esquemas conceptuais que ajudam os cientistas a interpretar os fenômenos que estão investigando. As teorias científicas são quadros ou marcos interpretativos. Sem essas interpretações da natureza, que em certo sentido são anteriores a, e independentes de, quaisquer resultados empíricos concretos, ficaríamos *cegos* perante a natureza — ou seja, ficaríamos incapazes de compreender fosse o que fosse.

Ora esta situação é a que caracteriza, não apenas o estudos dos fenômenos naturais, mas também o estudo das *teorias* destinadas a dar conta dos fenômenos. O registro puramente cronológico de fatos históricos acerca de ciência não oferece qualquer chave para a compreensão da natureza da ciência. Precisamos sempre de uma interpretação.

Para chegar à necessária interpretação dos fatos históricos, é preciso elaborar certas teorias gerais acerca das teorias cietíficas, teorias essas que podemos chamar "filosóficas" ou, se se preferir, "histórico-filosóficas". É claro que essas teorias podem ser mais ou menos aceitáveis, e isto pode ser decidido apelando para os fatos históricos. Mas este apelo ocorre *depois,* e não antes da concepção da teoria geral, pois é preciso selecionar, de entre a massa enorme de fatos aparentemente amorfos, aqueles que são relevantes para a afirmação da exatidão ou inexatidão da teoria interpretativa.

Em 1962, Thomas Kuhn propôs uma determinada metateoria histórico-filosófica com a finalidade de explicar a evolução histórica da ciência natural. Essa teoria é exposta em seu conhecido livro *A Estrutura das Revoluções Científicas,* e em anos posteriores Kuhn apresentou formas mais sofisticadas da versão original. Foram propostas algumas concepções alternativas (como por exemplo a de Lakatos em "A Falsificação e a Metodologia dos Programas de Pesquisa Científica"), destinados em parte a replicar à concepção kuhneana. Vou usar apenas a teoria de Kuhn, não porque eu incriticamente a tome como um dogma estabelecido, mas porque a considero útil para a tarefa de interpretar ou reconstruir certo aspectos do advento da mecânica newtoniana nos quais estou interessado. Talvez outras teorias sejam mais adequadas a outros aspectos da evolução da ciência. Não sei. Mas o quadro kuhneano pareceu-me útil, pelo menos, para tratar de questão que proponho.

Não quer isto dizer que as conclusões a que cheguei através da análise da mecânica newtoniana dependam univocamente da aceitação da teoria geral de Kuhn. Efetivamente, uma coisa é logicamente independente da outra. Isto é, é possível aceitar estas conclusões sem assumir qualquer compromisso de aceitação da totalidade da teoria

kuhneana, e reciprocamente, é possível aceitar o quadro geral kuhneano e discordar da análise concreta que se segue.

Conforme é sugerido pelo título do livro de Kuhn, este é acerca da natureza das revoluções científicas, de processos culturais como por exemplo a revolução copernicana em astronomia, a revolução de Darwin em biologia ou a revolução de Einstein na física. Todavia, Kuhn não se limita a tratar dos aspectos revolucionários da ciência, tratando também dos períodos intermediários de cada disciplina científica, o que ele chama "ciência normal" e se situa entre duas revoluções. Distingue ele assim entre duas maneira fundamentais de se fazer ciência, quando são aceites sem discutir certos marcos conceptuais e certos princípios básicos; estes instrumentos *a priori* são usados como guias para interpretar os fatos e para resolver problemas específicos que só adquirem significado no interior do quadro desses princípios básicos. A toda a constelação de métodos, princípios e conceitos básicos e exemplos orientadores que é subjacente à pesquisa normal, e que nunca são questionados durante o período de ciência normal, Kuhn chama o "paradigma" da disciplina correspondente durante esse período, e àquele tipo de atividade científica realizada sob a "proteção" do paradigma deu ele o nome de "solução de quebra-cabeças". Uma característica da solução de quebra-cabeças que tem provocado muitas críticas a Kuhn é que, segundo ele, essa atividade nunca pode por si mesma conduzir a um questionamento, e muito menos a uma rejeição do paradigma. Voltarei a este ponto quando examinar nosso exemplo da mecânica newtoniana.

A outra forma de pesquisa científica distinguida por Kuhn é aquela à qual chama "ciência extraordinária". Às vezes a pesquisa normal é perturbada por períodos de crise que, caso se prolonguem muito, podem conduzir (embora não necessariamente) a uma revolução cientifica e uma mudança de paradigma. O antigo paradigma, que não era questionado no período anterior, é abandonado e substituído por um novo.

Ora um ponto que é importante acentuar aqui é que, conforme esta concepção das revoluções científicas, a mudança essencial que nelas se dá não é tanto de tipo empírico, isto é, ligado a descobertas e resultados empíricos, como uma mudança das estruturas conceptuais básicas por meio das quais é interpretada a realidade. Da primeira vez que surge o novo paradigma, está sendo proposta uma nova maneira de olhar para o mundo, maneira essa que, inicialmente não está muito bem articulada nem é bem sustentada pelos resultados empíricos. Nas palavras de Kuhn, é mais uma "promessa" do que qualquer outra coisa. No trabalho subsequente, os seguidores do

novo paradigma têm que mostrar como é que os princípios um tanto vagos do paradigma podem ser articulados a fim de fornecerem resultados concretos. Esta é a tarefa de gerações inteiras de cientistas "normais".

Por razões óbvias não posso adentrar profundamente os pormenores da concepção kuhneana, mas já acentuei os pontos que considero relevantes em relação com os aspectos particulares da revolução newtoniana que pretendo discutir.

Vou aqui partir do princípio que o advento da mecânica newtoniana *é* uma revolução científica en sentido kuhneano. Talvez haja quem discorde disto. Pode haver dois tipos de razões para essa discordância: um tipo geral e um tipo particular. O tipo geral de razão seria o seguinte: as revoluções científicas são simplesmente coisas que não existem; a evolução da ciência é um processo cumulativo e contínuo onde a tradição passada é sempre assimilada. Creio que não apenas Kuhn, mas também muitos outros historiadores e filósofos de ciência mostraram de maneira convincente que esta não é uma interpretação aceitável da história da ciência. Realmente *há* profundas rupturas conceptuais na ciência. Talvez haja quem não goste do termo "revolução" porque ele pode parecer um pouquinho exagerado em comparação com as revoluções políticas. Nesse caso, o melhor será adotar qualquer outro termo. Penso que a maneira de rotular essas rupturas conceptuais é uma questão terminológica de relativamente pouca importância; o que realmente importa é aceitar sua existência e analisá-las.

O tipo particular de razão para negar que tenha havido uma revolução newtoniana levaria a afirmar que, embora em outros casos possa haver revoluções científicas, a mecânica newtoniana não é um exemplo disso. Isto me parece dificilmente sustentável, se levarmos em conta a situação histórica da mecânica antes e depois de Newton. A mecânica newtoniana substituíu inteiramente o programa cartesiano anterior. E a finalidade principal deste artigo é detectar e discutir o que penso ser a mais notável inovação conceptual introduzida pelo advento da mecânica newtoniana.

Antes de iniciar esta discussão, permitam-me que fale um pouco mais explicitamente acerca da estrutura das revoluções científicas em geral. Sabemos que ela envolve a substituição de um paradigma por outro. Mas a noção central de paradigma ainda não foi explicada. Depois de publicada a primeirae dição do livro de Kuhn, o autor foi justamente criticado por ter usado o termo "paradigma" de maneira bastante vaga e imprecisa. Kuhn aceitou esta crítica e tentou ser mais explícito em seu *Postscript* de 1969. Substituíu o termo "paradigma"

"Excluí totalmente as forças intrínsecas dos corpos moventes; são entidades obscuras e metafísicas que só podem espalhar as trevas numa ciência que deveria ser clara" (*Traité*, p. xxviii).

Deste então, vários pensadores importantes tentaram excluir as forças da mecânica, ou pelo menos definir as forças nominalmente, visto que dar a definição de um termo é apenas fornecer uma regra para eliminá-lo de qualquer contexto dado em que apareça. Foi este o caminho seguido nos estudos fundacionais de Kirchhoff, Mach e Hertz no século passado, e pode ser identificado também em algumas axiomatização contemporâneas da mecânica newtoniana, como as de Hans Hermes e Herbert Simon. Em todos esses casos a Segunda Lei de Newton, quando de todo é mencionada, é tomada como mera definição nominal do termo "força", da mesma maneira como "$a^2 = a.a$" é a definição nominal do quadrado de um número. A partir daí, "força" não deveria passar de um termo abreviado para a expressão não muito mais longa "massa vezes aceleração". Se seguirmos este caminho, deve tornar-se bastante fácil construir a mecânica clássica sem o conceito de força — o que foi efetivamente o esforço emprendido por Hertz. Todavia, é sabido que a tentativa de Hertz e outras semelhantes, de dispensar o uso das forças, não tiveram qualquer influência no desenvolvimento da mecânica nem de suas apresentações didáticas. Na mecânica clássica ainda se trabalha com forças — e considero este fato como sendo precisamente a característica essencial da mecânica newtoniana.

Para tornar claro este aspecto, devo dizer que não penso haver algo de formalmente errado na tentativa de eliminar as forças da mecânica. Não se trata de uma questão puramente lógica. Ela se situa em um nível mais profundo da estrutura conceptual da teoria. Fazer mecânica newtoniana é usar o conceito de força como noção central e não apenas como abreviatura. É claro que poderíamos dispensar as forças, mas isto equivaleria a dispensar o quadro geral criado por Newton, e isso ninguém iria querer fazer — a menos que se tivesse à mão uma outra teoria poderosa, como a teoria da relatividade.

A principal razão devido à qual tantos pensadores se sentiram pouco à vontade perante o conceito de força é que sem dúvida é difícil dizer qual é o significado ou referência empírica dessa noção. E ao lermos as passagens introdutórias dos *Principia* de Newton vê-se que ele próprio se sentia pouco à vontade ao tentar explicar como devia ser entendida a força. Efetivamente, suas explicações introdutórias não são de muitas utilidade para o resto de sua obra, e a diversidade de contextos nos quais a noção é aplicada mostra que era muito difícil (se não impossível) fornecer uma caracterização úni-

ca e satisfatória da força em termos empíricos. Não é para admirar que pensadores de mentalidade tão fortemente empírica como D'Alembert achassem esse conceito newtoniano "obscuro e metafísico".

Na época atual, dado que acabou por reconhecer-se que o empirismo puro e simples não é apropriado para a ciência, ou pelo menos para as parte mais avançadas da ciência empírica, somos mais prontamente capazes de apreender a noção newtoniana. Sabemos que qualquer teoria avançada inclui, além de um determinado conjunto de conceitos constituindo a base empírica de corroboração ou rejeição da teoria, e que são independentes da teoria, outros conceitos teóricos de "alto nível" que não possuem significado independente da teoria. No que diz respeito à teoria aqui examinada, eles são empiricamente "abertos" ou subdeterminados, mas por esta mesma razão eles não se reduzem a meras ficções metafísicas, sendo poderosos instrumentos que permitem muitas interpretações diferentes da teoria, e portanto muitas aplicações diferentes a diferentes situações. Creio que a força newtoniana é um exemplo típico de tais conceitos altamente teóricos — possivelmente o primeiro exemplo histórico; e foi isto que tornou o quadro geral newtoniano tão poderoso.

Os conceitos altamente teóricos são estabelecidos por princípios altamente teóricos no nível fundamental da teoria. Esses princípios não são nem definições nominais nem enunciados de fato que possam ser confirmados ou refutados por observação ou experimentos diretos. Em certo sentido são *a priori* (relativamente à teoria à qual pertencem, e não absolutamente). E dado que eles de alguma maneira se referem ao mundo, poderíamos seguir Kant e chamar-lhes "sintéticos a *priori*". Mesmo que não aceitássemos a concepção geral kantiana do sintético *a priori,* poderíamos admitir que ele apontou para um aspecto importante das teorias científicas, e particularmente da mecânica newtoniana, que não tinha sido notado por outros.

A Segunda Lei de Newton pertence a este tipo de princípio. É *a priori* para a mecânica clássica na medida em que é assumida antes de ter início o trabalho realmente empírico no interior da teoria; é o pano de fundo contra o qual adquirem sentido todas as equações dinâmicas particulares. E é um princípio "aberto" na medida em que permite muitos tipos diferentes de interpretações e aplicações. Resumindo estas características podemos dizer: a Segunda Lei de Newton é um esquema geral usado como regra heurística para obter diferentes equações dinâmicas. É esta a razão pela qual ela não pode ser considerada apenas uma definição ou apenas um enunciado empírico de fato. E é também esta a razão pela qual ela nem é realmente descritiva nem realmente prescritiva.

O fato de a Segunda Lei de Newton efetivamente não ser um enunciado único mas um *esquema* de enunciados é devido à estrutura especial de um dos termos nela incluidos, o termo "força". De maneira semelhante, este termo não deve ser interpretado como um conceito único com significado fixo (como são a massa e a aceleração), mas mais como aquilo que os lógicos chamam uma "letra esquemática" ou melhor, como uma variável funcional existencialmente quantificada.

Para tornar isto claro, permita-se-me que apresente o princípio de Newton sob uma forma um tanto invulgar e extensa, a qual espero torne explícito o que realmente está sendo afirmado:

"Para qualquer sistema mecânico dado, existe um determinado conjunto de parâmetros e existe uma certa funcional desses parâmetros com propriedades matemáticas não triviais, tais que para cada partícula do sistema em qualquer momento dado o valor assumido por essa funcional é iqual à massa da partícula vezes sua aceleração".

Note-se que aqui estamos quantificando existencialmente com pelo menos dois tipos de função: os chamados "parâmetros", que são funções de primeira ordem, por assim dizer no mesmo nível que a massa e a aceleração, e a funcional desses parâmetros, que é uma função de segunda ordem. Estamos assim quantificando simultaneamente em dois níveis lógicos.

A funcional quantificada que depende desses parâmetros é o que normalmente chamamos a *força* que age sobre uma partícula; nada de específico é dito acerca dela na presente formulação do Segundo Princípio, além de que ela precisa ter certas propriedades matemáticas não triviais.

Também nada específico é dito acerca dos parâmetros. Eles podem ser de tipos muito diferentes, dependendo do problema específico com que se está lidando: podem ser por exemplo coordenadas espaciais, tempo, velocidades, carga elétrica, massa, coeficiente de elasticidade, etc. E a forma específica assumida pela funcional para diferentes tipos de parâmetros também varia muito: pode ser linear, ou a função inversa do quadrado da distância, ou uma função exponencial da velocidade, e muitas coisas mais. As únicas exigências gerais a que está sujeita (além das conhecidas propriedades matemáticas) são que sua forma nem seja demasiado trivial (no sentido de limitar-se a repetir a expressão "m.a", o que seria inútil), nem tão complicada que torne impossível o cálculo. É difícil ver como estas duas exigências poderiam ser completamente formalizadas, mas sem dúvida que todo físico bem preparado lhes confere grande importância.

Especificando todas as diferentes possibilidades contidas nesta formulação do Segundo Princípio, quer dizer, especificando o significando dos parâmetros indiciduais, bem como de sua inter-relação funcional, obtemos diferentes leis dinâmicas empíricas que podem ser testadas. O proprio princípio em si mesmo apenas declara que *existem* tais possibilidades, mas não é específico quanto a nenhuma delas. É esta a razão devido à qual ele não parece dizer nada de empiricamente concreto.

Examinemos a forma lógica deste princípio com um pouco mais de cuidado. É revelador notar quantos quantificadores existenciais são envolvidos por esse enunciado. Não são apenas a funcional e os parâmetros correspondentes que estão sendo existencialmente quantificados, é também seu número concreto. Ou seja, fica indeterminado, além da natureza particular dos parâmetros, também o número deles que é necessário. Todos esses quantificadores existenciais são implicitamente ocultos no enunciado aparentemente simples "F = m.a".

Ora é fato bem conhecido que quanto mais quantificadores existenciais se introduz num enunciado empírico mais difícil se torna achar contra-exemplos capazes de refutar esse enunciado. É bem claro que é mais seguro dizer: "Existem algumas pessoas com três pernas em algum lugar" do que eliminar os quantificadores existenciais especificando o nome dessas pessoas e o lugar onde vivem.

Ao introduzir tantos quantificadores existenciais, portanto, a Segunda Lei de Newton torna-se praticamente impossível de refutar mediante qualquer confronto direto com observações e experimentos. Por outras palavras, ela é imune à experiência negativa.

Esta característica adapta-se perfeitamente ao quadro geral dos princípios paradigmáticos descritos por Kuhn. Eles não se destinam a serem diretamente confrontados com a experiência. São tão esquemáticos que ninguém pode conceber qualquer contra-exemplo, e na verdade ninguém procura descobrir contra-exemplos para eles. Só são abandonados quando surge um novo paradigma capaz de substituir o antigo. Este aspecto foi considerado por muitos críticos de Kuhn quese como um aspecto irracional da ciência. Todavia, pelo menos no presente caso da mecânica newtoniana vemos que existe uma razão perfeitamente lógica para esta quase completa imunidade dos princípios básicos.

A imprecisão do conteúdo empírico da Segunda Lei, dado pelos quantificadores existenciais, também se relaciona com outro aspecto descrito por Kuhn em termos intuitivos. Ele disse que uma re-

volução científica, ou seja, a criação de um novo quadro conceptual começa mais como uma espécie de *promessa* do que como o enunciado de resultados empíricos concretos. Faz-nos a promessa de que, se adotarmos o novo esquema geral, a longo prazo acabaremos obtendo os resultados concretos que pretendíamos. No começo esta promessa é um tanto vaga e subdeterminada. Mas é por esta mesma razão que se torna útil para os cientistas dedicarem-se àquela tarefa chamada por Kuhn de "solução de quebra-cabeças". Esta solução de quebra-cabeças, esta procura tenaz de aplicações e resultados concretos, só pode ter início depois de estabelecido o princípio esquemático condutor.

Foi este o papel desempenhado pelo princípio de Newton durante mais de duzentos anos. Ele era a promessa de que, se se procurassem os parâmetros apropriados e as relações funcionais entre eles, se acabaria chegando a uma equação dinâmica para cada situação mecânica específica. Esta promessa orientou os cientistas durantes dois séculos na prática daquilo que o quadro geral cartesiano fora incapaz de oferecer: mostrar a maneira de resolver toda a espécie de problemas mecânicos até aos mais complexos pormenores.

Instituto de Investigaciones Filosóficas

Universidad Nacional Autónoma de México

Tradução de João Paulo Monteiro

BIBLIOGRAFIA

D'Alembert, Jean-le-Rond: *Traité de Dynamique,* Paris, 1743.

Hermes, Hans: "Zur Axiomatisierung der Mechanik". Em: Henkin, Suppes, Tarski (eds.), *The Axiomatic Method,* Amsterdão, 1959.

Hertz, Heinrich: *Die Prinzipien der Mechanik,* Leipzig, 1894.

Kirchhoff, Gustav: *Vorlesungen über Mechanik,* Leipzig, 1876.

Kuhn, Thomas S.: *The Structure of Scientific Revolutions*. 2ª edição, Chicago, 1970.

Lakatos, Imre: "Falsification and the Methodology of Scientific Research Programmes". Em: I. Lakatos, A. Musgrave (eds.) *Criticism and the Growth of Knowledge,* Cambridge, 1970.

Lakatos, Imre: "History of Science and Its Rational Reconstructions". *Boston Studies in the Philosophy of Science,* Vol. VIII, 1971.

Mach, Ernst: *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*, Praga, 1883

Newton, Isaac: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (ed. A. Koyré, I. B. Cohen), Cambridge, Massachusets, 1972.

Simon, Herbert: "The Axioms of Newtonian Mechanics". *Philosophical Magazine*, vol. 38, 1947.

Truesdell, Clifford: "Rückwirkungen der Geschichte der Mechanik auf die moderne Forschung". *Humanismus und Technik*, Berlim, 1969.