
DOS “PRINCIPIA” DA MECÂNICA AOS “PRINCIPIA” DE NEWTON¹

João Zanetic
Instituto de Física – USP
São Paulo – SP

I. Introdução

O escritor argentino Jorge Luis Borges, em um de seus escritos, afirma que em cada período histórico um autor inventa os seus predecessores. Pode-se dizer que, com a publicação dos “Principia” de Isaac Newton, há exatamente trezentos anos, ou, melhor ainda, com a aceitação da mecânica newtoniana, a partir do século XVII, inicia-se uma espécie de “arqueologia” do pensamento pré-newtoniano, buscando descobrir as raízes, as fontes de inspiração, os personagens, os acontecimentos históricos, enfim, todo o clima que permitiu o nascimento da mecânica moderna.

Quando a mecânica newtoniana é abordada nos diferentes cursos, tanto no ensino médio quanto nos cursos introdutórios à universidade, os predecessores, os contemporâneos, o “Principia”, os sucessores, e mesmo o próprio Newton, desaparecem do cenário.

Neste artigo, procurarei apresentar um esboço breve e parcial de alguns elementos históricos com o intuito de oferecer um pano de fundo que possa ser útil nos cursos introdutórios de mecânica que, quase sem exceção, limitam-se meramente à apresentação e ao treinamento dos aspectos técnicos relacionados com as leis de Newton, ou seja, a enunciação de suas leis, suas relações matemáticas, a solução de problemas clássicos e aplicações práticas, muitas vezes artificiosas. É claro que não se deve e não se pode menosprezar a importância desse procedimento; porém, sua exclusividade é danosa, limitada, pouco criativa e falsa no sentido cultural mais amplo que possa permitir uma compreensão do processo dinâmico presente na construção de teorias, sua aceitação e influência nos trabalhos que lhes sucedem.

¹ Versão modificada de intervenção na mesa-redonda “Os 300 anos do Principia” (XXXIX SBPC, Brasília, 18/07/87) e no “I Ciclo de Seminários sobre História da Ciência” (Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 29/10/87).

II. Antecedentes e antecessores

Ao tratar dos acontecimentos e personagens que precedem o nascimento da mecânica, o ponto de partida pode ser situado nas mais variadas épocas, algumas dezenas de anos antes de Newton ou duas dezenas de séculos antes de Copérnico.

Um breve resumo do pensamento grego pode ser importante, na medida em que tanto Copérnico vai ser considerado herdeiro desse pensamento, quanto o desenvolvimento do conhecimento científico efetuado durante a Idade Média vai se constituir em uma sucessão de comentários sobre os trabalhos dos gregos, particularmente do pensamento de Aristóteles. Caso se queira iniciar pelos gregos, será útil que, pelo menos, os seguintes aspectos, cruciais nesse contexto⁽¹⁾, sejam destacados:

i) Uma apresentação sucinta dos elementos gregos, partindo da pergunta revolucionária de Tales de Mileto: de que matéria-prima fundamental é constituído o Universo?

ii) A astronomia grega, com suas esferas de cristal carregando os corpos celestes e as construções geométricas que “salvavam as aparências” de seus movimentos; a imobilidade da Terra no centro do Universo e os problemas que o geocentrismo não conseguia resolver a contento como, por exemplo, o movimento retrógrado dos planetas;

iii) as medidas do tamanho do universo realizadas por diferentes pensadores; em particular, a engenhosidade de Aristarco de Samos, que também foi um dos pioneiros do heliocentrismo;

iv) a concepção de movimento local de Aristóteles, com as categorias de movimento natural e violento, o lugar natural dos graves, o caráter não-inercial de sua física (velocidade de um corpo sempre proporcional à força e inversamente proporcional à resistência).

É muito comum, na apresentação dos precursores da mecânica, falar-se da separação de quase dois mil anos entre os trabalhos de Aristóteles e o “*De revolutionibus*”, de Copérnico, ficando a impressão de que a revolução científica vitoriosa no século XVII nasceu em um vazio intelectual, em uma versão meramente descritiva e ingênua do mecanismo celeste e na ausência de comentários inteligentes sobre e além da construção da visão de mundo estabelecida pelos gregos.

A Idade Média tem muito a nos ensinar sobre a nova física que nasce a partir dos trabalhos de Galileu, Kepler e Descartes. Aliás, como mostra Alexandre Koyré, Galileu pode muito bem ser considerado um bom exemplo sintetizador das principais vertentes do pensamento físico medieval, pois, na sua trajetória, que o

levaria a publicar, quase ao fim da vida, duas obras fundamentais sobre o nascimento da mecânica, ele atravessa três fases bem distintas:

i) fase aristotélica: quando Galileu ainda aceita as categorias de movimento de Aristóteles;

ii) fase do *impetus*: em que domina a imaginação de Galileu o conceito de *impetus*, encontrado inicialmente no grego Hiparco, que vai renascer no século VI com Philoponus e sucessivamente modificado por inúmeros pensadores medievais; e

iii) fase galilaica: quando Galileu encontra seu caminho mais criativo, que o aproxima da física matemática e experimental⁽²⁾.

Desta forma, o referencial teórico inicial é a física aristotélica, seja para utilizá-la como instrumento, seja para criticá-la em seus fundamentos.

Philoponus, criticando a concepção aristotélica, vai estabelecer a dependência da velocidade com a diferença entre força e resistência, e não com a razão entre essas duas grandezas. Essa inovação vai permitir a consideração da possibilidade do movimento no vácuo, impossível na visão de Aristóteles. Eis uma frase de Philoponus em que ressurge o conceito de *impetus*, também denominados de força impressa:

É necessário assumir que alguma força motora incorpórea é fornecida ao projétil pelo movente, e o ar colocado em movimento contribuirá muito pouco ou realmente nada para movimento do projétil⁽³⁾.

É possível “explicar” vários fenômenos com esse conceito, como, por exemplo, a queda dos corpos. Galileu vai descrever em detalhe várias formulações da queda dos corpos (por que aceleram?) utilizando essa concepção de *impetus*, uma força impressa que se esvai. Galileu vai chamar esse *impetus* não permanente de virtude motriz e o comparar com a virtude sonora ou com a virtude térmica⁽⁴⁾.

Nesta seqüência de pensadores medievais, poderíamos citar outro personagem que vai desempenhar forte influência em Galileu e seus contemporâneos. Trata-se de Buridan, que viveu no século XIV.

Buridan vai utilizar um conceito de *impetus* diferente do de seus predecessores. Para ele, o *impetus* não permanece apenas por algum tempo agindo sobre o corpo, ao contrário, ele é permanente, não se esvai. Segundo A. Franklin, “o conceito de ‘*impetus*’ de Buridan parece muito similar ao ‘*impeto*’ de Galileu e à ‘*quantité de mouvement*’ de Descartes”⁽⁵⁾. Traduzindo seus termos em linguagem moderna, pode-se dizer que, para Buridan, o *impetus* seria proporcional à massa e à velocidade do corpo.

Para um autor que desenvolveu todo seu pensamento físico, trezentos anos antes de Galileu, a citação seguinte, na qual Buridan “explica” porque um corpo em queda acelera, é digna de nota:

Destas razões segue que se deve imaginar que um corpo pesado adquire movimento não apenas devido ao seu principal movente, a gravidade, mas que ele também adquire para si próprio um certo impetus com aquele movimento. Este impetus tem o poder de mover o corpo pesado em conjunção com a gravidade natural permanente. E porque esse impetus é adquirido em comum com o movimento, quanto mais rápido for o movimento, maior e mais forte será o impetus. Assim, portanto, no início o corpo pesado é movido apenas por sua gravidade natural; portanto é movido vagarosamente. A seguir é movido pela mesma gravidade e pelo impetus adquirido ao mesmo tempo; conseqüentemente, move-se mais rapidamente. E como o movimento se torna mais rápido, o impetus se torna maior e mais forte e, portanto, o corpo pesado move-se sob a ação de sua gravidade natural e desse impetus maior, simultaneamente, e assim de novo se moverá mais rapidamente; e assim ele será sempre e continuamente acelerado até o fim⁽⁶⁾.

Alguns autores ousam afirmar que Buridan teria chegado ao princípio da inércia e à conservação do momento. Porém, parece que Buridan entendia o *impetus* mais como causa do movimento, isto é, com função similar à de uma força, do que como efeito do movimento, mais próximo do conceito de momento. De qualquer forma, com seu conceito de *impetus*, Buridan aproxima-se bastante de uma física inercial.

No início do século XV, Nicolau de Cusa utiliza esse conceito desenvolvido por Buridan para explicar o movimento das esferas celestes: é o *impetus* circular desempenhando seu papel. Entre outras considerações, Cusa chega a discutir a possibilidade do movimento perpétuo sobre uma superfície terrestre perfeitamente lisa. De novo, mais uma idéia que Galileu vai utilizar mais tarde em seus estudos.

Embora muitos outros autores pudessem ser aqui mencionados, percebe-se, do que foi acima dito, o quanto Galileu, seus contemporâneos e Newton são devedores desses pensadores medievais, totalmente ausentes nos textos didáticos. É importante lembrar também que esses autores não foram “populares” sequer na época em que viveram, já que, durante todo esse período, a concepção dominante de visão de mundo ainda era a aristotélica.

Finalizando esta seção, acrescento que Pièrre Duhem traça uma linha

de separação entre a ciência moderna e a ciência antiga no instante em que Buridan concebeu sua teoria do *impetus*, abandonando a idéia de que as estrelas eram postas em movimento por determinadas inteligências divinas. Buridan introduziu ainda a idéia de que tanto os movimentos celestes quanto os terrestres estão sujeitos às mesmas leis mecânicas⁽⁷⁾.

III. A revolução copernicana e sua influência

No contexto deste artigo, os trabalhos de Copérnico aparecem, nesse período, como algo separado e especial, mas de crucial importância para o nascimento da mecânica.

Na sua tentativa de recuperar a harmonia celeste presente nos trabalhos dos pitagóricos, Copérnio se enquadra como herdeiro direto de pensadores gregos que, já à época de Aristóteles, iam contra a maré, particularmente Aristarco de Samos, que propôs um primeiro modelo heliocêntrico para o universo.

Copérnico é uma figura típica do Renascimento. Ele vai romper com a estrutura geocentrista já no início do século XVI escrevendo, em 1510, uma pequena obra que distribui entre amigos e conhecidos, na qual ele apresenta um breve sumário de suas hipóteses sobre o movimento dos corpos celestes. Esse “*Commentariolus*”, que passou quase despercebido quando de sua divulgação, vai se constituir no plano básico do livro “*De Revolutionibus*”, que Copérnico manda publicar em 1543, ano de seu falecimento.

O “*De Revolutionibus*” apresenta a solução de inúmeros problemas que eram insolúveis pelo sistema geocêntrico; assim é que o problema do movimento retrógrado dos planetas, a estranha companhia que Mercúrio e Vênus faziam ao Sol, ou a ordem dos planetas a partir do Sol, ilustram a força desse novo paradigma no início de sua articulação.

Embora rompendo com a astronomia aristotélica, Copérnico não rompe com as categorias de movimento apresentadas pela física de Aristóteles, mantendo as concepções de movimentos naturais e violentos. No entanto, ele deixa entrever avanços importantes na compreensão do movimento quando, por exemplo, admite que um mesmo corpo pode estar sujeito a dois movimentos ao mesmo tempo, como pode ser verificado na citação seguinte:

Temos que admitir que o movimento de queda e de subida dos corpos é um movimento dual com relação ao universo, e é não menos que uma composição do movimento retilíneo com o movimento circular. Pois as partes que caem devido ao seu próprio peso, desde que constituídas do elemento terra, indubitavelmente mantém a mesma natureza como o todo. O mesmo se

aplica para as coisas que são atiradas para cima devido a forças associadas à sua própria natureza⁽⁸⁾.

Embora minoritária à época que surge, essa visão de mundo, posta em movimento de forma mais organizada por Copérnico, vai influir decisivamente sobre muitos pensadores dos séculos XVI e XVII. Por exemplo, a idéia de atração, sutilmente presente no “De Revolutionibus” para responder pelo acompanhamento por parte da atmosfera do movimento da Terra, vai ser trabalhada por pensadores, muitos dos quais ausentes nos textos escolares. Um exemplo de um desses pensadores é Girolamo Fracastoro, que, por volta de 1570, escreveu o seguinte:

Quando duas partes do mesmo todo são separadas entre si, cada uma envia na direção da outra uma emanção de sua forma substancial, uma espécie⁽⁹⁾ se propaga no espaço intermediário; pelo contato desta espécie, cada uma das partes tende em direção à outra a fim de se unirem num todo único; este é o modo de explicar a atração mútua do igual com o igual, a simpatia do ferro pelo imã constituindo um bom exemplo⁽¹⁰⁾.

Essa mesma idéia vai ser mencionada por William Gilbert, em 1600, no seu livro “De Magnete”, quando ele imagina a Terra como um grande imã do qual emana uma “alma” responsável pela atração dos corpos à sua volta.

IV. Kepler, Galileu e Descartes

Os personagens desta seção têm nomes mais conhecidos, mas nem por isso o tratamento costumeiramente adotado para o ensino da mecânica deixa claro o papel por eles desempenhado neste ramo da Física.

O final da seção anterior dá espaço para a entrada em cena de Kepler, conhecido pelas três leis que levam o seu nome, mas que foi responsável pela enunciação e esclarecimento de idéias básicas para o desenvolvimento da mecânica. Desta forma, quando atingiu a enunciação da que é hoje conhecida como sua segunda lei, isto é, que o raio vetor que une o planeta ao Sol descreve áreas iguais em tempos iguais, Kepler, utilizando os dados de Tycho Brahe, descobriu que os planetas não se moviam com velocidade uniforme, mas, sim, com velocidade inversamente proporcional à sua distância ao Sol. Ou seja, Kepler supõe a existência de uma força reguladora responsável pelas flutuações nas velocidades dos planetas. Ele verificou esse fenômeno para Marte e imediatamente estendeu sua conclusão para todos os demais planetas. Certamente, aqui há forte influência de seus contemporâneos, como William Gilbert, por exemplo. É esse tipo de raciocínio que leva Kepler a não aceitar o artifício desenvolvido pelos gregos e utilizado também por Copérnico; trata-se do epícolo. Kepler não podia aceitar a idéia

de um planeta girando em torno de um ponto geométrico “vazio”, isto é, sem ter uma fonte responsável pelas emanações que o atraíam para a sua órbita fechada. É ilustrativa, nesse sentido, a seguinte citação, que foi extraída de sua “Astronomia Nova”, publicada em 1609:

Logo, é claro que a doutrina tradicional acerca da gravidade está errada... A gravidade é a tendência corpórea mútua entre corpos cognatos (isto é, materiais) para a unidade ou contato de cuja espécie é também a força magnética, de modo que a Terra atrai uma pedra, muito mais do que uma pedra atrai a Terra...

Supondo que a Terra estivesse no centro do mundo, os corpos pesados seriam atraídos, não por estar ela no centro, mas por ser um corpo cognato (material). Segue-se que independentemente de onde colocarmos a Terra... os corpos pesados hão de procurá-la sempre...

Se duas pedras fossem colocadas em qualquer lugar do espaço, uma perto da outra, e fora do alcance da força de um terceiro corpo cognato, unir-se-iam, à maneira dos corpos magnéticos, num ponto intermediário, aproximando-se cada uma da outra em proporção à massa da outra.

Se a Terra e a Lua não estivessem mantidas nas respectivas órbitas por uma força espiritual ou qualquer outra força equivalente, a Terra subiria em direção à Lua, um cinqüenta e quatro avos da distância, cabendo à Lua descer as restantes cinqüenta e três partes do intervalo, e assim se uniriam...

Se a Terra cessasse de atrair as águas do mar, os mares se ergueriam e iriam ter à Lua...

Se a força de atração da Lua chega à Terra, segue-se que a força de atração da Terra, com maior razão, vai até a Lua e ainda mais longe...⁽¹¹⁾

Além disso, Kepler, desta vez provavelmente devido à influência da meticulosidade observacional de Tycho Brahe, do qual herdou os dados, apresenta uma característica importante para o desenvolvimento da mecânica, ou seja, o cuidado com a precisão das medidas. É exatamente esse cuidado que o leva à sua primeira lei: desvios de oito minutos entre uma órbita circular para o planeta Marte e as observações de Tycho levam-no, para seu desespero, a abandonar o círculo em favor da elipse. Aliás, na construção das órbitas da Terra e de Marte, Kepler dá mostra de toda sua genialidade, do uso de sua intuição, testemunhando “... que o

conhecimento não se inspira unicamente na simples experiência, mas fundamentalmente na analogia entre a concepção do homem e a observação que faz”⁽¹²⁾.

Enquanto isso, na Itália, Galileu vai fazer avançar o desenvolvimento da mecânica em outras direções que, apesar de ele e de Kepler não terem tomado totalmente consciência disso, por falta de uma adequada comunicação entre ambos, vão representar aspectos complementares cruciais e que vão dar a base mais importante para a síntese de Newton, algumas décadas depois.

Como já foi dito brevemente na segunda seção deste artigo, Galileu vai elucidar muitas questões abordadas pelos físicos medievais. Por exemplo, ele vai ser bem sucedido na explicação da queda dos corpos, fenômeno com o qual ficou preocupado durante várias décadas e sobre o qual escreveu largamente até chegar à sua obra final, os “Discursos”, na qual encontramos sua famosa proposição/teorema:

Se um móvel, partindo do repouso, cai com um movimento uniformemente acelerado, os espaços por ele percorridos em qualquer tempo estão entre si na razão dupla dos tempos, a saber, como os quadrados desses mesmos tempos⁽¹³⁾.

Galileu também vai dedicar muito tempo para o estudo dos corpos celestes com o seu rudimentar telescópio, conseguindo, em 1610, alguns efeitos notáveis: observa quatro satélites do planeta Júpiter e os vales e crateras da superfície da Lua, colocando dificuldades intransponíveis para os aristotélicos. Aliás, é provável que Galileu, então com quarenta e seis anos, apenas após essas fortes evidências resolva assumir definitivamente de público sua defesa do sistema copernicano.

Embora o título de “pai da física experimental” muitas vezes dado a Galileu possa ser exagerado, uma vez que ele, segundo alguns historiadores, como A. Koyré, por exemplo, realmente não deve ter realizado todas as experiências a ele atribuídas, é evidente e notável a sua contribuição no desenvolvimento da física experimental.

Ao lado desse aspecto, Galileu também inovou no tocante à utilização de experiências de pensamento que, a partir de então, vão desempenhar um papel importante no desenvolvimento da física.

E a lei da inércia? Para tratar deste assunto, A. Koyré dedicou mais de duzentas páginas de seu livro “Estudos Galilaicos”, procurando mostrar que, apesar de Newton atribuir a Galileu a lei da inércia, este certamente quase chegou a ela. Isso pode ser exemplificado utilizando uma citação dos “Diálogos” de Galileu:

Salviati – Então, para uma superfície não ser considerada inclinada para cima ou para baixo, todas as suas partes devem ser equidistantes do centro. Existem tais superfícies no mundo?

Simplicio – Muitas delas; por exemplo, a superfície de nosso globo terrestre se ele fosse liso, e não rugoso e montanhoso como é. Há também aquela da água quando está plácida e tranqüila.

Salvati – Então o barco que se move sobre o mar calmo é um exemplo de um móvel que se desloca sobre uma superfície que não está inclinada nem para cima nem para baixo, e se todos os obstáculos externos e acidentais forem removidos, ele se disporá a se movimentar incessantemente e uniformemente a partir de um determinado impulso recebido⁽¹⁴⁾.

Com raciocínios semelhantes a este descrito no diálogo acima, Galileu deixa claro que não consegue se libertar da gravidade em suas conjecturas sobre o movimento, como também é importante o fato de considerar como superfície horizontal real uma superfície esférica, como é o caso da superfície terrestre. Galileu chega à inércia circular, porém ele não enuncia o princípio da inércia como o conhecemos hoje. Ele não chega, portanto, à inércia linear, à conservação da quantidade de movimento.

A “quantité de mouvement” vai ser introduzida definitivamente na mecânica por René Descartes. Conhecido por ter algum dia proferido o “penso, logo existo”, ou ainda pela larga utilização do “sistema cartesiano de coordenadas”, Descartes é mais um ilustre desconhecido dos nossos textos de Física.

Descartes, tal qual Galileu, estudou durante muito tempo tanto o problema da queda dos corpos quanto aquele relacionado com a lei da inércia, e isto mais ou menos ao mesmo tempo em que Galileu neles trabalhava. Enquanto este aparentemente não tomou conhecimento da obra cartesiana, Descartes, em correspondência com amigos, faz menção dos trabalhos de Galileu.

Descartes não consegue ser bem sucedido na análise da queda dos corpos. A “geometrização” excessiva, na linguagem de A. Koyré, pela qual o jovem Galileu também padecera, leva Descartes a conceber o movimento uniformemente acelerado como aquele em que a velocidade cresce proporcionalmente à distância percorrida. O ‘congelamento’ geométrico do movimento de queda leva-o a fazer desaparecer o tempo de suas conjecturas.

Para compensar esse insucesso, Descartes consegue enunciar o princípio da inércia. A citação a seguir, extraída de seu “Princípios de Filosofia”, serve como ilustração de seu pensamento:

Também do fato de Deus não estar nada sujeito a mudar, e atuar sempre da mesma maneira, podemos chegar ao conhecimento de certas regras, a que eu chamo leis da natureza, e que são as causas segundas... dos diversos movimentos que obser-

vamos em todos os corpos... A primeira é que cada coisa em particular... continua a estar no mesmo estado tanto quanto é possível, e que nunca o muda senão através do encontro com outras. Assim, todos os dias vemos que, quando alguma parte dessa matéria é quadrada,... continua sempre quadrada, se não acontecer nada que mude a sua figura; e que, se está em repouso,... de modo algum começa a mover-se por si mesma. Mas desde que tenha começado a mover-se, também não temos qualquer razão para pensar que ela alguma vez tenha de deixar de se mover com a mesma força... enquanto não encontrar nada que retarde ou que faça parar o seu movimento. De maneira que, se um corpo começou a mover-se temos de concluir que ele depois disso continua a se mover, e que nunca pára por si próprio⁽¹⁵⁾.

Com isto, temos um pálido retrospecto de alguns momentos importantes do desenvolvimento da mecânica pré-newtoniana. Alguns dos predecessores de Newton, que uma moderna história da ciência está resgatando a fim de detectar as origens de sua síntese, não podem ser ignorados.

V. Newton

Meio século após a publicação dos “Discursos”, último trabalho de Galileu, é impressa a primeira edição, ainda em latim, do livro “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica”, a grande síntese da mecânica de Isaac Newton. Essa obra é dividida em três partes que podemos sucintamente resumir da seguinte forma:

Livro 1

Assunto central – leis gerais do movimento dos corpos sujeitos à ação de forças centrais; na primeira metade aborda o movimento de um ou dois corpos no vazio; na segunda metade aborda o problema de três corpos.

Livro 2

Assunto central – estudo do movimento nos meios resistivos: dependência da resistência com a velocidade, fundamentos da hidrostática e corpos flu-

tuantes, movimento do pêndulo, movimento de líquidos em tubos e movimento de projéteis.

Livro 3

Assunto central – o “sistema do mundo”, ou seja, o movimento dos planetas, o movimento da Lua e suas anomalias, a aceleração da força gravitacional, o problema das marés, etc.

Embora publicado em 1687, o “Principia” contém parte da física a que Newton se dedicou nos vinte e cinco anos anteriores, desde pouco depois da sua admissão no Trinity College da Universidade de Cambridge, em 1660, quando estava com a idade de dezoito anos. Newton inicia aí seus primeiros estudos de matemática e ciência, travando contato com o conhecimento desenvolvido pelos seus predecessores. Como observa Fontenelle⁽¹⁶⁾, Newton passou os olhos pelos teoremas de Euclides e mergulhou na “Geometria” de Descartes, na “Óptica” de Kepler e, certamente, nas obras de Galileu e de tantos outros estudiosos, alguns dos quais já foram mencionados neste artigo, o que é confirmado pela famosa frase contida em uma carta de Newton a Robert Hooke: “*Se consegui enxergar mais longe, é porque estava apoiado sobre ombros de gigantes*”.

E, assim, Newton inicia a formulação dos princípios da mecânica que vão ser sintetizados nas suas três leis do movimento e na lei da gravitação universal, e aplicados na solução de inúmeros problemas, compondo os três livros que vão constituir os “Principia”, como descrito acima.

Ernst Mach, no seu livro sobre a ciência da mecânica, escrito no final do século XIX, escreve o seguinte:

... 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⁽¹⁷⁾.

Essa interpretação de Mach para o desenvolvimento da mecânica, após os “Principia” de Newton, não é aceita por outros historiadores da ciência como, por exemplo, Clifford A. Truesdell, que destaca a importância de uma série de outros pesquisadores como responsáveis pelo trabalho de completar a mecânica; essa série inclui Leibnitz, os Bernoulli, Stevin, Huygens, Pièrre Varignon, Euler,

Lagrange, D'Alembert, Cauchy, e muitos outros. Dentre esses estudiosos, Truesdell aponta várias contribuições importantes do trabalho desenvolvido por Euler, cerca de meio século após a publicação dos "Principia", que incluem:

i) a percepção de que os enunciados de Newton aplicam-se a massas puntuais (mecânica do ponto material);

ii) o emprego do conceito de vetor que vai facilitar a compreensão de muitas grandezas mecânicas;

iii) a utilização, pela primeira vez em 1752, das equações:
$$F_x = ma_x, F_y = ma_y, F_z = ma_z;$$

iv) a introdução dos conceitos de vetor velocidade angular e tensor de inércia, básicos para a extensão dos princípios da mecânica ao estudo do corpo rígido;

v) a proposição de um novo princípio que impõe a igualdade entre a variação temporal do momento angular de um corpo e o torque total a ele aplicado⁽¹⁸⁾.

Assim, para uma melhor compreensão da mecânica newtoniana, é necessário conhecer a contribuição dos antecessores de Newton, dele próprio e de seus sucessores. Ou seja, é preciso ir dos "principia" da mecânica aos "Principia" de Newton⁽¹⁹⁾.

VI. Notas e Referências Bibliográficas

1. Há uma série de livros que apresentam a evolução da ciência grega com diferentes enfoques. Por exemplo, FARRINGTON, B. **A ciência grega**. São Paulo: Ibrasa, 1961; BERNAL, J. D. **A ciência na história**. Lisboa: Livros Horizonte, 1976.

2. KOYRÉ, A. **Estudos galilaicos**. Lisboa: Publicações Dom Quixote, 1986. Nesse livro Koyré faz um estudo detalhado da evolução do pensamento de Galileu, desde suas primeiras obras até seus "Diálogos" e "Discursos". Explora extensamente o desenvolvimento da concepção de inércia e o problema da queda dos corpos. A figura de Descartes ganha também um merecido destaque nesse livro.

3. PHILOPONUS, J. **Commentary on Aristotle's physics**. Citado por FRANKLIN, A. The principle of inertia in the middle ages. Colorado Associated University Press, 1976. p. 14. Nessa citação encontra-se também uma crítica à antiperístase, isto é, à participação do deslocamento do ar no movimento dos projéteis.

4. Trabalhar com o conceito de *impetus*, nos dias atuais, pode ser interessante na

medida em que ele parece estar presente em muitas explicações que surgem no cotidiano de indivíduos que não têm familiaridade com conceitos de Física. Trata-se de um campo de investigações que tem ganho um desenvolvimento considerável atualmente. Ver por exemplo o artigo de:

ZYLBERSZTAJN, A. Concepções espontâneas em física: exemplos em dinâmica e implicações para o ensino. **Revista de Ensino de Física**, v. 5, n. 2, p. 3-16, 1983.

5. FRANKLIN, A.. Vide ref. 3.

6. Citado por A. Franklin, p. 48-9.

7. JAMMER, M. **Concepts of force**. Massachusetts: Harvard University Press, 1957. p. 53.

8. COPÉRNICO, N. **De Revolutionibus**. Trad. A. M. Duncam. Londres: David Charles, 1976. p. 45.

9. Conceito introduzido por Roger Bacon, no século XIII.

10. Citado por M. Jammer (vide ref. 7), p. 73.

11. Citado por KOESTLER, A. **Os sonâmbulos**. São Paulo: Ibrasa, 1961. p. 231-232.

12. EINSTEIN, A. **Como vejo o mundo**. São Paulo: Nova Fronteira, 1981. p. 181.

13. GALILEI, G. **Dois novas ciências**. São Paulo: Ed. Nova Stella, 1985. p. 136.

14. GALILEI, G. **Dialogue concerning the two chief world systems**. California: University of California Press, 1970. p. 148.

15. Citado por A. Koyré (vide ref. 2), p. 417.

16. FONTENELE, M. Elogio de Sir Isaac Newton. In: NEWTON, I. **El sistema del mundo**. Madrid: Alianza Editorial, 1983. p. 23-45.

Esse “elogio” foi lido perante a Academia de Ciências de Paris, numa sessão em homenagem a Newton, que ocorreu em 12 de novembro de 1727, oito meses após sua morte.

17. MACH, E. **Desarrollo histórico crítico de la mecánica**. Compañía Editora E. Calpe Argentina S. A., 1949. p. 159. Citado por Elio Bento (vide ref. 18).

18. BENTO, E. Uma nova visão da história da mecânica. **Revista de Ensino de Física**, v. 5, n.1, p. 45-70, 1983.

Este artigo explora as idéias de Clifford A. Truesdell, destacando principalmente o papel de Euler no desenvolvimento da mecânica.

19. Este artigo se insere num tipo de análise que se costuma denominar de “internalista”, isto é, que não leva em consideração fatores “externos” ao discurso próprio da ciência. Para que o quadro representando a mecânica e seu desenvolvimento ficasse mais completo, seria necessário esclarecer as influências sociais, econômicas, místicas e mágicas sofridas pelos pesquisadores, e por Newton em particular, mencionados neste artigo. Mas isso é outra história. Há dois artigos clássicos que jogam um pouco de luz nessa direção:

HESSEN, B. As raízes sociais e econômicas dos “Principia” de Newton. **Revista de Ensino de Física**, v. 6, n. 1, p. 37-55, 1984.

KEYNES, J. M. Newton. **Revista de Ensino de Física**, v. 5, n.2, p. 43-52, 1983.