-empírico da lei (que nesse caso nem deveria ser chamada ‘lei’).

Procuraremos evitar tal interpretação, pelo menos por enquanto, para tentar ver se o princípio de inércia pode de fato ser entendido como uma lei empírica. Precisaremos então encontrar critérios para reconhecer *empiricamente* a existência de forças e o movimento retilíneo uniforme. Na próxima seção exporemos com alguma extensão as dificuldades que envolvem os critérios

para a existência de forças; agora vejamos brevemente algo sobre aquelas relativas aos critérios para o reconhecimento empírico do MRU. Tais critérios envolvem as noções de:

a) *Movimento*. Aqui surge a questão do sistema de referência, ou *referencial*, em relação ao qual se estuda o movimento. Evidentemente essa é uma questão fundamental. Posição, velocidade e aceleração - os conceitos cinemáticos básicos da teoria - são sempre relativos a um certo referencial. Também está claro que nem todo sistema de referência será apropriado: se um corpo está em MRU em um referencial S, não estará em outro referencial S' acelerado em relação a S. Assim, o 1º Axioma nunca poderá valer em *ambos* S e S'.

Que referencial, ou classe de referenciais, devemos então adotar? Podemos ser imediatamente tentados a responder, como muitos fazem: “Aqueles nos quais a primeira lei de Newton é válida” (os referenciais ditos “inerciais”). Se porém for essa a resposta, tornaremos essa lei verdadeira, mas por convenção, e portanto destituída de qualquer conteúdo empírico.

Como é bem conhecido, Newton defendeu a existência do “espaço absoluto” (*Principia*, escólio das Definições), e assumia que era com relação a esse “espaço” que suas leis do movimento deviam ser aplicadas. Os argumentos apresentados por Newton a esse respeito suscitaram uma das maiores discussões nos fundamentos da física, que em um certo sentido perdura até hoje. Ficaram famosas, por exemplo, as objeções de Leibniz, ao tempo de Newton, e mais recentemente as críticas de Mach. Voltaremos a esse ponto na penúltima seção. Por ora, notemos apenas que o espaço absoluto não parece ser acessível à observação, o que nos deixa sem um critério efetivo de reconhecimento de MRU.

b) *Retilinearidade*. Deparamos aqui com a também complexa questão da definição de *linha reta*, que envolve a escolha da geometria empregada. Para salvar o caráter empírico da lei de inércia, teríamos que dispor de critérios para reconhecer empiricamente uma linha reta que independam dessa mesma lei. Newton acreditava que a geometria euclidiana descrevia o mundo real (idealizadamente), e assim o presente problema não o afligia, pois essa ciência independente é que definiria o que é uma linha reta. Com o advento das geometrias não-euclidianas no século XIX, surgiram dúvidas sobre o estatuto epistemológico das proposições geométricas, e tais dúvidas persistem até nossos dias. Qual dessas geometrias devemos tomar para caracterizar as linhas retas? Notemos ainda que aqui também

se encontra a opinião de que por *linha reta* devemos entender a trajetória de corpos livres da ação de forças. Mais uma vez, isso faz valer a lei de inércia opor decreto, retirando-lhe o eventual caráter empírico.

c) *Uniformidade*. A determinação da uniformidade de um movimento envolve problemas relativos às medidas de espaço e de tempo. Como determinar a igualdade de dois segmentos espaciais? O recurso a corpos rígidos (o metro-padrão de Sèvres, talvez) levanta as questões de se saber o que é um corpo rígido, qual o seu comportamento quando transportado, etc. O uso de sinais (a luz, por exemplo) suscita questões ainda mais desanimadoras: como podemos justificar a assunção de que um sinal se propaga com velocidade constante?

Além disso, como determinar a igualdade de dois intervalos de tempo? Newton defendia a existência do “tempo absoluto”. No entanto, do mesmo modo que o espaço absoluto, ou talvez mais ainda, tal tempo é inacessível empiricamente (o que o próprio Newton reconheceu). Assim, temos que escolher um certo movimento periódico para medir o tempo, ou seja, um relógio. Como podemos justificar essa escolha? Como escolher entre um pêndulo e um relógio d’água, por exemplo?

Como sempre, há aqui saídas que acarretam a vacuidade empírica da lei de inércia. De fato, tem-se defendido que dois segmentos espaciais são iguais se forem percorridos no mesmo tempo por um corpo livre da ação de forças; e também que dois intervalos temporais são iguais se no seu transcurso um corpo livre da ação de forças percorre distâncias iguais!

Embora sucinta e simplificada, essa discussão basta para mostrar que não é fácil caracterizar o movimento retilíneo e uniforme independentemente da lei de inércia. Descorçoçados por essa situação, passemos aos critérios para a existência de forças, *assumindo*, para não encerrarmos laconicamente toda a análise, que dispomos de um critério para determinar se um corpo está em MRU.

IV. A questão da existência de forças

A noção de força tem origem intuitiva na sensação de esforço muscular. Parece bastante claro que para uma fundamentação rigorosa da mecânica essa noção antropomórfica de força não pode ser utilizada. Precisamos de critérios *objetivos* para afirmar que os corpos estão de fato sob a ação de forças. Os cientistas que desenvolveram a nova física procuraram objetivar as forças por meio de efeitos mensuráveis, em geral a

deformação de certos corpos, como molas, por exemplo. Algumas das dificuldades desta proposta serão analisadas logo mais. Vejamos antes que já com aquela noção intuitiva de força surgem problemas para justificar a lei de inércia.

Começemos pela implicação $\text{MRU} \rightarrow F=0$, isto é, pela afirmação de que se um corpo está em MRU então sobre ele não agem forças. Tomando, para facilitar, a implicação equivalente, obtida por contraposição lógica, ou seja, $\neg F=0 \rightarrow \neg \text{MRU}$ (o ‘ \neg ’ é símbolo da negação), vemos que aparentemente há muitas situações ordinárias que à primeira vista confirmam essa implicação: situações nas quais percebemos, de um modo intuitivo, que *agem* forças, verificamos que o corpo *não* está em MRU. Mas há também outras em que a implicação parece falsa. Quando sustentamos uma pedra em nossas mãos, por exemplo, percebemos que estamos aplicando uma força sobre ela e no entanto vemos que permanece em repouso (caso particular de MRU).

Alguém poderia replicar: “A força \mathbf{F} que a mão aplica na pedra é compensada por uma força para baixo - a força gravitacional -, que a Terra exerce sobre ela”. Mas como sabemos que tal força existe? Se dissermos que é porque caso contrário a pedra aceleraria para cima, caímos em um círculo: Essa afirmação *pressupõe* exatamente a parte a lei de inércia que está em questão ($\text{MRU} \rightarrow F=0$).

Outra tentativa poderia ser apelar para a lei de ação e reação (3ª Lei de Newton). Mas isso suscita a questão de saber se essa lei tem fundamentação empírica. Além disso, ainda que tenha, não poderia de nenhum modo auxiliar aqui. A reação de \mathbf{F} é uma força do corpo sobre seu suporte (mão, mesa, corda, etc.), e essa força obviamente *não* é a força gravitacional procurada.

A implicação $F=0 \rightarrow \text{MRU}$ parece apresentar problemas semelhantes. Tomemos a experiência da pedra que gira numa funda, discutida por René Descartes nos *Principes de la Philosophie* (parte II, §39). Inicialmente, aceitemos, como usualmente se faz quando se discute essa experiência, que, quando largada, a pedra sai em linha reta tangencialmente à sua trajetória circular, e com a mesma velocidade escalar. A argumentação usual é, então: “Quando a pedra deixa a funda, sobre ela não atuam forças, e assim prosseguirá em MRU, como de fato se observa.”

Ora, com base em que se pode afirmar que sobre a pedra solta não atuam forças? Lembremos, por exemplo, que para os defensores da teoria do *impetus* agiria,

neste caso, uma força “interna”, responsável pela continuação do movimento da pedra. Como podemos negar essa possibilidade? Que fatos *empíricos* nos mostram que essa força interna não existe?

Pior ainda: se possuíssemos evidência nesse sentido, o experimento representaria a *refutação* empírica da parte da lei de inércia em análise! Isso porque a pedra de fato não sai da funda em MRU: descreve uma trajetória curva, aproximadamente parabólica. Imediatamente somos tentados a replicar: “Mas isto se deve à força de gravidade”. Porém semelhante escapatória não funciona, pois caímos de novo no problema discutido acima. Além disso, ir por aí implica reconhecer a irrelevância do argumento. O que estamos procurando é suporte para a implicação $F=0 \rightarrow \text{MRU}$, enquanto que essa suposta réplica aponta para o fato de que $\neg F=0 \rightarrow \neg \text{MRU}$. Evidentemente, esta última implicação não acarreta a primeira, ou seja, não podemos argumentar a favor daquela por meio desta. O que queremos aqui é uma indicação positiva de que na *ausência* de forças o movimento é retilíneo uniforme.

Poderíamos talvez, como às vezes se sugere, imaginar o experimento em um local distante de quaisquer outros corpos, como presumivelmente é o caso do espaço intergaláctico, onde comumente se alega que não agem forças. Mas como comprovar isso independentemente da lei de inércia? E ainda mais: o que nos garante que lá o corpo estará em MRU?

Essa discussão, de caráter ilustrativo, mostra que precisamos tentar um caminho diferente. É o que Brian Ellis procura fazer em interessante artigo de 1965. Ellis ensaia ali a elaboração de um critério *geral* para a existência de forças. Em termos esquemáticos, propõe que estas quatro asserções são equivalentes:

- (1) O objeto está sob a ação de forças;
- (2) (i) Persiste em um estado que consideramos não-natural; ou
(ii) está mudando de um modo que consideramos não-natural;
- (3) Esse comportamento requer uma explicação causal;
- (4) Sentimos que esse comportamento não é suficientemente explicado por uma lei de sucessão.

Ellis define uma lei de sucessão como “uma lei que nos capacita predizer os estados futuros de um sistema qualquer [...] simplesmente a partir do conhecimento de seu estado presente, assumindo-se que as condições sob as quais ele existe não se alteram” (p. 45). Procura mostrar, por meio de exemplos tirados da história da física, que o critério proposto produz os resultados

requeridos. No entanto, o critério enfrenta duas dificuldades sérias.

A primeira, que Ellis não nota, é que o critério falha em situações físicas importantes: o movimento de queda livre de uma pedra requer, na física aristotélica, uma explicação causal (de ordem teleológica: a pedra cai *porque* procura seu lugar natural, no centro do Universo); no entanto representa uma mudança completamente natural, sem o concurso de forças, segundo Aristóteles; assim, a implicação (3) \rightarrow (2) é falsa, nesse caso. Já na mecânica newtoniana essa mesma queda livre também requer uma explicação causal (força gravitacional), perfeitamente bem explicada pela subsunção a uma lei de sucessão (a lei galileana de queda livre); agora é a implicação (3) \rightarrow (4) que é falsa.

A outra dificuldade, apontada pelo próprio Ellis, é que o critério proposto *não é objetivo*: depende do que *achamos* natural, bem explicado, assim como de nossa noção de lei de sucessão.

Ellis tenta ainda buscar um critério objetivo para a existência de forças independente da lei de inércia pela exploração da correlação que existe entre *stress* e forma natural. Nas linhas do critério geral exposto acima, um corpo estará sob *stress* se e somente se estiver em uma forma não-natural. Ellis propõe que a forma de um corpo será *natural* se e somente se as seguintes condições forem satisfeitas:

- (a) A forma é estável (i.e., não varia com o tempo);
- (b) A forma é independente da orientação; e
- (c) As mudanças de forma sofridas por causa de uma rotação positiva ou negativa em torno de um eixo qualquer são as mesmas.

Ellis sugere que se adote como critério para a ação de forças sobre um corpo que ele esteja sob *stress*; e isso poderia ser verificado pelo exame da forma do corpo. Ellis ilustra a aplicação desse critério em algumas situações físicas. Porém também aqui encontramos dificuldades insuperáveis, não notadas por Ellis.

Primeiro, o critério é aplicável apenas a corpos sólidos e macroscópicos, acerca dos quais se possa falar em forma e deformação. Depois, não parece fornecer o resultado desejado em todos os casos. Uma mola comprimida dentro de uma nave espacial sem motor no espaço intergaláctico, por exemplo, estaria sob *stress* e em MRU, segundo acreditamos.

Finalmente, Ellis elabora um elegante e original argumento *contra qualquer* tentativa de estabelecer o caráter empírico isolado da lei de inércia. Constrói um sistema de dinâmica empiricamente equivalente ao new-

toniano, ou seja, que reproduz exatamente todas as suas previsões experimentais, e que no entanto tem uma lei de inércia diferente, *incompatível* com a lei newtoniana. Isso mostra que esta lei não é empírica quando considerada isoladamente, pois caso contrário o sistema de Ellis daria previsões erradas.

A idéia de Ellis foi a de “embutir” a gravitação na lei de “inércia”, do seguinte modo:

- 1^a Lei: Todo corpo tem um componente de aceleração relativa na direção de todo outro corpo do Universo diretamente proporcional à soma de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa, *a menos que ele esteja sob a ação de uma força*;
- 2^a Lei: $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ (onde \mathbf{a} é a aceleração relativa à aceleração natural: $\mathbf{a} = \mathbf{a}_{\text{absoluta}} - \mathbf{a}_{\text{natural}}$);
- 3^a Lei: $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$.

A coerência e a adequação empírica do sistema de Ellis, bem como nossas tentativas preliminares fracassadas, mostram que aparentemente não é possível manter que a lei de inércia possui conteúdo empírico *quando tomada isoladamente*.

V. A segunda lei

Newton enuncia a Segunda Lei nos seguintes termos

LEI II: A mudança de movimento é proporcional à força motiva impressa; e se dá na direção da linha reta na qual essa força é impressa.

Como observou Ellis, esse enunciado original difere significativamente daquele com o qual estamos familiarizados ($\mathbf{F} = m\mathbf{a}$). Primeiro, o enunciado de Newton é uma relação de proporcionalidade, e não de igualdade. Depois, e mais importante, a força é proporcional não à *taxa* de variação (da quantidade) de movimento, mas à própria variação (da quantidade) de movimento. Isso implica que o conceito de força envolvido não corresponde ao nosso conceito de força, mas ao de *impulso*. Ellis analisou as implicações de tais fatos admiravelmente. Não prosseguiremos esse assunto aqui, notando apenas que a diferença dos enunciados não será importante para a nossa análise.

Qual seria o estatuto epistemológico do 2^o Axioma de Newton? Tudo indica que Newton o interpretava mesmo como um fato experimental. Ele define *força (impressa)* como “uma ação exercida sobre um corpo

para mudar o seu estado, seja de repouso, seja de movimento uniforme ao longo de uma linha reta”. Essa definição torna claro que para Newton forças são *causas* de variação de movimento. Assim, o papel do 2^o Axioma seria o de *quantificar* essa relação de causa e efeito. Dado o princípio metafísico, amplamente aceito na época, de que a causa é proporcional ao efeito, segue-se imediatamente o 2^o Axioma proposto por Newton.

Se, todavia, tivermos que considerar convencional a própria existência de forças, o 2^o Axioma não poderá estritamente expressar um fato empírico. Se escolhermos um diferente movimento como sendo o movimento natural, a lei de inércia mudará, e *conseqüentemente também o conceito de força*.

No sistema de Ellis, por exemplo, há acelerações produzidas por forças (a de um corpo que oscila horizontalmente, movido por uma mola, por exemplo) e acelerações “naturais”, que não são causadas por nenhuma força (as acelerações que normalmente classificaríamos de gravitacionais). É importante notar que nessa afirmação estamos tomando o conceito newtoniano de aceleração. *Com essa escolha, é evidente que o 2^o Axioma não pode ser mantido*: nem sempre o produto da massa pela aceleração newtoniana será igual à força que age no corpo.

Para escaparmos a essa conseqüência, temos que fazer o que Ellis fez: adotar outro conceito de aceleração na expressão de seu “2^o Axioma”: a aceleração relativizada ao novo movimento natural. Neste caso o 2^o Axioma poderá ser preservado em sua forma original.

É fundamental observar que tanto em um caso como no outro a falseação ou a preservação do 2^o Axioma resultaram de decisões sobre o significado dos termos, e não de um confronto com a experiência. De fato, Kirchhoff, Mach e Boltzmann, entre outros, propuseram que a segunda “lei” fosse interpretada como a *definição* de força. Essa proposta tornou-se amplamente aceita por investigadores dos fundamentos da mecânica clássica, mas veremos na próxima seção que não está livre de problemas.²

VI. A terceira lei e o conceito de massa

O uso do 2^o Axioma como uma definição de força pressupõe que se disponha de uma definição de *massa* independente desse axioma. Se definirmos massa como a razão da força pela aceleração, como às vezes se faz,

²Além disso, Mach mantinha que a segunda lei torna a primeira redundante. Do ponto de vista moderno e estritamente lógico Mach tem razão. No entanto, como vimos, Newton tinha motivos para enunciar a lei de inércia isoladamente, pois isto colocava em evidência o aspecto conceitual mais importante de sua teoria.

obviamente não poderemos usar o 2^o Axioma para definir força. E uma definição independente de força aparentemente não é possível, pelo que vimos anteriormente.

A definição de massa dada por Newton (*Principia*, Definição I) também não ajuda, já que ele a define como o produto da densidade pelo volume, sem indicar como se define densidade de modo independente.

Também não podemos recorrer ao 1^o Axioma, pois não se refere a massa. Resta o 3^o Axioma. O enunciado de Newton é o seguinte:

LEI III: A cada ação opõe-se sempre uma reação igual; ou as ações mútuas de dois corpos são sempre iguais e dirigidas a partes contrárias.

Os exemplos dados por Newton logo depois do enunciado esclarecem que o princípio deve ser entendido como uma relação entre *forças*, sendo hoje usualmente representado assim:

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}.$$

Como havíamos *decidido* definir força como o produto da massa pela aceleração, vem então que o 3^o Axioma implica

$$m_A \mathbf{a}_{AB} = -m_B \mathbf{a}_{BA}. \quad (*)$$

Tal equação forneceria um meio de definirmos ao menos a *razão* entre as massas dos corpos A e B:

$$m_A/m_B = -a_{BA}/a_{AB}.$$

Mas que motivos temos para aceitar o 3^o Axioma? Não possuindo ainda uma definição de força, não podemos tomá-lo como um resultado da experiência. Não nos resta senão considerá-lo mais uma convenção: massas são coeficientes numéricos tais que a equação (*) seja satisfeita.

Concluiríamos, então, que os *três* importantes axiomas da mecânica newtoniana são meras convenções! Com sua famosa reconstrução da mecânica newtoniana, Mach acreditou haver oferecido uma saída para essa conclusão paradoxal, propondo a seguinte partição entre fatos empíricos e convenções (Mach 1974, p. 303-4):

- a. *Proposição Experimental*. Corpos colocados em confronto um com o outro induzem-se mutuamente, sob

certas condições a serem especificadas pela física experimental, acelerações contrárias na direção de sua linha de junção. (O princípio de inércia está incluído nisso.)

- b. *Definição*. A razão de massa de dois corpos quaisquer é a razão inversa negativa das acelerações que mutuamente se induzem.
- c. *Proposição Experimental*. As razões de massa dos corpos são independentes do caráter dos estados físicos (dos corpos) que condicionam as acelerações mútuas produzidas, sejam eles estados elétricos, magnéticos, ou o que seja; e além disso permanecem as mesmas quer sejam obtidas de modo direto, quer de modo indireto.
- d. *Proposição Experimental*. As acelerações que um número qualquer de corpos A, B, C, ... induzem em um corpo K são independentes umas das outras. (O princípio do paralelogramo de forças segue imediatamente disso.)
- e. *Definição*. Força motriz é o produto do valor de massa de um corpo pela aceleração nele induzida.

Comentando, a partir dessa proposta de Mach, a conclusão paradoxal que apontamos, Ernest Nagel tece as seguintes considerações (1961, p. 193):

Embora de fato exista um componente definicional nesse [terceiro] axioma, não é esse componente que lhe é central. É certamente possível [...] introduzir dois números m_A e m_B tais que para um dado conjunto [*set*; termo correto aqui deveria *ser par*] de acelerações mútuas dos dois corpos a equação $m_A \mathbf{a}_{AB} = -m_B \mathbf{a}_{BA}$ seja satisfeita, e chamar esses números as ‘massas’ dos dois corpos. Mas como podemos estar certos que eles serão sempre *positivos*; ou que a razão entre eles é uma constante, quaisquer que sejam as posições relativas e velocidades relativas dos corpos; ou que os coeficientes de massa assim definidos são independentes de todas as propriedades especiais dos corpos (tais como suas características químicas, térmicas ou magnéticas); ou que as massas são aditivas; ou que as massas atribuídas dessa maneira a dois corpos A e B são consistentes com as massas assim atribuídas ao par de corpos A e C e ao par de corpos B e C? A resposta imediatamente óbvia é que não podemos ter certeza sobre nenhuma dessas coisas se o termo ‘massa’ for definido da maneira proposta. Destarte, a definição de ‘massa’ proposta não atribui um significado à palavra tal como na realidade se atribui a ela em mecânica; e o terceiro axioma não é simplesmente uma convenção para defini-la.

Apesar de sua atração, por aparentemente isolar, como indica Nagel, o único candidato plausível para o núcleo empírico do sistema dinâmico newtoniano, a proposta de Mach está sujeita a uma série de objeções.

Primeiro, na “Proposição Experimental (a)” existe a cláusula vaga que diz que os corpos induzem-se acelerações mútuas com mesma direção e sentidos opostos “sob *certas* circunstâncias a serem especificadas pela física experimental”. Ora, se essas condições são deixadas em aberto, a proposição não pode a rigor ser tida como genuinamente empírica, pois não será confrontável com a experiência. Para testá-la empiricamente, o físico experimental teria que ir tentando em diferentes “circunstâncias”; se ele nunca achar a circunstância apropriada, não poderá concluir que a proposição é falsa, já que as circunstâncias possíveis concebivelmente são em número infinito.

Depois, se tomarmos, como é usual, as referidas “circunstâncias” como sendo a “*isolação*” dos corpos, teremos que especificar quando isso se obtém. Será removendo os corpos a grande distância de outros corpos? Mas como saberemos que nesse caso não atuarão forças? Outra resposta que às vezes se encontra é: “A *isolação* ocorre quando as acelerações de A e B são tais que têm a mesma direção e sentidos opostos”. Mas isso despoja a proposição de Mach de seu conteúdo empírico, já que a faz valer “por decreto”.

Uma possibilidade aparentemente mais promissora seria *generalizar* o método de Mach, de modo a poder-se dar conta dos casos reais, onde há mais de dois corpos. Ellis tenta a extensão do método para uma situação geral de n corpos (1965, p. 60). Precisa, todavia, assumir que as acelerações mutuamente induzidas se dão nas direções das linhas de junção dos corpos e que são independentes umas das outras (hipóteses das forças centrais e do paralelogramo de forças), bem como a validade da lei de gravitação universal. Pior ainda: o procedimento não funciona se os corpos forem coplanares, nem assegura que as massas sejam sempre positivas (o que o próprio Ellis admite na nota 26).

A importante questão da extensão do método de Mach foi rigorosamente investigada por C. G. Pendse em uma série de artigos na *Philosophical Magazine* (Pendse 1937, 1939 e 1940). Seu resultado mais interessante é que *não é possível determinar as razões de massa (como sendo constantes) se o número de corpos for maior do que quatro*.

É útil reproduzir os traços principais dessa prova. Sejam os n corpos idealizados como partículas, indexa-

das por $\lambda, \mu = 1, 2, \dots, n$. Um observador tem acesso unicamente às acelerações, \mathbf{a}_λ . Suponhamos que a aceleração de P_λ devida à partícula P_μ seja $\mathbf{a}_{\lambda\mu}$ ($\mathbf{a}_{\lambda\mu}$ é um componente de \mathbf{a}_λ). Seja $\mathbf{e}_{\lambda\mu}$ o vetor unitário na direção $P_\lambda \rightarrow P_\mu$. *Assumindo-se que as forças são centrais, i.e., que $\mathbf{a}_{\lambda\mu} = a_{\lambda\mu} \mathbf{e}_{\lambda\mu}$, e que as ações dos corpos são independentes*, teremos as seguintes n equações vetoriais:

$$\mathbf{a}_\lambda = \sum_{\substack{\mu=1 \\ \mu \neq \lambda}} \mathbf{a}_{\lambda\mu} \mathbf{e}_{\lambda\mu} \quad (\lambda = 1, 2, \dots, n)$$

Dessas equações conhecemos os \mathbf{a}_λ e os $\mathbf{e}_{\lambda\mu}$. Existem $n(n-1)$ incógnitas (os $a_{\lambda\mu}$). Como temos no máximo $3n$ equações linearmente independentes, o sistema terá uma solução única se e somente se:

$$3n \geq n(n-1),$$

ou seja,

$$n(n-4) \leq 0$$

$$n \leq 4$$

Se as partículas forem colineares, haverá apenas $1n$ equações linearmente independentes, e se forem coplanares, no máximo $2n$ equações linearmente independentes, o que dá indeterminação mesmo nos casos $n = 3$ e $n = 4$:

$$n = 3 \text{ (colineares) - incógnitas: } 6 \text{ (} 3 \times 2 \text{);}$$

$$\text{eqs. independentes: } 3 \text{ (} 3 \times 1 \text{);}$$

$$n = 4 \text{ (coplanares) - incógnitas: } 12 \text{ (} 4 \times 3 \text{);}$$

$$\text{eqs. independentes: } 8 \text{ ou menos (} 4 \times 2 \text{ ou } 4 \times 1 \text{).}$$

Portanto o método generalizado de Mach falha logo no primeiro passo, ou seja, na identificação unívoca das acelerações mutuamente induzidas. Se no caso restrito de apenas dois corpos vemo-nos obrigados a justificar a “*isolação*”, e também a assumir que os coeficientes de massa obtidos nas condições idealizadas continuam os mesmos nas condições reais, quando tomamos mais que dois corpos em geral não podemos atribuir os coeficientes de massa de modo unívoco. E mesmo nos poucos casos possíveis (três corpos não-colineares ou quatro corpos não-coplanares) deve ser *assumida* a hipótese das forças centrais e independentes.

Percebendo que a decomposição das acelerações nos casos reais pressuporia a hipótese das forças centrais, Henri Poincaré antecipou uma crítica à possível extensão do método de Mach, ao lembrar que sabemos, a partir de observações sobre as interações magnéticas, que essa hipótese não pode ser mantida. Diante disso,

emitiu sua famosa conclusão de impotência: “*massas são coeficientes que é cómodo introduzir nos cálculos*” (Poincaré 1968, p. 123).

VII. A escolha do referencial. Uma fábula.

Diante de tantos embaraços, retomemos o problema do sistema de referência no qual os movimentos devem ser analisados. Salientamos na seção III que se tentarmos definir o sistema de referência com o auxílio da 1^a lei, estaremos renunciando a interpretá-la como um princípio empírico. Além disso, essa proposta de definição dos referenciais apropriados assume que possuímos um meio de identificar a ação de forças independentemente da 1^a lei. Como já vimos, porém, essa é uma assunção de difícil justificação. Portanto a definição sugerida parece ser completamente vazia.

Por outro lado, se não formos capazes de caracterizar os referenciais de forma independente da lei de inércia, não poderemos sequer utilizá-la como critério de existência de forças (que não foi possível encontrar por outros meios)! Isso deixa-nos em pleno ar, sem qualquer vínculo com a suposta base empírica de nossa teoria.

Já que involuntariamente chegamos a esse ponto, permitamo-nos imaginar uma pequena fábula, inspirando-nos parcialmente nos comentários (sérios!) que Nagel tece no Capítulo 8 de seu *The Structure of Science* (p. 204 ss.).

Escalamos uma torre bem alta e largamos uma pedra, com o propósito de usar a mecânica newtoniana para o estudo de seu movimento. O problema do referencial em relação ao qual faremos as nossas medidas é preliminar e fundamental. Se tomarmos a Terra como esse referencial, preveremos, de acordo com a teoria - agora *assumida hipoteticamente* - que o corpo irá em linha reta em direção ao centro de gravidade da Terra. (Desprezamos, como bons admiradores dos artifícios de Galileo, certos fatores incômodos, como o atrito com o ar, as forças gravitacionais do Sol, da Lua e dos planetas.)

Observando a trajetória do corpo, vamos supor que ela não coincide com a previsão que fizemos. Será, digamos, uma linha curva situada a leste da prevista. Que fazer? Temos pelo menos três alternativas:

- 1) Declarar falso um (ou mais) dos axiomas de movimento;
- 2) Declarar falsa a lei da gravitação universal;
- 3) Culpar o referencial escolhido.

Sendo tão obstinados quanto os criadores da mecânica clássica, não desejamos seguir a primeira opção. Caso sigamos a segunda, teremos de postular novas forças, além da inicialmente única força gravitacional. Essa parece ser uma saída problemática. Primeiro, é *ad hoc*, ou seja, inventamos as novas forças precisamente para resolver o nosso problema. Em segundo lugar, as forças requeridas violam a simetria esférica da situação experimental, além de conterem fatores dependentes da velocidade do corpo.

Tentamos então o terceiro caminho. Poderemos, por exemplo, mudar o referencial para o *Sol*, com eixos orientados para três estrelas distantes (“estrelas fixas”). Se agora resolvermos as equações usando somente a força gravitacional, não obteremos a mesma trajetória que antes, já que as próprias condições iniciais mudaram: o corpo tem uma velocidade inicial não nula, e a Terra, a torre e nós próprios nos movemos aceleradamente ao longo de uma trajetória curva. Levando isso em conta, poderemos prever a nova trajetória, não somente em nosso novo referencial, mas também, por uma transformação cinemática, no anterior, i.e., com relação à Terra. O que encontramos? Suponhamos que seja uma trajetória mais próxima da observada empiricamente.

Para explicar as discrepâncias ainda existentes dispomos das mesmas três alternativas, como antes. O sucesso de nossa primeira escolha pode encorajar-nos a seguir de novo o terceiro caminho, ou seja, procurar outro referencial. Podemos tentar, por exemplo, fixar o referencial no *centro de massa do Sistema Solar*. Tudo se repete. A nova trajetória, calculada a partir da força gravitacional, aproxima-se ainda mais da trajetória observada.

Esse processo pode ir se repetindo, e a eventual aproximação cada vez maior entre as trajetórias empírica e teórica pode sugerir a idéia de que há um referencial de algum modo privilegiado, no qual os axiomas newtonianos, conjuntamente com a lei da gravitação universal, dão exatamente a trajetória empírica do corpo. Essa idéia fica reforçada quando verificamos que em outros fenômenos (movimento de uma bala, movimento dos planetas, dos satélites, etc.) *a mesma* lei de gravitação e *os mesmos* axiomas dão bons resultados quando o referencial é aquele que melhor serviu no caso do corpo largado da torre (especialmente quando são levadas em conta as atrações dos corpos celestes).

VIII. A escolha do referencial. De volta à realidade.

Embora inventada, a história que expusemos pode apresentar razoável correspondência com a realidade, desde que se tomem algumas providências experimentais e calculacionais, que não vem ao caso comentar aqui. Queremos apenas notar que, de um modo ou de outro, não há garantia *a priori* de que o processo que imaginamos sempre levará a bom termo, ou seja, ao encontro de um referencial no qual as leis newtonianas dão previsões corretas para uma grande gama de fenômenos. É um resultado *empírico* que um tal referencial tenha de fato sido encontrado na evolução *real* da mecânica.

Esse fato pode sugerir que há um referencial privilegiado (ou, mais precisamente, de uma classe de referenciais privilegiados), fazendo-nos lembrar a já mencionada concepção newtoniana de um “espaço absoluto”. Não trataremos desse assunto aqui, por já se achar bem discutido na literatura.³ Mencionaremos apenas que além dos argumentos filosóficos e teológicos dados por Newton a favor do espaço absoluto ele também ofereceu um argumento que a seu ver era empírico: o famoso experimento do balde. Esse argumento é muito persuasivo, e sua mais importante crítica é a de Mach. Mach defendeu que a única conclusão que se pode tirar do fenômeno é que a deformação da superfície da água, quando está girando, deve-se a sua rotação relativamente a algum outro corpo que não o próprio balde; não podemos de nenhum modo inferir a existência de um espaço absoluto. A deformação liga-se, segundo Mach, ao resto da massa do Universo; a inércia é, para ele, uma relação.⁴

Voltando ao nosso processo de busca de um referencial para a mecânica newtoniana, observemos ainda que a busca do referencial foi *inteiramente* guiada pelas *decisões* de manter: (i) os axiomas de movimento; e (ii) a lei da gravitação universal. Em uma reconstrução racional da história da física, esta última decisão poderia ter envolvido também outras leis de força, como a lei de atração elétrica, a lei de atração magnética, a lei de Hooke, etc., todas possuindo certas características comuns de *simplicidade*, independência das acelerações (e, sempre que possível, também das velocidades), acordo com a noção antropomórfica de força, diminuição de intensidade com a distância, etc. *A não*

ser por essas restrições sobre as funções de força não haveríamos chegado ao referencial a que chegamos. Assim, por exemplo, se no caso do corpo soltado da torre tivéssemos usado a função de força

$$\mathbf{F} = (GMm/r^3)\mathbf{r} - \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - 2\boldsymbol{\omega} \times d\mathbf{r}/dt - d\boldsymbol{\omega}/dt \times \mathbf{r},$$

tomando a Terra como referencial, poderíamos calcular a trajetória do corpo tão bem como quando usamos o referencial das “estrelas fixas” e a função de força $\mathbf{F} = (GMm/r^3)\mathbf{r}$. A preferência desta última em relação à primeira deve-se à sua *simplicidade* e ao fato de que os termos não-gravitacionais (centrífugo, de Coriolis e $d\boldsymbol{\omega}/dt \times \mathbf{r}$) não nos parecem “compreensíveis” dadas as *simetrias* da situação física em questão. Mas a escolha jamais poderia ter resultado unicamente da experiência.

Outro motivo importante na decisão de usarmos referenciais “inerciais” é apontado por Nagel (1961, p. 213-4): as leis formuladas em um deles se mantêm *invariantes* em todos os demais. Já se usarmos a Terra como referencial, por exemplo, a classe de invariância ficará reduzida aos referenciais em repouso em relação a ela.

IX. A Terra gira?

É interessante retomar agora a questão do movimento da Terra. Quando era debatida nos séculos XVI e XVII, não havia um sistema de dinâmica unanimemente aceito que pudesse guiar os investigadores (como usamos o sistema newtoniano em nossa fábula). Assim, a disputa se reduzia à adoção deste ou daquele sistema dinâmico-cosmológico. Como já notamos, a dinâmica aristotélica era incompatível com o movimento da Terra. A nascente nova dinâmica de Galileo e Newton só se compatibilizaria com a fixidez da Terra se forças complexas e “inexplicáveis” fossem assumidas para dar conta do movimento do resto do Universo em torno dela (e poderíamos hoje acrescentar: do achatamento da Terra, da rotação do pêndulo de Foucault, etc.).

Então quando dizemos que a Terra gira é porque, dado o nosso sistema dinâmico (que adotamos por razões não completamente empíricas), as forças ficam mais simples quando o referencial é o das “estrelas fixas”, em relação ao qual a Terra gira.

³Ver, por exemplo, Nagel 1961, cap. 8; Mach 1974, cap. 2, seção 6; Poincaré 1968, cap. 6.

⁴Ghins 1986 desenvolve uma tréplica interessante à crítica de Mach. As idéias radicalmente relativistas de Mach são discutidas e implementadas originalmente em Assis 1998.

Assim, a questão não é puramente empírica (cinematicamente o fenômeno é o mesmo, e as forças aparentemente não são entidades objetivas), nem totalmente convencional, já que só pode ser respondida dentro de um contexto cosmológico-dinâmico mais amplo, e podemos ter algumas razões empíricas para adotar um contexto e não outro. Poderíamos, por exemplo, haver descoberto que os “céus” têm a mesma constituição que a Terra, e portanto que a cosmologia aristotélica é insustentável. Algumas das observações telescópicas de Galileo tiveram exatamente esse efeito. E sendo os “céus” da mesma natureza que a Terra, precisamos de uma nova dinâmica, como por exemplo a newtoniana. Por sua vez, a adesão a essa dinâmica conduz, por considerações empíricas, mas também de simplicidade, simetria, unidade, etc., ao referencial das “estrelas fixas”, como vimos acima, no qual a Terra gira.

X. Epílogo filosófico

Refletindo sobre o conteúdo das seções precedentes, talvez suspeitemos que as dificuldades encontradas na tentativa de fundamentar experimentalmente a mecânica newtoniana resultam do *pressuposto epistemológico* de que é possível isolar as leis da teoria, e estabelecer seu caráter, empírico ou convencional, de maneira inteiramente objetiva e definitiva.

Tanto um exame de tipo conceitual, como o esboçado aqui, quanto o estudo aprofundado da história real da ciência indicam que, de fato, na gênese e fundamentação da dinâmica newtoniana intervieram, em mistura inextricável, grande variedade de observações experimentais e critérios metodológicos como a simplicidade, a coerência interna da teoria, sua compatibilidade com teorias de domínios conexos, etc., bem como decisões aparentemente arbitrárias tomadas pelos cientistas.

Quem quer que se aventure pelos fundamentos da física descobre facilmente que conclusões semelhantes se obtêm quando se analisa *qualquer* outra teoria da física. Em relatividade e mecânica quântica, por exemplo, os embaraços epistemológicos são certamente bem mais graves do que os da mecânica clássica.

Constatações nesse sentido acabaram levando alguns filósofos contemporâneos a críticas exacerbadas da idéia de que há um “método científico”, uma racionalidade qualquer na ciência, uma fundamentação experimental sólida. (Ver, por exemplo, *Against Method*, de Paul Feyerabend, um livro brilhante sob diversos aspectos, inclusive em sua análise histórica de Galileo.) No

entanto, os pesquisadores mais moderados continuam ressaltando que a ciência persegue, sim, o ideal de rigor formal e dispõe, sim, de vínculos fortes com a realidade empírica, não porém da forma descrita ao longo de séculos pelos melhores filósofos e cientistas.

O grande matemático e físico teórico Henri Poincaré abre o capítulo sobre a mecânica clássica de seu *La Science et Hypothèse* comentando que são os ingleses (empiristas), e não os filósofos do Continente (racionalistas) que têm razão quanto à natureza do conhecimento da mecânica. Prossegue dizendo que as confusões a esse respeito provêm principalmente do fato de os tratados de mecânica “não distinguirem nitidamente o que é raciocínio matemático, o que é convenção e o que é hipótese” (p. 111).

No entanto, ao longo do capítulo Poincaré reconhece, de forma incomum para a época (1902), que a *prática* científica - especialmente a da mecânica - pouco parece respeitar as referidas distinções, sejam elas quais forem. Poincaré evidencia ter começado a perceber que o estatuto epistemológico das proposições científicas pode-se alterar conforme a evolução da ciência, ou a área de sua aplicação. Em sua discussão da lei de inércia, por exemplo, afirma que embora na astronomia ela possa num certo sentido ser dita “verificada pela experiência”, quando se pensa na física como um todo parece que “nunca se poderá submetê-la [a lei] a uma prova decisiva” (p. 116). Lembra, mais adiante, que facilmente se concebem muitas maneiras de “salvaguardá-la” de eventuais conflitos com a experiência.

Embora a vertente principal da filosofia da ciência ainda fosse passar, em torno das décadas de 1920 e 1930, pelo movimento positivista lógico, que perseguiu com vigor o ideal de se traçar, por meio de reconstruções racionais das ciências, distinções claras e fixas entre proposições empíricas e convencionais (além das formais), podemos encontrar precursores de concepções epistemológicas “holistas” ainda na primeira metade do presente século. Além, é claro, de Pierre Duhem, poderíamos citar, por exemplo - e de forma expressiva -, estas conclusões extraídas por Einstein e Infeld em seu livro de 1938, *The Evolution of Physics*, a partir justamente da análise das leis de Newton:

É o nosso sistema completo de suposições [*guesses*] que realmente deve ser ou provado ou refutado pelos experimentos. Nenhuma das assunções pode ser isolada para um teste separado. (p. 30-1)

Tendo ou não lido essas palavras, é ao longo delas que Quine, o mais proeminente crítico da distinção nítida do que é empírico e do que é convencional nas teorias científicas, desenvolverá sua contraproposta empirista. Numa imagem que se tornou famosa, asseverou em seu artigo “Two dogmas of empiricism”, de 1951, que “nossos enunciados sobre o mundo externo não enfrentam o tribunal da experiência sensorial individualmente, mas apenas corporativamente” (p. 41), acrescentando mais adiante:

Minha sugestão presente é que é bobagem, e a origem de muita bobagem, falar em um componente lingüístico e em um componente factual na verdade de uma proposição individual qualquer. Tomada coletivamente, a ciência apresenta sua dupla dependência com relação à linguagem e à experiência; tal dualidade, porém, não pode ser significativamente levada aos enunciados da ciência tomados um a um. (p.42)

Nagel provavelmente foi o filósofo contemporâneo que desenvolveu a mais precisa análise da mecânica clássica a partir do novo referencial epistemológico. Essa análise encontra-se especialmente no capítulo 7 de seu livro de 1961, *The Structure of Science*. Rejeitando resolutamente tanto as propostas racionalistas segundo as quais as leis newtonianas teriam o estatuto de verdades *a priori*, quanto o empirismo ingênuo que as concebe como generalizações indutivas diretas, Nagel encontra entre esses extremos um amplo espaço para compreender a teoria de Newton como o resultado de complexo processo de elaboração de conceitos e leis cujo objetivo é acomodar a totalidade dos fenômenos. Esse processo guia-se por critérios experimentais e metodológicos; nunca, porém, pela pretensão de se delinear e fixar de uma vez por todas as quotas de participação dos dados empíricos brutos e de nossas exigências ou preferências intelectuais.

Referências

ASSIS, A. K. T. *Mecânica Relacional*. (Coleção CLE, vol.22.) Campinas, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência - Unicamp, 1998.

COHEN, I. B. *O Nascimento de uma Nova Física*. (Trad. G. de Andrada e Silva.) São Paulo, Edart, 1967.

—. *The Newtonian Revolution*. Cambridge, Cambridge University Press, 1980.

DESCARTES, R. *Les Principes de la Philosophie*. In: C. Adam & P. Tannery (eds.) *Oeuvres de Descartes*. Tomo IX-2. Paris, Vrin, 1971.

ÉVORA, F. R. R. *A Revolução Copernicana-Galileana*. (Coleção CLE, vols. 3 e 4.) Campinas, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência - Unicamp, 1988.

FEYERABEND, P. K. *Against Method*. London, Verso, 1978.

GHINS, M. O argumento de Newton a favor do espaço absoluto. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, n. 9, p. 61-7, 1986.

—. *A Inércia e o Espaço-Tempo Absoluto*. (Coleção CLE, vol. 9.) Campinas, Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência - Unicamp, 1991.

EINSTEIN, A. & INFELD, L. *The Evolution of Physics*. Cambridge, Cambridge University Press, 2 ed., re-issued, 1971.

ELLIS, B. The origin and Nature of Newtons Laws of Motion. In: *Beyond the Edge of Certainty*, R. B. Colodny (ed.), Englewood Cliffs, N.J., 1965. (p. 29-67.)

KUHN, T.S. *The Copernican Revolution*. Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1957.

LOSEE, J. *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*. 2. ed. Oxford, Oxford University Press, 1980.

LUCIE, P. H. *A Gênese do Método Científico*. Rio de Janeiro, Campus, 1977.

MACH, E. *The Science of Mechanics*. (Trad. T.J. McCormack, 6th English ed.) La Salle, Illinois, The Open Court Publishing Company, 1974.

NAGEL, E. *The Structure of Science*. London, Routledge and Kegan Paul, 1961.

NEWTON, I. *Mathematical Principles of Natural Philosophy* (Trad. A. Motte / F. Cajori). Berkeley and Los Angeles, University of California Press, 1934.

PENDSE, C.G. A note on the definition and determination of mass in Newtonian mechanics. *Philosophical Magazine*, v. 24, n. 7, p. 1012-22, 1937.

—. A further note on the definition and determination of mass in Newtonian mechanics. *Philosophical Magazine*, v. 27, n. 7, p. 51-61, 1939.

—. on mass and force in Newtonian mechanics. *Philosophical Magazine*, v. 29, p. 477-84, 1940.

POINCARÉ, H. *La Science et Hypothèse*. Paris, Flammarion, 1968.

QUINE, W. V. O. Two dogmas of empiricism. In: *From a Logical Point of View*. 2 ed., revised. Cambridge, MA, and London, Harvard University Press, 1980.