

UMA NOVA VISÃO DA HISTÓRIA DA MECÂNICA

Elio B.M. Cunha

Este artigo pretende chamar a atenção para uma determina da visão da história da mecânica que me parece muito pouco divulgada, principalmente entre os físicos profissionais. Trata-se da tendência representada por Clifford A. Truesdell e que se encontra exposta no livro "Ensayos de Historia de la Mecánica", edição espanhola da Editorial TECNOS, Madrid, 1975.

Na verdade, meu objetivo não é realizar uma discussão pro priamente histórica. Nesse aspecto, a exposição de Truesdell me parece bastante verossímil e bem informada, mas, evidentemente, poderia haver uma série de questões polêmicas que exigiriam uma investigação mais profunda. No entanto, a sua tese central, exposta principalmente nos artigos II - "Programa para el Redescubrimiento de la Mecánica Racional de la Ilustración" - e V - "Origen de la Ley del Momento de la Cantidad de Movimiento" -, apresenta tal variedade de evidências, que acredito ser suficiente uma certa formação em mecânica para que se possa reconhecê-la co mo correta.

A idéia básica é a seguinte: a mecânica clássica não foi construída por um desenvolvimento puramente dedutivo a partir das leis de Newton. Como se trata da negação de uma opinião bastante difundida, tanto entre os físicos como entre aqueles profissionais que se interessam pela história da mecânica por um motivo ou outro, creio que seria proveitoso acompanhar as razões apresentadas por Truesdell. Paralelamente à exposição, procurarei avaliar algumas possíveis consequências dessa concepção para a filosofia da ciência, principalmente no que se refere ao caráter das teorias científicas e do seu desenvolvimento. Nesse aspecto, utilizarei basicamente as idéias de Mário Bunge sobre a interpretação das teorias físicas, apresentadas em "Philosophy of Physics", D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1973.

1. O PAPEL DO "PRINCIPIA"

Truesdell inicia o artigo II - "Programa para el redescubrimiento de la mecánica racional de la Ilustración" - citando

Ernst Mach que pode ser considerado um dos principais responsáveis pela visão dominante desse assunto entre os físicos na atualidade, devido à grande divulgação do seu livro: "Desarrollo histórico crítico de la mecánica". Mach afirma que "... Newton possui um duplo mérito. Em primeiro lugar ampliou consideravelmente o campo da física mecânica mediante seu descobrimento da gravitação universal. Além disso, estabeleceu na sua forma definitiva, os princípios da mecânica, tal como hoje se aceitam. Depois dele, não se expressou, em essência, nenhum princípio novo, e tudo o que se realizou em mecânica não é senão o desenvolvimento dedutivo, formal e matemático da mecânica sobre a base dos princípios newtonianos." (pg. 159 da edição argentina - "Compañía Editora Espasa Calpe Argentina S.A. - 1949). Além disso: "Os princípios newtonianos bastam para considerar, sem introduzir novos princípios, todos os problemas mecânicos que se apresentam na prática, sejam eles estáticos ou dinâmicos. Quando se apresentam dificuldades, estas são sempre de natureza matemática (formal) exclusivamente e de maneira alguma se referem aos princípios." (op. cit. - pg. 235).

Em outras palavras, Mach considera que:

- 1) Newton descobriu uma grande parte da mecânica.
- 2) A mecânica de Newton forma um sistema completo.
- 3) Desde os tempos de Newton não se fez nada fundamental em mecânica. (Truesdell - "Ensayos..." - pg. 89).

No entanto, segundo Truesdell, não é a primitiva mecânica de Newton que é ensinada em aula atualmente. De fato, o que é apresentado são as partes mais simples da mecânica racional forjada pelos Bernoulli, por Euler e seus sucessores. Como se construiu essa mecânica? Esta é a pergunta que irá guiar o artigo de Truesdell.

Inicialmente, ele analisa o papel do "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica", publicado por Newton em 1687. Trata-se de três livros distintos. Sua grande reputação provém da primeira metade do Livro I, que trata do movimento de um ou dois corpos no vazio. Afirma Truesdell que, segundo investigações históricas recentes (cujas referências ele não fornece) a maior parte do seu conteúdo pode ser encontrada em escritos anteriores. Assim, essa parte do "Principia" corresponderia a "... uma obra de caráter retrospectivo que seleciona, ordena e formaliza os sucessos do século anterior." ("Ensayos..." - pg. 92).

Para os contemporâneos de Newton, esse aspecto estaria claro. No entanto, a obra teria despertado grande admiração, não só pelo seu estilo claro e conciso, como pelo fato de ser o primeiro tratado geral de mecânica estruturado e deduzido a partir de algumas leis fundamentais. Essa base dedutivo-matemática teria sido a principal responsável pelo grande êxito do "Principia".

O ponto central da segunda metade do Livro I é o problema dos três corpos, mas aqui começa a falhar a tentativa newtoniana de deduzir tudo de uma maneira matemática a partir dos axiomas: "Newton não oferece para este problema nenhuma solução, nem o que se entende modernamente por uma solução aproximada; e mais, nem sequer chega a estabelecer equações do movimento. Que ele tenha, com esses obstáculos, obtido algumas desigualdades corretas e que, tateando, tenha se acercado dos resultados aproximados de maior importância, é um tributo mais à sua incrível intuição física e à sua inteligência excepcional. Contudo, isto não demonstra que sua formulação das leis gerais da mecânica fosse adequada. A História mostra o contrário. Um maior progresso não exigia um instrumento matemático muito mais refinado, pois Newton era um mestre em obter soluções aproximadas, quadraturas e desenvolvimentos em série para todo tipo de problemas matemáticos concretos. O fato de que teriam de transcorrer cinquenta anos antes que alguém melhorasse seus resultados sobre o problema dos três corpos demonstra que Newton havia aprofundado no tema tudo o que seus métodos e conceitos permitiam. Extrair tanto de uma formulação tão primitiva da mecânica requereu o gênio de Newton. Nenhum de seus discípulos, dos quais teria sido razoável esperar que ampliassem sua formulação original, conseguiu o menor avanço. Foram necessários cinquenta anos de abstração, maior precisão e generalização dos conceitos newtonianos para adiantar um só passo. O primeiro a ultrapassar Newton na sua elaboração do problema dos três corpos foi Euler, o homem que descobriu a maneira de formular problemas mecânicos como problemas matemáticos perfeitamente definidos." ("Ensayos..." - pg. 94). Vejamos agora o Livro II.

O Livro II procura determinar matematicamente a natureza do movimento no seio de meios resistentes. Isso era necessário para se poder avaliar os efeitos do atrito e justificar a aplicação da mecânica celeste ao movimento dos corpos na Terra. O Livro II não consegue manter a estrutura rigorosamente dedutiva e poucas de suas soluções são corretas. O seu papel teria sido

principalmente o de indicar uma série de problemas que iriam ocupar boa parte das investigações do século seguinte: "Apesar desta sucessão anárquica de demonstrações matemáticas, hipóteses brilhantes, intuições, blefes e erros crassos, o Livro II tem sido considerado, com justiça, como a manifestação mais grandiosa do gênio de Newton. O Livro II foi propriamente um desafio lançado aos geômetras da época. Viram diante de si a necessidade de corrigir os erros, substituir as intuições mediante hipóteses claras, ordenar essas hipóteses dentro de um esquema da mecânica racional, trocar os blefes por demonstrações matemáticas e criar novos conceitos para alcançar o que Newton não havia conseguido. Não é exagerado afirmar que a mecânica racional, e portanto, a física matemática junto com a visão da natureza a que esta deu lugar, nasceu deste desafio, aceitos como foi pela escola matemática da Basiléia⁽¹⁾." ("Ensayos..." - pg. 143).

O Livro III trata de astronomia. Newton mostra que as proposições do Livro I, com valores adequados, conseguem uma boa concordância com os fenômenos conhecidos do sistema solar.

Resumindo: "Nos três livros que compõem o "Principia", Newton mostra seu talento de grande teórico por sua capacidade para: 1) organizar, deduzir matematicamente, e refundir leis e fenômenos conhecidos mas aparentemente independentes entre si; 2) criar conceitos novos; e 3) obter predições numéricas detalhadas e compará-las com valores medidos.

O que não fez, em absoluto, foi dar à mecânica "clássica" sua forma presente na atualidade, pois seus princípios não eram suficientemente claros e precisos." (Ensayos..." - pg. 95).

Uma das consequências dessa imprecisão conceitual teria sido a seguinte: "Salvo para certos problemas particulares, que embora simples são importantes, Newton não parece ter sido capaz de estabelecer equações diferenciais que rejam o movimento de um sistema mecânico." (...) "...grande parte dos estudos sobre mecânica que apareceram ao longo dos sessenta anos que se seguiram à publicação do "Principia" se ocupam em buscar diversos princípios com a intenção de encontrar equações do movimento precisamente para os sistemas que o próprio Newton havia estudado e também para outros sistemas que hoje em dia se consideram regidos pelas "equações de Newton."

Em suma, "... no "Principia" não aparecem equações para o movimento de sistemas compostos por mais de duas massas pontuais

livres, nem para sistemas com mais de uma massa pontual ligada; suas teorias acerca dos fluidos são em sua maior parte falsas, e temas tais como o pião que gira ou a mola flexionada caem fora do seu alcance." ("Ensayos..." pg. 96).

Portanto, ao contrário do que afirma Mach, Newton não teria estabelecido, na sua forma definitiva, os princípios da mecânica tal como são aceitos hoje. Seu papel teria sido o de iniciar a formulação desses princípios⁽²⁾.

2. O DESENVOLVIMENTO PÓS-NEWTONIANO DA MECÂNICA

Continuando, Truesdell afirma que as maiores contribuições para a mecânica no século posterior a Newton não foram realizadas pelos que eram considerados os "físicos" da época. Os trabalhos publicados por estes eram, geralmente, de natureza puramente experimental ou especulativa, e não se ocupavam da teoria matemática. Houve algumas descobertas interessantes, mas que não influenciaram diretamente no desenvolvimento do que hoje chamamos mecânica clássica. "Esta teoria foi criada por um punhado de "geômetras" ou "algebristas" - assim eram chamados naquela época - que se esforçaram em expressar de forma matemática as leis que regem a experiência física comum, tão evidente para qualquer um que se dê ao trabalho de observá-la." ("Ensayos..." - pg. 96).

Ou seja, o crescimento dessa ciência não teria sido devido a um maior desenvolvimento experimental, no sentido de que novas experiências tivessem levado a novas leis, mas a um esforço basicamente teórico, envolvendo a criação de novos conceitos que representassem adequadamente determinadas características físicas dos sistemas tratados e permitissem uma articulação matemática com a teoria geral. Os novos conceitos ou procedimentos iriam surgir devido às dificuldades enfrentadas na resolução de problemas particulares, o que mostra que não bastava aplicar as leis de Newton.

No entanto, a solução de problemas específicos não era o suficiente para esses pesquisadores. Eles partilhavam também da aspiração pela organização da teoria em uma estrutura dedutiva e rigorosa.

Esse aspecto é ressaltado por Truesdell ao criticar o positivismo de Mach: "Mach, assim como seus discípulos atuais, confundiu esta tendência para a ordem e a precisão com metafísica.

Sua oposição à metafísica era tão violenta que desterrou da sua história da mecânica quase a totalidade da análise e busca dos conceitos básicos desta matéria, deixando o leitor com a impressão de que seu desenvolvimento foi puramente experimental.

Não se pense, contudo, que a elegante generalidade da mecânica nasceu da especulação filosófica. A mecânica é uma ciência baseada na experiência; o teórico há de comparar a experiência física com a experiência contida em teorias anteriores edificadas para explicar os mesmos fenômenos. A história da mecânica racional não é nem experimental nem filosófica: é matemática; é uma história de problemas particulares, exemplos muito concretos para a resolução dos quais foi preciso criar novos princípios e métodos. Mas não bastava obter a solução de um problema; posto que só existia uma mecânica verdadeira, o caso particular não era um fim em si mesmo, mas um guia para as generalizações corretas. A ordem e o arcabouço da estrutura teórica eram tão importantes como a validade de seus componentes." ("Ensayos..." - pg. 98) (3).

Um exemplo disso pode ser encontrado na solução de Jaime Bernoulli para o movimento do pêndulo físico. O problema já havia sido resolvido por Huygens, que utilizou um raciocínio bastante engenhoso, mas que não tinha conexões com as outras idéias da mecânica e nem mesmo podia ser aplicado para o movimento mais geral de um corpo rígido. A intenção de Jaime Bernoulli era encontrar um princípio geral da mecânica do qual se derivasse a solução de Huygens. Ele conseguiu isso criando uma nova conceitualização do problema que teve uma grande influência na evolução posterior dessa ciência, introduzindo idéias tais como a utilização de forças para representar a ação dos vínculos de um sistema, a substituição de acelerações por forças atuando no sentido oposto e a necessidade de se usar simultaneamente o equilíbrio das forças e dos momentos das forças para resolver determinados problemas de dinâmica ou estática.

Truesdell nos alerta para o fato de que tais idéias não foram formuladas de maneira clara e explícita por Jaime Bernoulli: "Seria um exagero afirmar que Bernoulli chegou a enunciar com clareza algum desses princípios ou a distinguí-los entre si. Na verdade, eles aparecem mesclados e parcialmente implicados ao longo da sua obra. É tão difícil e tão necessária a organização da ciência como o descobrimento de idéias fundamentais; tendo em vista

o seu aproveitamento, a chave do tesouro é tão importante como o próprio tesouro. Inclui um especialista em mecânica, com o benefício da experiência acumulada, achará difíceis as obras de Newton e Jaime Bernoulli. O reconhecer, distinguir e formular os conceitos e métodos destes dois grandes homens exigiu, como agora veremos, o trabalho incessante dos melhores geômetras durante meio século." ("Ensayos..." - pg. 106).

Essas afirmativas de Truesdell sugerem um outro aspecto do desenvolvimento da mecânica. Assim como houve a aplicação da teoria já estabelecida a determinados casos ou a criação de novos conceitos e métodos quando ela se mostrava insuficiente, houve também a necessidade de um refinamento conceitual e formal de princípios já formulados. Contrariando a visão de Mach, de que teríamos um desenvolvimento puramente dedutivo a partir das leis de Newton, verificamos que essas mesmas leis sofreram um processo de constante reformulação, visando uma maior precisão conceitual que criasse condições para uma maior precisão do formalismo representativo desses conceitos, acarretando a utilização de uma matemática mais poderosa.

Um dos momentos em que isso ocorreu foi com a publicação por Euler da sua "Mecânica", em 1736: "A "Mecânica" precisou os princípios mediante três conceitos. Em primeiro lugar, assim como Newton tinha utilizado a palavra "corpo" de maneira vaga e com três sentidos distintos pelo menos, Euler percebeu que os enunciados newtonianos geralmente são corretos só quando se aplicam a massas concentradas em pontos isolados; foi ele quem introduziu o conceito preciso de massa puntual, e é seu o primeiro tratado dedicado única e exclusivamente a esse conceito. Em segundo lugar, foi o primeiro a estudar explicitamente a aceleração como uma magnitude cinemática definida no movimento sobre uma curva qualquer. Em terceiro lugar, emprega o conceito de vetor ou "magnitude geométrica", uma magnitude dirigida que se aplica não só à força estática, aplicação já bem conhecida, mas também à velocidade, à aceleração e à muitas outras magnitudes." ("Ensayos..." - pg. 108).

Em vista disso, a concepção positivista do desenvolvimento das teorias deve ser questionada. Sem entrarmos nas nuances das posições existentes, creio que poderíamos resumí-la da seguinte maneira: uma teoria é constituída por algumas leis gerais, das quais são deduzidas uma série de consequências. O desenvolvimento da teoria iria corresponder a essa expansão dedutiva e sua con

sequente aplicação a casos particulares, que iria levar a sua confirmação (ou falsificação) pelos fatos observados (ou por enunciados básicos). Portanto, a teoria não teria propriamente uma história. Uma vez estabelecidas as leis gerais, todas as suas consequências estariam determinadas por meio da dedução. É essa a visão que transparece na afirmação de Mach: "... tudo o que se realizou em mecânica não é senão o desenvolvimento dedutivo, formal e matemático da mecânica sobre a base dos princípios newtonianos."

A ligação das asserções teóricas com as observações possíveis seria especificada por meio de regras de correspondência, que associariam a cada conceito teórico (pelo menos parcialmente) um conjunto de operações e de elementos observáveis. Portanto, estaria estabelecido o quadro geral: a partir do simbolismo das equações gerais, teríamos um processo dedutivo puramente formal, que nada acrescentaria ao simbolismo inicial, culminando com situações comparáveis às observações por meio das regras de correspondência.

Um primeiro aspecto em que uma visão "histórica" das teorias entraria em choque com a concepção acima, seria o relativo ao caráter desse desenvolvimento dedutivo. O que a história da mecânica nos indica é que o processo de aplicação das equações gerais a problemas específicos eventualmente envolve uma reformulação dessas equações, ou seja, há um mecanismo de "realimentação" ou "feedback" que se afasta bastante do desenvolvimento linear e unidirecional pensado por Mach.

Não estou sugerindo que a própria relação de inferência dedutiva entre os símbolos tenha uma história, mas que os significados atribuídos, e mesmo seu formalismo, sofrem um processo de transformação devido às exigências da estrutura físico-matemática dos problemas enfrentados pela teoria. Se as leis de Newton, formuladas com um conceito vago de corpo, nos dão uma explicação satisfatória para o movimento de translação da Lua em torno da Terra, elas se tornam insuficientes quando pretendemos abordar uma situação desse sistema que leve em conta os movimentos de rotação da Lua e da Terra em torno dos seus eixos. Nesse caso, será preciso considerar, por exemplo, os movimentos das partes dos corpos em relação ao seu centro de gravidade, e não poderemos aplicar as leis na sua forma inicial, adequada às situações em que os corpos podem ser considerados como massas puntuais.

Vejamos rapidamente em que consistiu essa mudança na formulação das leis, para tornar mais clara a nossa discussão. Tomemos os dois primeiros axiomas, tais como são apresentados por Newton:

"Todo corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja obrigado a mudar tal estado por forças aplicadas sobre ele."

O segundo axioma afirma que: "A variação do movimento é proporcional à força motriz aplicada, e ocorre sobre a linha retilínea segundo a qual se aplica tal força." ("Principia" - pg. 14; em "Great Books of the Western World", vol. 14 - Enciclopedia Britannica, Inc.).

Segundo Truesdell, a primeira vez em que as leis de Newton foram apresentadas na forma diferencial (como são ensinadas atualmente), explicitando toda a sua generalidade e a possibilidade de aplicá-las à qualquer parte de um sistema arbitrário, ocorreu em 1750, em um trabalho de Euler. Isso se deu devido às dificuldades encontradas para aplicá-las a determinados sistemas. Truesdell explica que, por volta de 1747, Euler "...conseguia resultados satisfatórios para os sistemas discretos, mas, todavia, não tinha sido capaz de obter um método geral e unificado para os sólidos e os meios fluidos. Apoiando-se no método que seguira para investigar a corda vibrante e alguns problemas de hidráulica, por fim, em 1750, viu que o princípio do momento linear (segunda lei de Newton) era aplicável a sistemas mecânicos de todo tipo, sejam discretos ou contínuos. Seu estudo, intitulado "Descobrimiento de um novo princípio da mecânica", foi publicado em 1752, e nos oferece as equações

$$F_x = Ma_x \quad , \quad F_y = Ma_y \quad , \quad F_z = Ma_z \quad ,$$

como os axiomas que "compreendem todas as leis da mecânica", e nos quais a massa M pode ser tanto finita quanto infinitesimal. Mais adiante os chamaria "os primeiros princípios da mecânica." Eis aqui, propostas pela primeira vez como equações gerais e explícitas para problemas mecânicos de qualquer tipo, as famosas "equações de Newton".

Parece tão fácil o descobrimento deste princípio a partir das idéias newtonianas que todo mundo dá como fato que Newton foi seu autor; tão pouco se conhece a verdadeira história da me-

cânica. É um fato inegável que teriam que se passar sessenta anos de investigação fundada em métodos bastante mais complicados, inclusive para problemas relativamente simples, antes que se reconhecesse esse "novo princípio".

Os frutos do "novo princípio" se colheram de imediato. Já no mesmo trabalho em que Euler o deu à luz se encontram as equações do movimento para um corpo rígido." ("Ensayos..." - pg.116).

Realmente, se um estudante atual de física lê as leis do movimento tais como se encontram no "Principia", ele imediatamente as pensa na forma em que são apresentadas por Euler, pois é dessa maneira que está acostumado a expressá-las. Dessa forma, torna-se difícil avaliar a evolução conceitual ocorrida nos sessenta anos que separam as duas formulações. No entanto, o fato é que, na forma em que elas são apresentadas por Newton, não podem ser aplicadas na resolução de determinados problemas, como é o caso da dinâmica dos corpos rígidos, que discutiremos a seguir.

Sobre esse ponto, o conhecimento que se tinha antes de 1750 era bastante limitado. Não se sabia determinar o movimento de um pião, e nem mesmo calcular as reações sobre o apoio de um corpo girando em torno de um eixo fixo. Em uma carta de Daniel Bernoulli a Euler, de dezembro de 1745, há uma avaliação do problema geral da rotação como "extremamente difícil, que não será resolvido com facilidade por ninguém" (citado por Truesdell - "Ensayos..." - pg. 238). Notam-se aí as dificuldades encontradas para "aplicar as leis de Newton".

O grande passo na solução desse problema foi dado pelo artigo de Euler, quando ele apresentou os "novos princípios da mecânica". Com a aplicação desses princípios aos elementos de massa do corpo e a introdução de um novo conceito, o vetor velocidade angular, tornou-se possível a dedução das equações do movimento, sendo que nesse processo surgem as componentes de um outro conceito novo, atualmente conhecido como "tensor de inércia".

Se é difícil perceber a novidade conceitual envolvida nos "novos princípios" de Euler, ela salta à vista no caso do tensor de inércia. Este conceito representa as propriedades do corpo relativas às resistências apresentadas por ele às mudanças no seu estado de movimento. No caso de uma partícula em um movimento qualquer ou de um corpo extenso em movimento de translação retilínea, estas propriedades são determinadas por uma grandeza única, a massa. No entanto, para o movimento mais geral de um corpo

rígido, que envolve também a rotação, torna-se necessária a especificação de um conjunto de seis grandezas que, organizadas em uma matriz simétrica de três por três, correspondem ao tensor de inércia. As diferenças nas características inerciais do corpo em um caso ou outro são marcantes, não só no formalismo matemático como também em termos conceituais. Os três elementos da diagonal da matriz são os chamados "momentos de inércia", e podem ser compreendidos por meio de uma analogia com a massa. Eles representam a resistência do corpo à mudanças no movimento de rotação em torno de cada eixo, assim como a massa representa a resistência à mudanças no movimento retilíneo uniforme. Portanto, nesse caso, a distância conceitual não é tão grande, pois embora tenhamos três grandezas ao invés de uma, com características bem diferentes desta⁽⁴⁾, o conceito de momento de inércia aparece como a extensão natural do conceito de massa para o movimento de rotação.

No entanto, se considerarmos os elementos da matriz fora da diagonal, os chamados "produtos de inércia", teremos grandezas relativas a dois eixos simultaneamente, e seu significado físico dificilmente poderá ser expresso por meio de analogias com a massa. A melhor maneira de aprender esse conceito é compreendendo seu papel dentro da teoria e na determinação do movimento do corpo. Por exemplo, uma das consequências de que um corpo tenha produtos de inércia diferentes de zero com relação a determinados eixos é que estes não sejam os seus eixos "naturais" de rotação ("eixos principais de inércia"), ou seja, se o corpo estiver girando em torno de um deles irá forçar os suportes, pois sua tendência é girar em torno de eixos em relação aos quais os produtos de inércia sejam nulos. Nos corpos que possuem algum eixo de simetria, este será um dos seus eixos naturais, e é por isso que em máquinas onde existe um movimento rápido de rotação, o eixo das peças giratórias deve estar bem "centrado". Como vemos, apesar de se tratar de um conceito bastante abstrato, suas consequências práticas são importantes.

Na verdade, essas considerações pretendem apenas dar uma idéia de algumas das propriedades dos produtos de inércia, pois a sua expressão rigorosa e completa só pode ser dada dentro da estrutura matemática que representa as características físicas do corpo em questão e do seu movimento no espaço. O que eu espero com isto é tornar claro que a solução do problema do corpo rígido

do envolve grandes novidades teóricas e se afasta bastante do quadro conceitual newtoniano.

Um outro ponto que evidencia esse afastamento é o seguinte: a segunda lei de Newton afirma que a variação do movimento se dá na direção em que atua a força, mas, para um pião, o efeito da força peso, vertical, é um movimento de precessão circular horizontal. Isso pode ser explicado por uma lei análoga à newtoniana, mas, para tal, será preciso definir a grandeza "quantidade de movimento" de uma maneira nova, adequada para o movimento de rotação. Aqui também o tensor de inércia irá introduzir algumas diferenças fundamentais: enquanto o vetor quantidade de movimento linear ($m\vec{v}$) é sempre paralelo à velocidade, o vetor quantidade de movimento angular ($I\vec{\omega}$) pode não sê-lo, pois se trata do produto de um vetor por uma matriz.

Essa discussão nos apresenta alguns aspectos da reformulação dos princípios e conceitos básicos, a "realimentação" a que me referi anteriormente. Em termos formais, as leis de Newton passam a ser apresentadas como equações diferenciais segundo os três eixos, podendo ser aplicadas à elementos de massa discretos ou contínuos. Para isso foi necessário um refinamento da idéia de corpo, passando pelo conceito de "massa puntual". Utilizando as equações nessa forma e introduzindo dois conceitos novos, o vetor velocidade angular e o tensor de inércia, pode-se deduzir as equações gerais do movimento de um corpo rígido. Portanto, tivemos uma reformulação formal das leis de Newton, um refinamento conceitual das idéias de corpo e de inércia que já estavam presentes nessas leis e a introdução de alguns conceitos novos.

3. UMA LEI FUNDAMENTAL NOVA

Creio que foram apresentando alguns motivos para a rejeição de uma visão puramente dedutiva e formal do desenvolvimento da mecânica. Entre outros pontos, parece-me inegável que nesse processo houve a necessidade de novas idéias físicas, e não só matemáticas, assim como um conhecimento mais profundo de conceitos já formulados, como condição prévia para a introdução de novas técnicas matemáticas e a aplicação de leis já enunciadas à novas situações.

No entanto, as partes da mecânica que foram discutidas até agora ainda permitem uma reconstrução lógica da teoria, de tal

maneira que ela seja apresentada segundo as concepções de Mach. De fato, os "novos princípios da mecânica" de Euler correspondem a uma formulação mais precisa das leis de Newton, e a partir deles podemos construir uma estrutura teórica que dá conta dos problemas citados. Trata-se de uma reconstrução "a posteriori" e que não corresponde à evolução histórica, mas um partidário de Mach poderá argumentar que o imenso trabalho teórico que a tornou possível foi basicamente matemático e que "não se enunciou nenhum princípio essencialmente novo desde o tempo de Newton". Como já expliquei antes, parece-me uma idéia simplista afirmar que, por exemplo, as leis de Euler para a dinâmica dos corpos rígidos, envolvendo o tensor de inércia, não tenham se constituído num princípio essencialmente novo em termos de física. Contudo, é preciso reconhecer que essa discussão está pressupondo determinadas posições sobre o significado físico dos conceitos teóricos, de forma que um positivista convicto poderia partir de pressupostos distintos e considerar satisfatória a interpretação de Mach⁽⁵⁾.

Contudo, se levarmos em consideração a mecânica como um todo, veremos que se torna praticamente impossível admitir essa interpretação como correta. Isso porque, na mecânica dos corpos deformáveis, que engloba a mecânica dos fluidos e a elasticidade, torna-se necessária a introdução de uma nova lei básica, que não pode ser deduzida das leis de Newton. Trata-se do seguinte princípio: "A variação temporal do momento angular de um corpo arbitrário é igual ao torque (ou binário, ou momento de força) total aplicado sobre ele." Podemos chamá-lo "princípio do momento angular", ou, como Truesdell, "princípio do momento da quantidade de movimento". Ele representa para o movimento de rotação o mesmo que a segunda lei de Newton (o "princípio do momento linear") para o movimento de translação.

O ponto que irá nos interessar, e que geralmente é encarado com surpresa pelos físicos profissionais, é a afirmativa de que as duas leis são independentes. Na verdade, o princípio do momento angular pode ser deduzido do princípio do momento linear em alguns casos particulares, como na dinâmica dos corpos rígidos. Mas, para o caso mais geral de um meio contínuo deformável, a dedução não é possível.

Um dos motivos para essa visão dos físicos, de que uma lei pode ser deduzida da outra (o que reforça a posição de Mach),

é a maneira como são estruturados os seus cursos de mecânica. Ao que parece, a idéia dominante é que esta é uma ciência acabada e sem possibilidades de desenvolvimento. Assim, o seu estudo se justificaria principalmente como um trampolim para a compreensão da física moderna. Como esta trata da estrutura da matéria e das partículas que a compõem, a maior ênfase dos cursos de mecânica é dedicada, quase que exclusivamente, à mecânica das partículas, e mesmo o estudo de corpos extensos geralmente é introduzido a partir desse modelo⁽⁶⁾.

Um dos casos frequentemente apresentados nos livros-texto é o de um sistema de partículas cujas forças internas são todas centrais, ou seja, uma partícula atua sobre outra apenas segundo a reta que as une (p. ex.: em Symon, "Mechanics, p. 160). Este modelo permite a obtenção das equações corretas para o movimento do corpo rígido. Contudo, em um contínuo deformável, a ação de um elemento de volume sobre o seu vizinho não pode ser representada apenas por forças centrais, com sua tendência exclusiva para a aproximação ou o afastamento. Nesses casos, é preciso levar em conta também a ação exercida no sentido de girar o elemento de volume vizinho.

Isto é explicado por Truesdell no ensaio número V: "Origem da lei do momento da quantidade do movimento". Neste artigo é apresentado o motivo que teria levado Euler a abandonar o projeto de fundamentar toda a mecânica no princípio do momento linear, complementado por restrições sobre as forças mútuas: "A crença de que são suficientes as leis de Newton ou as equações "newtonianas" em qualquer de suas formas, só pode ser mantida por aqueles que limitam sua atenção a massas pontuais, corpos rígidos e vários outros sistemas particulares. Isto é sabido por qualquer teórico moderno, que logo percebe as evasivas utilizadas nos tratamentos típicos, tais como o de Joos descrito acima, nas suas tentativas de obter a forma adequada para os corpos deformáveis. No século dezoito, a mecânica dos fluidos, enquanto teoria desenvolvida, se limitava aos fluidos sem viscosidade, onde de novo é suficiente o princípio do momento linear. Mas em elasticidade, as leis de Newton nunca foram nem podem ser suficientes: os problemas mais simples de elasticidade repousam essencialmente sobre o equilíbrio dos momentos das forças, e se queremos conceber o corpo como composto por moléculas que exercem forças mútuas, estas forças não podem ser excluídas do modelo." ("Ensayos..." - pg. 241).

Na verdade, pode-se considerar que as investigações que levaram à conclusão acima estão ligadas a uma tradição de pesquisa relativamente independente e paralela à tradição newtoniana ("Ensayos..." - pg. 147). Mesmo na atualidade, os cursos de mecânica para estudantes de engenharia, com sua ênfase em estática e resistência dos materiais, pagam um tributo bem menor a Newton do que os cursos destinados aos físicos. Isto se explica facilmente: o princípio newtoniano fundamental relaciona as forças com os movimentos provocados por elas, mas como em estática não há movimento, ele se torna inútil. O que irá interessar nesse caso serão as leis de combinação das forças e as suas relações com as deformações causadas. Além disso, para termos o equilíbrio de um corpo extenso, serão necessárias duas condições independentes: a soma das forças que atuam sobre o corpo deverá ser nula, mas também deverá se anular a soma dos momentos das forças. A segunda condição corresponde ao princípio da alavanca, que é utilizado desde os tempos de Arquimedes, e que muitos tentaram deduzir da primeira, sem sucesso.

Esta linha paralela de pesquisa existia inclusive na época de Newton. Comentando um livro de Varignon, publicado no mesmo ano que o "Principia", Truesdell esclarece que "... esta antiga tradição, independente da escola newtoniana, continuava então, assim como hoje, todavia em vigor. A lei da alavanca era conhecida há muito tempo, e houve numerosas tentativas frustradas, inclusive a de Varignon, de deduzí-la a partir do equilíbrio de forças." ("Ensayos..." - pg. 147).

Também data dessa época o trabalho de Jakob Bernoulli, que tinha seus pontos fortes justamente onde a mecânica de Newton era fraca: problemas relativos a sólidos rígidos ou elásticos.

O encontro mais completo destas tendências se daria na obra de Euler: "Euler foi aluno de Johann Bernoulli (1667-1748), que tinha sido orientado por seu irmão Jakob. Portanto, Euler herdou não só a matemática de Leibnitz e dos Bernoulli mas também a tradição da estática, desenvolvida por Stevin, Huygens, e Pierre Varignon (1654-1722). Ao mesmo tempo, ele assimilou os métodos e conceitos de Newton, com sua ênfase em dinâmica e em fenômenos celestes, e, nele, as duas correntes fundamentais do pensamento em mecânica chegaram juntas." ("History of Classical Mechanics - Part I, to 1800", pg. 59 - in Naturwissenschaften, 63, pg. 53-62 (1976)).

Portanto, não é de surpreender que tenha sido Euler o descobridor da necessidade de se considerar os princípios do momento linear e do momento angular, independentemente, como leis gerais da mecânica. Contudo, foram necessários dezenas de anos para que ele chegasse a esse resultado. O grande obstáculo nesse sentido vinha da não separação entre os princípios gerais da mecânica e as equações constitutivas que caracterizam o particular material que está sendo estudado: "Em 1771, depois da publicação de seu livro sobre os corpos rígidos mas antes de seu enunciado das leis gerais do movimento, Euler por fim se deu conta de que todos os resultados sobre a elástica obtidos até aquele momento provinham das propriedades particulares da equação constitutiva ao invés dos princípios gerais da mecânica. Voltando, com efeito, ao programa de Jakob Bernoulli, lançou-se na busca das equações de equilíbrio e de movimento para um contínuo plano arbitrário, independentemente de sua constituição material. Para isto, tanto o balanço dos torques como o das forças são necessários; nenhum basta por si só." Teríamos a partir daí "... o primeiro exemplo de leis gerais da mecânica, independentes da natureza das forças mútuas e dos materiais." ("Ensayos..." - pg. 243).

Dessa maneira teriam sido lançadas as bases para a construção da estrutura teórica global da mecânica, tal como é vista hoje. De fato, se tomarmos um tratado moderno do assunto encontraremos uma afirmação semelhante: "A equação dos momentos angulares assim como a equação da quantidade de movimento é postulada para um volume individual V do meio contínuo da mesma maneira que a lei de Newton " $F = ma$ " para um ponto material. Sublinhamos todavia que a equação dos momentos angulares para um volume individual V do meio contínuo, longe de ser deduzida daquela dos momentos angulares da mecânica do sistema de pontos materiais, se revela completamente independente." (Sedov, L. - "Mécanique des Milieux Continus" - pg. 153).

Portanto, a interpretação de Mach sobre o desenvolvimento da mecânica deve ser rejeitada. Como vimos, se considerarmos a teoria como um todo, nem mesmo uma reconstrução lógica iria permitir a sua dedução a partir das leis de Newton.

4. CONCLUSÃO: A MECÂNICA CLÁSSICA É UMA CIÊNCIA VIVA

Um dos motivos que me levaram a estudar esse tema foi a

insatisfação com a concepção de Popper sobre o progresso científico e a verdade das teorias factuais. Para ele, o progresso se dá pela "... repetida derrubada de teorias científicas e sua substituição por outras melhores ou mais satisfatórias." ("Conjeturas y Refutaciones" - pg. 250). A derrubada corresponderia à falsificação das teorias e a substituição se tornaria possível quando surgisse uma teoria que estivesse mais "próxima da verdade" do que a anterior.

Não vou discutir com maior detalhe essa idéia de progresso como aproximação da verdade, que me parece basicamente correta, embora concebendo-a de uma forma diferente da de Popper. O ponto que irei questionar é o que considera a teoria superada como falsa. Popper tem uma concepção estritamente dualista sobre essa questão (as teorias são verdadeiras ou falsas), que não leva em conta a verdade parcial das teorias factuais⁽⁷⁾. Embora ele aceite que, de duas teorias falsificadas, uma possa estar mais perto da verdade do que a outra, ambas são consideradas falsas, e seriam utilizadas, quando o fossem, em termos instrumentalistas, como formalismo convenientes para o cálculo ("Conjeturas y Refutaciones" - pg. 69). Dessa forma, teríamos um grupo de teorias "aceitas hipoteticamente como verdadeiras, por enquanto", e um grupo de teorias falsas.

O que me parece problemático, é que dessa maneira, teorias que foram definitivamente abandonadas e que são consideradas atualmente como uma curiosidade histórica (caso do calórico e do éter mecânico) estariam na mesma situação de outras que são regularmente ensinadas e utilizadas, a ponto de ser inconcebível um estudante de física que não as conheça. Embora este fato não indique necessariamente que estas últimas tenham alguma característica especial, pois acredito que muitas das teorias que hoje são ensinadas regularmente serão consideradas, algum dia, como totalmente falsas, creio que em alguns casos o que temos são teorias definitivas, dentro de determinados limites. De certa maneira, o que estou afirmando é que as teorias que são consideradas falsas por Popper podem ser divididas em mortas e vivas, e que estas últimas não "merecem" a caracterização de falsas. Considerando a mecânica clássica, por exemplo, mesmo sendo concebida como uma aproximação da relatividade restrita quando a velocidade relativa dos corpos em questão é muito menor que a velocidade da luz, ela é ensinada e utilizada como verdadeira, com o reconhecimento de

que as leis supostas por ela correspondem à realidade. O fato de essas teorias serem aproximações não invalida essa afirmação, pois em todas as teorias físicas são feitas aproximações. No caso do calórico, mesmo que essa teoria explique alguns fatos, ela não po de ser considerada uma aproximação por que a substância "calórico" não existe, fato sobre o qual há um consenso total e que faz com que esta seja uma teoria abandonada. Não é esse o caso da me cânica clássica, o que indica que existe uma diferença qualitativa entre os dois tipos de teoria.

Na verdade, a mecânica clássica é uma ciência em pleno de envolvimento ainda hoje, com uma série de revistas especializadas e muitos resultados novos, tanto experimentais como teóricos, tendo vivido um significativo renascimento a partir da década de 40⁽⁸⁾. Dessa forma, parece-me mais razoável considerá-la uma teoria verdadeira, mas que apreende um aspecto parcial da realidade. A relatividade restrita corresponderia a um aprofundamento da me cânica clássica, que no entanto, conservaria algumas de suas características básicas.

A meu ver, a separação demasiadamente rígida que Popper estabelece entre teorias falsificadas e não falsificadas está ligada à uma preocupação válida que é a de resguardar a lógica de dois valores. Esse ponto é discutido por Bunge: "Parte da dificuldade que os lógicos experimentam em aceitar o conceito de verdade parcial pode ser causada pela crença errônea de que isso os forçaria a abandonar a lógica de dois valores, que é o arcabouço da matemática e da ciência. Se a todo enunciado fosse atribuído um único valor de verdade, seria realmente contraditório considerá-lo como completamente verdadeiro (ou falso) em algumas etapas de um argumento e como aproximadamente verdadeiro (ou falso) em outras. Mas contradição não ocorre se a todo enunciado factual são atribuídos dois valores de verdade diferentes, conforme a função que ele desempenha: (a) um valor lógico de verdade dependendo do seu papel em uma inferência (isto é, totalmente verdadeiro se estiver funcionando como uma premissa em uma dedução ou como uma consequência lógica de premissas previamente asseveradas) e (b) um valor factual de verdade dependendo da sua relação com seu referente." (...) "Isto corresponde à prática da pesquisa: assim, nós podemos asseverar os postulados de uma teoria física para fins de computação (dedução), mas, ao mesmo tempo, nós desconfiamos deles e estamos prontos a declarar que eles são apenas par-

cialmente verdadeiros no que se refere a fatos." (Bunge, M. - "Foundations of Physics" - pg. 29).

Essa concepção de verdade parcial permitiria tornar clara a diferença entre teorias que realmente foram falsificadas e teorias parcialmente verdadeiras que foram englobadas por outras mais abrangentes.

Quanto à mecânica, parece-me fora de dúvida que o seu contínuo desenvolvimento nos trouxe uma descrição mais completa da realidade e um conhecimento cada vez mais profundo do comportamento da matéria.

Voltando agora à questão de como se dá esse desenvolvimento, gostaria de chamar a atenção para o fato de que os textos de filosofia da ciência pouco têm se preocupado com esse aspecto. Geralmente são estudadas as relações lógicas entre os enunciados da teoria e a sua confrontação com a experiência. O ponto que estou procurando ressaltar é o que trata dos elementos especificamente conceituais das teorias, dos significados desses conceitos e do seu papel no desenvolvimento teórico. Tal estudo, que teria como ponto de partida uma semântica científica, permitiria uma maior compreensão da relação entre o formalismo de uma teoria, o que ela diz acerca do mundo, e as modificações que se processam à medida em que a teoria é desenvolvida.

A imagem corrente sobre esse processo já foi exposta anteriormente: a partir do momento em que são enunciados os princípios gerais de uma teoria, podemos desenvolvê-la por meio da dedução e obter soluções particulares para determinados problemas especificando condições iniciais adequadas.

Esse quadro é parcialmente correto, mas insuficiente, pois não dá conta da riqueza de processos que se verificam no desenvolvimento efetivo da teoria.

A "realimentação" que discuti no caso da mecânica clássica é um exemplo. Na medida em que procuramos aplicar às leis gerais a determinados casos, pode ocorrer que essas próprias leis precisem ser modificadas, refinadas ou elaboradas com maior precisão. Dessa forma, não teríamos um processo dedutivo estritamente lógico e sintático, mas também um desenvolvimento semântico, em que os conceitos básicos seriam continuamente enriquecidos à medida que a teoria enfrentasse os vários tipos de testes, como a resolução de problemas particulares, o confronto com outras teorias e os testes experimentais.

Poderíamos fazer uma analogia com o crescimento de uma árvore: há um aumento do número de ramos (resultados obtidos), mas, à medida que isso ocorre, temos também um crescimento das raízes e o tronco torna-se mais encorpado, aumentando a solidez do sistema como um todo.

Quero deixar claro que essa discussão não pretende desvalorizar a necessidade da estruturação das teorias em uma forma dedutiva rigorosa. Creio que, assim como a busca da verdade, essa é uma das características básicas das ciências exatas. O que estou procurando ressaltar são os seguintes pontos: (1) que essa estrutura dedutiva rigorosa não corresponde simplesmente a uma enumeração das fórmulas básicas da teoria e das suas consequências, mas envolve também uma elucidação das suposições semânticas assumidas pela teoria; (2) que é preciso distinguir entre uma teoria considerada estatisticamente num certo estágio do seu desenvolvimento (onde o significado dos seus conceitos pode ser considerado como estabelecido e flui das fórmulas básicas para as derivadas) e a evolução dinâmica dessa teoria, quando os significados dos conceitos pode ser modificado à medida que essas fórmulas são relacionadas com casos particulares, outras teorias, etc..

Esses dois aspectos estão presentes na história da física, mas não se apresentam separadamente, pois a ciência trabalha com idéias que estão sendo forjadas e aplicadas simultaneamente. Somente uma reflexão posterior irá esclarecer esse duplo caráter da teoria e irá permitir uma compreensão mais nítida de quais passam a ser os seus conceitos e princípios básicos quando ela é desenvolvida e atinge um novo patamar, e quais as idéias que foram aprofundadas ou abandonadas nesse processo.

Nos textos didáticos, geralmente é apresentado apenas o aspecto estático da teoria, e quando se aborda o seu desenvolvimento são tratados exclusivamente aqueles casos que acarretaram uma modificação profunda na sua estrutura, o que geralmente é atribuído a alguma "experiência crucial". Dessa maneira, se reforça o binômio "experiência + dedução", característico da visão positivista das teorias.

Nesse quadro, o papel das idéias e da imaginação no desenvolvimento científico seria muito pequeno.

Um dos pontos que aproxima Truesdell e Bunge é que eles procuram recuperar esse papel, realçando o aspecto conceitual das teorias e defendendo a sua estruturação axiomática rigorosa. Es

se é um esforço de grande atualidade, pois mesmo a mecânica clássica só atingiu esse estágio em 1959, com um artigo de W. Noll - "The foundations of classical mechanics in the light of recent advances in continuum mechanics". Nesse trabalho, Noll procura especificar os axiomas que irão caracterizar o conceito primitivo de força, o que mostra que mesmo um dos conceitos mais antigos da mecânica está sendo, ainda hoje, objeto de estudo e refinamento. Segundo Truesdell: "Na atualidade, com respeito às forças, chegamos aproximadamente à situação em que estávamos há cen anos com respeito aos números. Ao que parece é só desde há pouco que alguém sentiu a necessidade de definir com precisão as forças fazendo constar todos os axiomas que elas satisfazem, e de fato, permanece sem ser resolvida a questão de se os axiomas até o momento propostos são na verdade suficientes para caracterizar as forças como distintas de outros tipos mais gerais de vetores." ("Ensayos..." - pg. 296).

Deve-se ressaltar que essa preocupação com o rigor não corresponde à uma postura acadêmica, de se atingir a forma "ideal" para as teorias, mas apresenta resultados concretos em termos de investigação. Um exemplo disso é o que relaciona a mecânica estatística com as teorias de meios contínuos: "Até há pouco, a mecânica estatística de fluidos, por exemplo, se considerava como diferente e se supunha mais precisa que as teorias que representam aos fluidos como contínuos." ("Ensayos..." - pg.330). No entanto, investigações recentes, entre as quais se destaca o trabalho de Noll, levaram ao seguinte resultado: "Considerando um fluido ou um sólido como um conjunto de moléculas, é impossível derivar nada que esteja em contradição com a imagem da matéria como contínua. Reciprocamente, não há nada na imagem da matéria como um meio contínuo que não seja também acessível a uma representação molecular." ("Ensayos..." - pg. 330). Ou seja, houve uma unificação das imagens discreta e contínua da matéria, que só se tornou possível a partir desse desenvolvimento conceitual da mecânica nos últimos trinta anos.

Finalizando, poderíamos resumir da seguinte maneira os pontos discutidos:

1) A mecânica clássica não é uma teoria falsa e ultrapassada cujo estudo mais recente se limite ao cálculo de alguns detalhes visando aplicações técnicas.

2) O seu desenvolvimento posterior a Newton é bem mais ri

co e profundo do que a tradição positivista tem feito pensar e não se resume a um processo puramente dedutivo a partir dos princípios newtonianos.

3) As concepções de Truesdell e Bunge, realçando os aspectos conceituais das teorias e defendendo a sua axiomatização rigorosa, podem trazer uma nova compreensão sobre os fundamentos e o desenvolvimento das teorias científicas.

4) A pesquisa dos fundamentos da mecânica clássica é atual e chegou a vários resultados importantes, tendo experimentado um significativo renascimento nos últimos trinta anos.

5) Esse tipo de análise pode aprofundar nosso conhecimento não só da física clássica como também da física moderna, cuja exposição atualmente é bastante confusa, misturando conceitos teóricos com aspectos experimentais, analogias e apelos psicológicos, que, se são compreensíveis como recursos didáticos, podem ser muito prejudiciais quando se trata de compreender o verdadeiro caráter das teorias físicas.

NOTAS

- (1) No início do século dezoito a Basileia se constituiu no centro mais desenvolvido de pesquisa matemática da Europa. Seus nomes principais eram os Bernoulli e Euler. Na família Bernoulli, cerca de doze membros conseguiram destaque em matemática ou física, sendo os mais conhecidos Jakob e Johann (em espanhol, Jaime e Juan). Ver, por exemplo, os capítulos 20 e 21 da "História da Matemática", de Carl B. Boyer.
- (2) Essa avaliação da influência de Newton na época e a afirmativa de que o "Principia" corresponderia a "uma obra de caráter retrospectivo" são algumas das informações discutíveis de Truesdell. No entanto, para os propósitos desse artigo, essas questões não são relevantes, pois o que será discutido é o desenvolvimento da mecânica posterior a Newton.
- (3) Deve-se considerar que, para Truesdell, os termos "experiência" e "matemática" têm um significado distinto do que é usual entre os filósofos da ciência. Para estes, em geral, a experiência está relacionada com dados dos sentidos ou com opera

ções de medida. Por sua vez, a matemática é considerada uma ciência "formal", que trata de conceitos abstratos que não se referem a entidades reais ou elementos experimentais. Já Truesdell tem uma concepção toda particular, como pode se ver nas seguintes afirmativas: "... a mecânica racional é uma parte da matemática." (...) "... a matemática, por muito abstrata ou muito precisa que seja, é uma ciência da experiência, pois esta não se limita aos torpes sentidos: a mente humana também é capaz de ter experiências..." (...) "... qualquer disciplina expressa mediante símbolos matemáticos é em última instância suscetível de possuir uma existência matemática independente." ("Ensayos..." - pgs. 305 e 306). Creio que essa visão confusa de Truesdell se deve ao desenvolvimento insuficiente de uma semântica da ciência, que torne claras as relações entre os símbolos usados na teoria e os seus referentes. Dentro da tradição positivista, os significados dos conceitos geralmente são associados a processos de medida, ou seja, há uma confusão entre os referentes de uma teoria (semântica) e aspectos experimentais (testabilidade). Voltarei a esse ponto mais tarde.

- (4) Creio que a principal diferença é que a massa é uma grandeza constante e o momento de inércia pode não sê-lo, pois é uma função de massa e da distância ao eixo considerado.
- (5) Dentro do positivismo, em suas várias versões, sempre houve uma tendência para desvalorizar os aspectos especificamente conceituais das teorias. Isso foi feito basicamente de duas maneiras: uma primeira afirmava que todo conceito teórico podia ser reduzido aos termos observacionais da teoria (dados dos sentidos ou operações de medida). Uma segunda visão admitia a existência de termos estritamente teóricos, mas afirmava que estes só adquiriam significado à medida que fossem relacionados com os termos observacionais. Nesses pontos, a ceito plenamente as críticas desenvolvidas por Mário Bunge em vários trabalhos, e que estão condensados no artigo "The axiomatic method in physics", do livro "Method, Model and Matter".

No que se refere à tentativa de relacionar os conceitos teóricos com os "dados dos sentidos", a crítica principal é que estes não aparecem nas teorias físicas. De fato, não co nheço nenhuma que contenha termos tais como "quente" ou "a-

zul", que estariam mais bem colocados em teorias psicológicas sobre a percepção humana.

Por outro lado, as concepções que procuram relacionar, total ou parcialmente, os termos teóricos com operações de medida (operacionalismo) são bem mais influentes e parecem mais convincentes. De fato, termos tais como "temperatura" ou "comprimento de onda" surgem no corpo da teoria e existem processos que permitem medir essas grandezas. Contudo, é preciso não confundir o conceito com a sua medida experimental. Os conceitos são abstrações que muitas vezes não têm contrapartida em termos observáveis ou possíveis medidas (por exemplo: ponto material). Os conceitos são funções, enquanto suas medidas fornecem apenas valores discretos. Os conceitos são gerais, enquanto os seus processos de medida são sempre particularizados, envolvendo determinados instrumentos. (Na verdade, a própria teoria à qual pertence o conceito geralmente é pressuposta quando se constrói um aparelho para medi-lo. A lêm disso, geralmente são necessárias outras teorias para justificar o funcionamento do aparelho - por exemplo: um amperímetro que utilize uma mola está pressupondo a mecânica clássica).

Foi tendo em vista essas concepções que afirmei que um positivista poderia considerar satisfatória a posição de Mach. Realmente, se ele considera que os únicos elementos significativos na teoria são as observações, sendo o restante constituído apenas por uma estrutura dedutiva (relações formais entre símbolos), os aspectos da evolução conceitual que discutí até agora poderiam ser considerados meramente uma reformulação dos símbolos.

De minha parte, parece-me muito mais natural uma visão semelhante à de Bunge. Vamos analisar o que estamos representando quando escrevemos um determinado símbolo em uma equação da teoria, por exemplo, quando escrevemos o símbolo \vec{E} em uma equação do eletromagnetismo. São muitas as vezes em que esse símbolo é utilizado sem que se esteja cogitando de realizar sua medida, sendo comuns as situações em que esta medida é impossível. (Por exemplo, para equações do campo elétrico no interior de uma estrela). Portanto, não estou representando processos de medida ao utilizar esse símbolo.

Creio que o papel do símbolo na teoria é duplo. Em pri-

meiro lugar, ele se refere a um membro arbitrário de uma determinada classe de objetos. No nosso caso, o vetor \vec{E} nos remete para um campo elétrico que estamos supondo em uma dada situação, que deve ser caracterizada pelas equações, para analisarmos seu comportamento e seus efeitos. Isso corresponde à referência do conceito.

Em segundo lugar, ao utilizar um símbolo em uma equação, estamos considerando implícitas no símbolo uma série de propriedades dos objetos que ele representa. Essas propriedades seriam caracterizadas por outras equações, e seriam o elo que me permitiria relacionar grandezas utilizando esse símbolo. Esse aspecto corresponderia ao sentido do conceito.

Para Bunge, o significado do conceito pode ser definido como o par ordenado constituído pelo seu sentido e sua referência. Essa posição me parece bastante adequada tendo em vista a utilização que fazemos dos conceitos ao trabalharmos com uma teoria física.

Uma das consequências dessa visão é que as mudanças nos significados dos conceitos acarretariam uma mudança na teoria, mesmo que a sua estrutura formal permanecesse a mesma.

No caso do estudo de Euler, de 1752, houve uma reformulação formal das leis de Newton, um refinamento de alguns conceitos e a introdução de outros. Portanto, não se tratou de uma aplicação das leis, mas de um verdadeiro aprofundamento da teoria.

- (6) Existe uma visão "reducionista" bastante disseminada, segundo a qual todo problema físico do contínuo pode ser tratado como o caso limite de um problema de partículas. No caso da mecânica do contínuo, mesmo que no futuro suas leis possam vir a ser obtidas pelo desenvolvimento da mecânica quântica estatística, creio que seu estudo como uma teoria independente se justifica porque ela corresponde à um determinado nível de organização da matéria, com suas próprias leis e conceitos. Como afirma Bunge: "... leis macroscópicas, embora em princípio deduzíveis de leis microscópicas, não se reduzem ontologicamente a elas mas constituem uma novidade emergente...", pois afirmar que, em última instância, "... existem apenas partículas, é tão falso como afirmar que não existem homens mas apenas átomos." (Foundations of Physics" - pg. 144 e 145).

- (7) Nas ciências formais, como a lógica e a matemática, trabalhamos com um conceito bivalente de verdade. Porém, essas teorias não tratam de questões de fato. Nas ciências factuais, como a física, além da sua estrutura dedutiva precisamos avaliar também a sua semântica, ou seja, a adequação de conceitos e enunciados às entidades e fatos correspondentes. Nesse aspecto é inevitável a utilização de um conceito de verdade parcial, pois a teoria nunca irá esgotar a riqueza de processos e possibilidades da realidade. Uma tentativa nesse sentido pode ser encontrada no "Tratado de Filosofia Básica" - Vol. 2 - Semântica II - de Bunge.
- (8) Sobre esse ponto, ver Truesdell - "History of Classical Mechanics" - Part II, the 19th and 20th Centuries - in Naturwissenschaften, 63, pg. 119-130 (1976), assim como os artigos "Reacciones de la História de la Mecánica sobre la Investigación Moderna" e "Avances recientes en la Mecánica Racional", nos "Ensayos de Historia de la Mecánica".