
OS CAMINHOS DE NEWTON PARA A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL: UMA REVISÃO DO DEBATE HISTORIOGRÁFICO ENTRE COHEN E WESTFALL⁺*

Elder Sales Teixeira

Departamento de Física – UEFS

Feira de Santana – BA

Programa de Pós-Graduação em Ensino, Filosofia e História das Ciências, UFBA – UEFS

Luiz O. Q. Peduzzi

Departamento de Física – UFSC

Florianópolis – SC

Olival Freire Jr.

Instituto de Física – UFBA

Salvador – BA

Resumo

Este trabalho tem como objetivos apresentar uma revisão delimitada sobre os caminhos científicos trilhados por Newton até este chegar à sua lei da Gravitação Universal (GU), a partir das análises feitas por I. Bernard Cohen e Richard S. Westfall, estabelecendo um contraste entre as interpretações desses dois historiadores; e discutir possíveis contribuições que esta revisão pode trazer para o ensino do tópico GU orientado pela História e Filosofia da Ciência (HFC).

Palavras-chave: *Gravitação Universal; História da Ciência; Ensino de Física.*

⁺ Newton's paths to the Universal Gravitation: a review of the Historygraphic debate between Cohen and Westfall

* *Recebido: dezembro de 2009.*

Aceito: maio de 2010.

Abstract

This work aims to show a delimited review on the scientific path performed by Newton until to get his law of Universal Gravitation (UG). The review was carried out from the analyses made by I. Bernard Cohen and Richard S. Westfall about this matter, contrasting the interpretations of these historians. Possible contributions from this review to the teaching of UG, guided by History and Philosophy of Science (HPS), are discussed.

Keywords: *Universal Gravitation; History of Science; Physics Teaching.*

I. Introdução

A Gravitação Universal (GU) de Newton é um assunto que, por si só, é de grande interesse para aqueles que se dedicam ao estudo da Física em função da riqueza conceitual que carrega consigo tanto em relação às ideias físicas acerca de força, movimento e princípios de conservação, quanto da linguagem matemática empregada em tais conceitos, quanto também das próprias ideias astronômicas. Ao tratar da sua história, então, o interesse tende a aumentar, por trazer à tona debates conceituais que repercutiram para além das academias de ciências da época (séculos XVII e XVIII) e se estenderam à sociedade como um todo, visto que os frutos desses debates conduziram a humanidade a uma nova visão de mundo. Apesar disso, ainda parece ser um tema pouco valorizado tanto nas salas de aula quanto nos livros didáticos de Física, sobretudo, quando se trata de integrar ao seu ensino, a sua história.

Muitas controvérsias ainda se fazem presentes nos tempos atuais sobre quais foram os caminhos que Newton trilhou desde as suas primeiras investidas nos assuntos da Mecânica, em particular referente à dinâmica planetária, até a escrita do *Principia*, quando praticamente completou tais assuntos. Esses caminhos foram construídos com uso de instrumentos tanto típicos do fazer científico, quanto de natureza externa a este. Fazer, portanto, uma reconstrução de tais caminhos não é tarefa simples nem fácil, sobretudo, porque o próprio Newton, ao que parece, com a preocupação excessiva de firmar indelevelmente algumas das suas pegadas, resultou por apagá-las ou, ao menos, deformá-las. Conforme as palavras de A. Rupert Hall, ao analisar algumas cartas de Newton que tratavam do cálculo da força central e que resultou mais em obscurecimento do que em conclu-

sões precisas sobre a época em que ele estabeleceu sua concepção de GU, “Newton, certamente fez pouco para facilitar o trabalho dos historiadores” (HALL, 1957, p. 71).

Entretanto, muitos historiadores se dedicaram a esta tarefa e, dentre eles, destacaram-se I. Bernard Cohen (1914-2003) e Richard S. Westfall (1924-1996), que se especializaram nos estudos newtonianos e, apesar de concordarem em alguns pontos, apresentaram interpretações muito distintas em suas reconstruções. A proposta do presente trabalho é, a partir de determinados recortes, fazer uma revisão desse debate historiográfico, apresentando as reconstruções feitas por esses dois importantes historiadores sobre os passos científicos realizados por Newton até chegar à GU, sempre buscando estabelecer um contraste entre as suas respectivas interpretações; e, ainda, discutir possíveis implicações desse debate para o ensino da GU de Newton.

No que diz respeito à delimitação do trabalho, serão tratados os estágios de desenvolvimento do pensamento de Newton sobre a mecânica celeste somente nos quatro momentos mais significativos nos quais ele tratou desse tema, a saber: os *anni mirabili*¹, a correspondência com Hooke, o tratado *De Motu* e o tão celebrado *Principia*. Outro recorte é que o trabalho irá se ater somente ao papel dos conceitos de força em Newton para chegar à GU, sempre contrastando as visões de Cohen e Westfall, adicionando eventuais contribuições de outros historiadores quando for pertinente. Portanto, não se discutirá o papel das concepções de éter de Newton para o seu trabalho sobre a GU², nem a influência de aspectos extra científicos como alquimia, teologia, etc. (WESTFALL, 1995; DOBBS, 1974; RATTANSI, 1988) e nem o problema referente às considerações de Newton sobre os corpos massivos e as massas pontuais. Seguramente, todos esses fatores foram relevantes para que Newton pudesse construir a sua GU, entretanto, por razões de monta e de aprofundamento que cada um de tais fatores requisitaria, optou-se, aqui, por focar somente os conceitos de força, cujo interesse, por sua vez, dispensa maiores justificativas.

¹ Assim ficou conhecido o período correspondente aos dois anos (1665-1666) em que Newton se recolheu à sua residência rural em Woolsthorpe, como é bem conhecido, em função da assolação da peste e conseqüente fechamento provisório de Cambridge. O próprio Newton viria a se referir mais tarde a esse período como o mais profícuo de sua carreira.

² Abrantes (1998) discute três diferentes concepções de éter que Newton apresentou, respectivamente, em três diferentes momentos de seu trabalho científico.

Ao final, serão discutidas algumas possíveis contribuições que uma revisão desta natureza pode trazer para o ensino da GU de Newton, no que diz respeito a proporcionar um maior amadurecimento dos estudantes de graduação (especialmente os de licenciatura em física) quanto aos vários aspectos sobre a natureza da ciência e imagem dos cientistas, bem como, no que diz respeito a propiciar uma melhor compreensão conceitual e capacidade de argumentação desses estudantes sobre o referido tema.

II. Durante os *Anni Mirabili*

Segundo Cohen (1983) existem duas ideias que, embora equivocadas, são muito difundidas na literatura sobre o percurso geral que conduziu Newton à GU: uma delas afirma que Newton teria desenvolvido a lei da GU quase que por completo durante os *anni mirabili* (1665, 1666), embora viesse a publicá-la somente em 1687 no *Principia*³; a outra sustenta que a lei da GU foi deduzida por Newton diretamente das leis de Kepler (como exemplo, tais ideias podem ser encontradas em Lucie, 1975 e Nussenzveig, 1981). Essa última é de particular importância para o ensino, visto que tal dedução é frequentemente replicada nos livros didáticos de Física. Cohen (1983) apresenta vários argumentos para mostrar a falsidade dessas ideias afirmando que Newton abandonou seus estudos sobre mecânica logo após os *anni mirabili* sem possuir nesse período o instrumental intelectual necessário e suficiente para desenvolver a lei da GU (conforme apresentada no *Principia*) e somente retornou a esses estudos muito tempo depois, quando desenvolveu as condições intelectuais para isso.

A contestação de Cohen à primeira ideia é fundamentada na concepção de que, durante os *anni mirabili*, Newton considerava a dinâmica orbital dos planetas em termos de uma combinação – que não era muito clara – da ideia de tendência centrífuga cartesiana com a ideia de gravidade solar. De acordo com a concepção mecanicista de Descartes, aceita de forma ortodoxa naquela época, um

³ A questão de por que Newton teria levado tanto tempo para publicar um conhecimento que teria concebido quase vinte anos antes foi posta por Florian Cajori em seu “Newton’s Twenty Years’ Delay in Announcing the Law of Gravitation” (in Sir Isaac Newton, 1727-1927: A bicentenary evaluation of his Work (BALTIMORE, 1928), 127-88). O argumento de Cajori, conforme cita Whiteside (1970), é que “a demora de Newton foi devido a dificuldades teóricas envolvidas no teste da Terra-Lua”. (CAJORI, *apud* WHITESIDE, 1970, p.15, nota 3). As posições de Cohen e Westfall sobre essa questão serão discutidas mais adiante.

planeta era mantido em órbita estável em torno do Sol por ser constantemente desviado da sua tendência de sair em linha reta tangente à órbita, ou seja, da sua tendência centrífuga. Esse constante desvio era devido à matéria do espaço, imediatamente superior à órbita do planeta, que girava em vórtices e que, por ser dotado de maior tendência centrífuga que o planeta, o retinha em sua trajetória orbital. Em conformidade com a concepção cartesiana de universo pleno (que não admitia o vazio) e constituído de matéria e movimento, a tendência centrífuga de um planeta podia ser mensurada pelo produto da sua extensão (volume) com sua velocidade e , até uma certa região limítrofe do espaço celeste, quanto mais afastado do Sol o planeta estivesse, maior seria a sua tendência centrífuga⁴ (PEDUZZI, 2008).

Newton, embora desde os seus anos de estudante em Cambridge já manifestasse ruptura com muitas ideias cartesianas, ainda estava influenciado por esta concepção de tendência centrífuga como mecanismo de manutenção da órbita planetária. Entretanto, havia ainda uma insatisfação que pairava no meio intelectual da época quanto à estabilidade das órbitas planetárias considerando apenas a tendência centrífuga. Uma explicação alternativa bastante aceita era a de que havia dois tipos de ‘força’ equilibrando o planeta em sua órbita: a tendência centrífuga, devido ao seu movimento orbital, e a gravidade solar, uma espécie de ‘ação’ sobre o planeta devido ao Sol (COHEN, 1983; PEDUZZI, 2008). Ou seja, para equilibrar a tendência centrífuga, deveria haver algum tipo de ‘ação’ do Sol sobre o planeta – que não estava claramente explicado na época – da mesma maneira que a Terra ‘agia’ sobre os corpos ao seu redor, mantendo-os em sua superfície.

Um dos argumentos que alimenta a versão de que Newton desenvolveu a GU durante os *anni mirabili* se apoia numa nota biográfica escrita nos últimos anos de sua vida, na qual ele afirmou ter concebido, durante os *anni mirabili*, a ideia de que a gravidade da Terra se estendia até a Lua. Provavelmente, Newton fizera esta afirmativa por estar envolvido em muitas disputas de prioridade, inclusive quanto à autoria da lei de força $1/R^2$ (COHEN, 1983; WESTFALL, 1995). Contudo, mesmo que ele concebesse na década de 1660 tal ideia, isso não significa que compreendia a verdadeira natureza da força gravitacional, visto que sua

⁴ Essa ideia de tendência centrífuga difere do conceito atualmente aceito de força centrífuga. Esta última se refere à força de inércia que é dirigida radialmente para fora do centro de um movimento de rotação e que só existe no referencial em rotação (NUSSENZVEIG, 1981).

concepção de gravidade solar – que para ele era constante – se dava conforme descrito acima e não como veio a estabelecer mais tarde.

Portanto, durante os *anni mirabili*, Newton era adepto de uma concepção sobre a dinâmica orbital baseada na ideia de equilíbrio entre tendência centrífuga e gravidade solar e não compreendia ainda a gravidade no sentido em que veio a empregar mais tarde no *Principia*, a saber, de uma força gravitacional de ação a distância exercida pelo Sol sobre o planeta, o que destitui de crédito a concepção de que teria desenvolvido sua GU naquele período.

Para contestar a segunda ideia, um dos argumentos apontados por Cohen (1983) se refere à falta de credibilidade das leis de Kepler no meio ‘científico’ antes dos anos 1679/1680, período em que ocorreu a importante correspondência entre Newton e Hooke. Conforme Cohen (1983), Kepler teria obtido a sua primeira lei⁵ a partir unicamente dos dados da órbita de Marte e, então, conjecturou a sua validade para as demais órbitas. Portanto, trata-se de um procedimento indutivo a partir de uma única fonte de dados, o que, mesmo naquele período, seria considerado pouco confiável. Além disso, essa lei encontrou concorrência como, por exemplo, as órbitas ovais sugeridas por Cassini⁶, que se opunham às órbitas elípticas keplerianas.

Para Cohen (1983), uma evidência da falta de credibilidade das leis de Kepler no período anterior aos anos 1679/1680 era a ausência da segunda lei⁷ nos livros de astronomia da época. Como exemplo, cita uma obra de 1673⁸, escrita por Jeremiah Horrox, um discípulo de Kepler, que continha cerca de 500 páginas dedicadas à defesa da astronomia kepleriana e, no entanto, sequer citava expli-

⁵ Essa lei (conhecida hoje como a primeira lei de Kepler) afirma que as órbitas planetárias em torno do Sol são elípticas e que o Sol situa-se em um dos focos da elipse formada pela órbita.

⁶ Esse nome é devido ao matemático e astrônomo ítalo-francês Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), que estudou essas curvas no ano de 1680. As ovais de Cassini correspondem às curvas hoje conhecidas como Lemniscata. A principal diferença entre os dois modelos é que nas ovais de Cassini o produto entre as distâncias dos focos ao ponto da órbita em que se encontra o planeta é constante, ao passo que na elipse a soma dessas distâncias é constante.

⁷ A segunda lei de Kepler (a lei das áreas) afirma que o raio vetor que une o Sol a um planeta varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais.

⁸ HORROX, J. Opera posthuma; viz. **Astronomia Kepleriana, Defensa & Promota...** Londres: typis Gulielmi Godbid, impensis J. Martin, 1673.

tamente a segunda lei de Kepler. Além disso, assim como ocorreu com a primeira lei, a segunda também se defrontou com explicações alternativas na época, a exemplo da lei das áreas de Thomas Streete (ver COHEN, 1983, p. 248).

Derek Whiteside também concorda que ao menos as duas primeiras leis de Kepler não eram bem aceitas na época. Entretanto, em relação à terceira lei, ele afirma que “no intervalo de 1609 a 1687 apenas a terceira hipótese de Kepler esteve próxima de uma generalizada aceitação por seus contemporâneos”. (WHITESIDE, 1964, p. 121). Neste sentido, Wilson (1970) é ainda mais enfático acentuando que a “*exatidão*” da terceira lei de Kepler já havia sido estabelecida por Streete na sua *Astronomia Carolina* de 1661, que era conhecida por Newton.

Havia ainda um problema com respeito à segunda lei de Kepler, que ficou conhecido como “o problema de Kepler”:

O uso da lei das áreas para determinar a posição futura de um planeta depende da solução quam proxime de um problema geométrico que carece de solução exata, qual seja, dados os pontos P_0 e P_1 de uma elipse, determinar o ponto P_2 , tal que as áreas dos setores focais associados (P_0SP_1 e P_1SP_2) se encontrem em uma razão dada, a saber (segundo a lei das áreas de Kepler), a dos tempos de trânsito de P_0 a P_1 e de P_1 a P_2 . O Sol se encontra no foco S da elipse (COHEN, 1983, p. 250).

Christopher Wren, em 1659, publicou um ensaio com uma solução do problema de Kepler que foi usada por Newton somente no *Principia*, quando já tinha consciência do papel da lei das áreas na dinâmica orbital (COHEN, 1983).

Outro argumento de natureza lógica que desacredita a ideia de adoção das leis de Kepler por Newton durante os *anni mirabili* para deduzir a lei da GU diz respeito à incompatibilidade da terceira lei de Kepler⁹ com a GU de Newton (COHEN 1988). A terceira lei de Kepler é válida para um sistema de corpos orbitando em torno de um ponto central, não considerando a atração mútua entre dois corpos (Sol e planeta) e nem as atrações entre muitos corpos (os planetas entre si). Entretanto, o sistema planetário para Newton era um sistema de muitos corpos (os planetas e o Sol) que interagem entre si em torno de um centro de gravidade não fixo. Em tal sistema, a terceira lei de Kepler não seria válida. Somente fazendo aproximações, tais como considerar as massas dos planetas desprezíveis quando comparadas com a do Sol e desprezar as interações mútuas

⁹ A terceira lei de Kepler afirma que a razão T^2/R^3 é constante, sendo T o período orbital de um planeta e R a distância média do planeta ao Sol.

entre os planetas, poder-se-ia compatibilizar a terceira lei de Kepler com o sistema newtoniano. Cohen (1988) mostra que Newton somente viria a se dar conta desse problema e fazer tais aproximações após uma revisão do seu tratado *De Motu* em 1684 e não antes disso.

Portanto, as leis de Kepler se encontravam numa situação ‘insegura’ durante os *anni mirabili*, logo, seria demasiado arriscado para Newton naquele período erguer sua mecânica planetária alicerçada em tais leis. Newton somente viria a fazer uso das leis de Kepler quando passou a tomar consciência do significado físico das mesmas e quando mudou suas ideias sobre a dinâmica orbital, o que somente viria a acontecer após a troca de correspondência com Hooke, conforme os argumentos de Cohen (1983).

Quanto às interpretações de Westfall sobre a situação da mecânica de Newton durante os *anni mirabili*, não parece haver muitas discordâncias em relação a Cohen sob vários dos aspectos acima abordados. Para Westfall (1995) a interpretação que supervaloriza os *anni mirabili* criou uma espécie de mito sobre a genialidade de Newton associada à ideia de “insight”, o mito de um homem que, iluminado pelo dom da sabedoria, pôde realizar tamanha produtividade em tão pouco tempo. Westfall critica esta interpretação e argumenta que mais importante do que superdimensionar esses dois anos é reconhecer os fatores mais significativos para elaboração das grandes obras de Newton: a sua dedicação exclusiva aos estudos, propiciada pelo seu isolamento social; e a continuidade desses estudos, visto que sua independência intelectual (autodidatismo) em relação à Cambridge já havia se configurado antes daqueles anos, quando Newton ainda era estudante, e somente muito tempo depois é que pôde se instrumentalizar conceitualmente para produzir tais obras. Whiteside (1970) acentua que, em sua época de estudante, Newton não tinha nem colegas suficientemente interessados, e nem tutores suficientemente conhecedores, em assuntos da ciência moderna para servir como seus interlocutores, e as evidências oriundas dos manuscritos que sobreviveram daquela época apontam para um Newton singularmente autodidata.

Westfall (1971), entretanto, argumenta pela necessidade de apoio adicional em muitos manuscritos não publicados de Newton para fazer uma análise mais minuciosa. Para Westfall (1971), quando Newton se dedicou a escrever o tratado *De Motu* (de 1684), após um bom período sem tratar de mecânica, as suas concepções acerca de força e movimento estavam no mesmo patamar em que se encontravam durante a década de 1660, quando havia escrito *De Gravitatione* e *Waste*

*Book*¹⁰. Dentre essas concepções aparecem vários conceitos de força, os quais acarretam dificuldades que ele não consegue resolver antes do *Principia*; não considerava o princípio de inércia, adotando a ideia de força inerente (uma força interna ao corpo que é responsável pela manutenção do seu movimento de translação uniforme); considerava a gravidade constante e a ideia de equilíbrio entre tendência centrífuga e gravidade solar, nos termos já comentados acima.

Westfall (1971) afirma que, somente a partir das revisões que Newton faz do seu tratado *De Motu* – o que acontece entre 1685 e 1686 –, é que ocorrem importantes mudanças de pensamento que o levam a aderir em definitivo ao princípio de inércia e à ideia de uma força central como fundamentais para explicar a dinâmica orbital. Neste ponto, aparece uma notável discordância entre os dois historiadores em questão, visto que, para Cohen (1983; 1988), as transformações importantes no pensamento de Newton que o conduziram à GU ocorreram entre 1679 e 1680, quando da correspondência com Hooke, conforme será discutido mais adiante.

De acordo com Cohen (1983), desde os *anni mirabili* até os anos de 1679/1680, aproximadamente 15 anos se passaram sem que Newton produzisse algo de substancial sobre mecânica. Os relatos de Whiston e Pemberton¹¹ citados por Cohen (1983) e também discutidos por Wilson (1970) podem justificar o abandono de Newton por tanto tempo nos assuntos da mecânica. Segundo tais relatos, Newton haveria feito em 1666 alguns cálculos na tentativa de encontrar acordo entre a ‘potência’ na órbita da Lua (um tipo de ‘ação’ da Terra sobre a Lua devido à suposta extensão da sua ‘gravidade’ até a órbita lunar) e a gravidade

¹⁰ *De Gravitatione* era um tratado sobre mecânica dos fluidos, mas que continha discussões sobre os conceitos de espaço, movimento e matéria em que Newton se contrapunha claramente a algumas visões de Descartes. O ano provável em que foi escrito é 1668 e marca, segundo Westfall (1971), o último momento em que Newton trata de mecânica de maneira substancial até o ano de 1684. *Waste Book* era um caderno de anotações que Newton herdou de seu padrao quando ainda era estudante em Cambridge e no qual fazia notas sobre diversos assuntos. Dentre elas, haviam as famosas ‘*Questiones*’, que marcam o início da sua ruptura com a filosofia cartesiana vigente, bem como a sua independência intelectual em relação à Cambridge.

¹¹ William Whiston (1667-1752) foi o sucessor de Newton como professor Lucasiano em Cambridge. Em 1749 relatou em suas memórias, conforme ouvira do próprio Newton, como este teria descoberto a teoria da gravidade. Henry Pemberton (1694-1771), físico e matemático, conhecedor de Newton, publicou em 1728 um livro sobre a filosofia deste, no qual incluiu o relato sobre os cálculos frustrados que levaram Newton a abandonar o tema (as citações explícitas de tais relatos estão em Cohen, 1983, p. 257).

local terrestre. Entretanto, em função dos resultados negativos desses cálculos – não encontrou tal acordo neste ‘teste da Lua’ – Newton teria se frustrado, o que o fez se voltar para outros assuntos e não mais se pronunciar sobre mecânica durante todo aquele tempo.

Já para Westfall (1971), essa ausência se prolongou por cerca de 20 anos, visto que, para esse autor, a correspondência com Hooke não representou uma retomada dos estudos em mecânica e sim apenas um momento em que Newton se manifestou sobre o assunto, porém sem contribuição importante para compreender o estágio de seu pensamento sobre o tema. Igualmente sem relevância quanto a esse aspecto, há ainda outros dois momentos em que Newton se manifestou sobre mecânica antes de 1684: um manuscrito não publicado de data controversa (1669 ou 1673)¹², no qual tratou das oscilações do pêndulo em um cicloide; e a correspondência com Flamsteed, entre 1680 e 1681, em que Newton criticou a dinâmica que aquele usou para justificar a aparição de um cometa (WESTFALL, 1971).

Um argumento diferente é encontrado em Whiteside (1970). Ele afirma que a falta de conhecimento por parte de Newton da segunda lei de Kepler ou, pelo menos, a falta de uma adequada compreensão acerca do seu caráter geral, foi a principal razão para justificar essa demora de cerca de vinte anos de Newton para compor o *Principia*. Já Cushing (1982) argumenta que:

imprecisões no valor conhecido da distância Terra-Lua e o problema da força atrativa gerada por uma esfera eram provavelmente dificuldades menos sérias do que a falta de uma estrutura dinâmica exata para fazer, dentro da qual, os necessários cálculos das órbitas. Newton parece não ter plenamente e precisamente formulado sua dinâmica até a década de 1680 (CUSHING, 1982, p. 620).

¹² Há duas possíveis datas para a escrita desse manuscrito: a primeira (1669) é devido a uma visita que David Gregory (um professor de matemática escocês) fez a Newton em 1694, e declarou ter visto o citado artigo datado de 1669. Entretanto, em função das disputas de Newton quanto à prioridade da lei de força $1/R^2$ (que constava no artigo), é possível que ele tenha adulterado propositadamente essa data; a segunda (1673) é oriunda de uma carta de Newton a Henry Oldenburg (secretário da *Royal Society* na época) mostrando que, em 1673, Newton conhecia o “*Horologium Oscillatorium*” de Huygens, publicado nesse mesmo ano e, assim, estimulado por essa publicação, teria logo escrito o referido artigo. Westfall (1971) defende a segunda versão.

III. A Correspondência com Hooke

No final de 1679, Hooke, recém nomeado secretário da Royal Society, escreveu a Newton solicitando-lhe atualizar sua correspondência com a instituição, interrompida após a morte de Oldenburg em 1677. Na ocasião, apresentou a Newton sua hipótese de que o movimento orbital de um planeta ocorria conforme a combinação de um movimento tangencial à órbita e uma atração em direção ao Sol segundo a lei $1/R^2$ (WESTFALL, 1971; COHEN, 1988; PEDUZZI, 2008), uma ideia que representava uma novidade na época, destoando da concepção vigente. Daí, iniciou-se a famosa troca de cartas que viria a ganhar destaque nessa história.

Segundo a reconstrução feita por Westfall (1971), Newton, em uma primeira resposta, não se reportou diretamente à hipótese levantada por Hooke, mas propôs uma demonstração de que a Terra gira em torno do seu próprio eixo. Supôs que a trajetória da queda de um corpo solto de uma torre é ligeiramente deslocada para leste e teria um movimento em espiral da superfície para o centro da Terra (Fig. 1a). Hooke, sustentando sua hipótese de que o movimento era composto de uma força em direção ao centro e uma componente tangencial à superfície, respondeu a Newton que tal movimento seria semelhante a uma elipse (Fig. 1b). A discussão durante a troca de cartas se voltou para o movimento orbital e Hooke sustentava sua ideia de que a órbita era elíptica, fechada e mantida pela combinação de uma força central com a componente tangencial, continuamente desviada pela primeira, considerando a gravidade variável com o inverso do quadrado da distância. Newton, por sua vez, era ainda adepto da ideia de equilíbrio entre força centrífuga e gravidade, que considerava constante, e propôs outro modelo que levaria o corpo de A, passando por F, G, H, I, K e retornando até A (Fig. 1c), num movimento alternado de ascensão e descensão em que força centrífuga e gravidade se contrabalanceavam. Conforme Dias (2006), esse modelo era uma correção de Newton ao seu modelo anterior e foi elaborado sob influência da teoria planetária de Borelli¹³.

¹³ Newton estudou o livro “Especulações sobre os Satélites Mediceanos Deduzidos de Causas Físicas” de Giovanni-Alfonso Borelli que propôs uma explicação qualitativa sobre o movimento orbital das luas em torno de Júpiter em termos de uma composição da gravidade e da força centrífuga (WHITESIDE, 1970; DIAS, 2006). Essa leitura supostamente inspirou Newton para compor seu modelo.

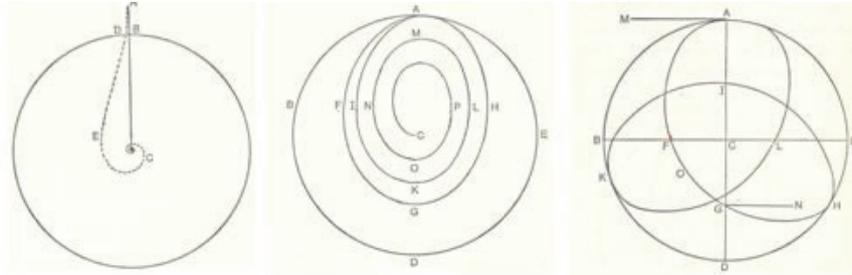


Fig. 1a

Fig. 1b

Fig. 1c

Figuras extraídas de Westfall (1971).

Assim, aparentemente, trata-se de uma discussão cinemática entre os dois personagens sobre a trajetória de um corpo em torno de um ponto, mas o pano de fundo e, portanto, a divergência que está por detrás dessa discussão, parece dizer respeito à dinâmica planetária. No fundo, aqui aparece um conflito entre dois modelos dinâmicos diferentes tentando uma solução para o problema do movimento orbital dos planetas. E, nesse ponto, o modelo de Hooke era bem melhor que o de Newton, pois continha a semente da ideia de força central que somente mais adiante foi assimilado por Newton e que o permitiu, em conjunção com o tratamento matemático adequado, dar um passo decisivo para a GU. Em grande medida, Newton deve isso a Hooke (COHEN, 1983; WESTFALL, 1971).

Vale chamar a atenção para outra sutil distinção entre Cohen e Westfall que diz respeito à dívida de Newton para com Hooke. Os dois historiadores concordam quanto ao fato de que essa dívida reside muito mais na ideia de força central e da componente inercial (tangente à órbita) do que na lei de força $1/R^2$, que Hooke tanto reivindicou. Isso porque, embora este tivesse apresentado a lei pela primeira vez a Newton, não tinha conhecimentos matemáticos o suficiente para saber deduzir suas consequências. Newton, por sua vez, se não a conhecesse de Hooke seguramente a conheceria de outro, pois a lei seria facilmente deduzida da expressão da força centrífuga de Huygens já conhecida por todos, além de ser o matemático mais capaz da época para saber extrair os resultados da lei. Por outro lado, a nova hipótese formulada por Hooke, até então por ninguém conjecturada, foi a grande contribuição que este legou para a mudança de concepção de Newton, (COHEN, 1988; WESTFALL, 1971; PEDUZZI, 2008). Entretanto, a sutil diferença entre as interpretações de Cohen e Westfall, nesse caso, reside na valorização dessa dívida. Enquanto que o primeiro enfatiza a importância do trabalho mate-

mático de Newton, pois sem as habilidades deste de nada serviria a conjectura de Hooke, em suas palavras, “A ciência não progride por conjecturas, senão por demonstrações” (COHEN, 1983, p. 272); o outro valoriza mais o papel da hipótese de Hooke na mudança conceitual de Newton, pois “estabeleceu os elementos mecânicos do movimento orbital em termos adequados ao conceito de inércia” permitindo colocar ‘de pé’ uma dinâmica orbital apropriada e acentua ainda que “nesta matéria Hooke foi o mentor de Newton” (WESTFALL, 1971: 427).

Westfall (1971) considera, portanto, que a mecânica orbital de Hooke era muito mais clara do que a de Newton, eliminava a ideia vigente de tendência centrífuga, trazia embutido o conceito de inércia, considerava o movimento orbital como uma elipse e que a gravidade variava com o inverso do quadrado da distância. Ao final da correspondência, Newton – a despeito de considerar a gravidade constante – acabou acatando momentaneamente essa ideia de Hooke de uma força externa mudando a direção do movimento. Daí, Newton aplicou seu próprio conceito de força externa (força de impulso), concebida inicialmente para resolver problemas de impacto entre corpos, na resolução do problema do movimento orbital. Ele compreendia essa força como atuando discretamente sobre o corpo, alterando a cada ponto a direção do movimento orbital sendo que a ‘força total’ (referente à mudança total de movimento) durante um intervalo de tempo seria dada pela soma dessas forças impulsivas discretas durante o mesmo intervalo de tempo. Em um artigo não publicado de 1679¹⁴, Newton demonstrou matematicamente a conjectura de Hooke de que na elipse, obedecendo-se à lei das áreas, a força é do tipo $1/R^2$. Ele incluiu nesse artigo a ‘Hipótese I’, que é uma replicação do princípio de inércia extraído de Hooke.

Entretanto, o argumento de Westfall é que se trata de uma adesão efêmera a tais ideias de Hooke e, portanto, não representa uma transformação no pensamento de Newton sobre o problema em questão. Nas palavras do próprio Westfall:

Sendo que a última consideração explícita de Newton sobre o movimento em De Gravitatione abandonou a inércia com a relatividade Cartesiana, e sendo que De Motu, composto em 1684, começou a partir da posição do

¹⁴ Consta que durante a famosa visita de Halley a Newton em 1684, na qual Halley o consulta sobre o problema da dinâmica planetária (que ficou conhecido como ‘o problema de Halley’), Newton teria afirmado que já havia resolvido (justamente no referido artigo não publicado de 1679). Entretanto, na ocasião da visita, escondeu o tal artigo de Halley por medida de cautela, prometendo enviar a solução posteriormente.

De Gravitatione, a Hipótese I põe algo de misterioso na história da mecânica newtoniana. A mim parece que Newton meramente adotou as premissas que Hooke estabeleceu (WESTFALL, 1971, p. 429).

Whiteside (1970), no mesmo sentido, afirma de forma ainda mais contundente que antes do *De Motu* não havia qualquer referência explícita ou mesmo implicada à força centrípeta como causa do movimento orbital e nem mesmo qualquer evidência factual do suposto ‘teste da Lua’ e que “nós somos, eu penso, inelutavelmente atraídos para identificar 1684 como o verdadeiro *annus mirabilis* nos quais os princípios básicos do Principia – e em consequência da dinâmica clássica – foram pela primeira vez claramente concebidos” (WHITESIDE, 1970, 14).

Em contraposição, Cohen (1983) supervaloriza o papel da correspondência com Hooke nas mudanças de pensamento que ocorreram em Newton nesse período e que o conduziram à GU. Foi a partir dessa discussão com Hooke que Newton passou a compreender o significado físico das leis de Kepler, transformando-as “de simples regras cinemáticas ou descritivas a princípios dinâmicos ou causais” (COHEN, 1983, 272). Como exemplo, a lei das áreas para Newton era uma simples lei geométrica e não fazia parte das suas ideias astronômicas antes desse período (1679/80); passou da ideia de tendência centrífuga para a concepção de força centrípeta; mudou sua concepção mecanicista da natureza passando de uma visão de matéria inerte para uma concepção de matéria ‘ativa’, com capacidade de atração e repulsão. Só para ilustrar, a ideia de tendência centrífuga estava associada à de matéria inerte, enquanto que a ideia de força centrípeta estava associada à de ação de um corpo sobre o outro. Seguindo uma linha de pensamento similar, Wilson (1970) afirma que foi justamente devido à correspondência com Hooke que Newton se deparou, pela primeira vez, com a noção de gravitação universal¹⁵ baseada na lei do inverso do quadrado.

Vale ressaltar, ainda, que Cohen interpreta a atitude de Newton nesse período como adotando uma postura instrumentalista em relação ao seu conceito de força. “A chave do pensamento criativo de Newton em mecânica celeste não foi considerar que as forças fossem propriedades reais (...), mas que pudesse examinar as condições e propriedades de tais forças como se fossem reais” (COHEN, 1983, p. 276). Para ele, Newton não considerava a força como uma propriedade

¹⁵ O termo *universal*, empregado nesse ponto por Wilson (1970), limita-se à extensão entre Sol e planetas.

intrínseca do corpo, adotando uma postura em que podia considerar as forças de forma a tratá-las matematicamente para resolver os problemas do mundo real.

Aqui aparece outra divergência entre os dois historiadores, pois Westfall considera que às propriedades reais da matéria, que conforme o mecanicismo cartesiano (vigente na época) consistia de extensão e movimento, Newton adicionou o conceito de força (atração e repulsão), propondo assim “uma adição à ontologia da natureza” e assumindo uma postura realista, “ele tratou forças como entidades que realmente existem” (WESTFALL, 1971, p. 377).

IV. Sobre o tratado *De Motu*

Westfall subvaloriza, portanto, o impacto da correspondência com Hooke na transformação de pensamento de Newton e sustenta que essa transformação somente viria a ocorrer de fato a partir de 1684 quando, movido por um estímulo externo, a saber, a famosa visita de Halley em agosto do mesmo ano, ele retomou os seus estudos sobre mecânica desde o estágio em que se encontrava na década de 1660, ou seja, a partir dos manuscritos *De Gravitatione* e *Waste Book*. Conforme prometera a Halley, Newton enviou no mesmo ano uma primeira versão do tratado *De Motu*, cuja dinâmica era menos satisfatória que a do artigo de 1679, além de internamente inconsistente e inadequada para sustentar as demonstrações, visto que se tratava de um retorno às suas concepções da década de 1660 (WESTFALL, 1971).

Há três versões do *De Motu*, sendo que a terceira passou por duas revisões ao longo de 1685-1686. Essas revisões contêm as principais mudanças conceituais que conduziram Newton à GU e podem ser consideradas como esboços do *Principia* (WESTFALL, 1971). Nas revisões, Newton empregou, pela primeira vez, o termo ‘força centrípeta’, o que é simbolicamente significativo, pois, ao se opor à ideia de ‘força centrífuga’ (termo cunhado por Huygens), o termo ‘força centrípeta’ simbolizou uma importante mudança conceitual para a compreensão do movimento orbital. Essa mudança conceitual abriu as portas para a dinâmica moderna, pois mostrou que o movimento orbital tem a mesma natureza de um movimento retilíneo acelerado (são cinematicamente diferentes, mas dinamicamente equivalentes). “Dado o conceito de inércia retilínea, o movimento circular é possível apenas quando uma força desvia continuamente um corpo de sua trajetória retilínea” (WESTFALL, 1971, p. 432).

Contudo, o conceito de inércia não aparecia na primeira versão do *De Motu*. Em outras palavras, a Hipótese I do artigo de 1679, que era uma forma do princípio de inércia, não constava nessa primeira versão do *De Motu*. Em con-

trapartida, havia uma definição de movimento retilíneo e uniforme mantido por uma ‘força inerente’ (*vis insita*), uma força interna ao corpo que o fazia perseverar naquele movimento, indicando algo de essencial nesse movimento além de uma ‘mera translação’. Essa ideia já estava presente em *De Gravitatione* e só foi abandonada após as revisões do *De Motu*, daí o argumento de Westfall quanto à presença da Hipótese I no artigo de 1679 se tratar apenas de uma mera adesão temporária de Newton à inércia de Hooke e não uma transformação na sua forma de pensar.

Na primeira versão do *De Motu* havia duas definições e duas hipóteses, o movimento orbital era compreendido como composto de força centrípeta mais a força inerente (tangente à órbita). Depois, Newton inseriu uma terceira definição sobre a resistência de um meio como uma força que impede o movimento uniforme; entretanto não trata dessa força como um fator constituinte no movimento orbital, o que é uma inconsistência. Inseriu ainda uma terceira hipótese e escreveu “Hipótese IV” no cabeçalho de uma página que deixou em branco. Na versão dois, essa página aparece preenchida com o conteúdo da Hipótese, só que escrita com a letra de Halley.

A Hipótese III¹⁶ fala do paralelogramo de forças de Newton (Fig. 2) para duas forças atuando no corpo (inerente e centrífuga). A Hipótese afirma que um corpo sob ação de duas forças ao mesmo tempo (uma na direção de AB e outra na direção de AC) é levado ao mesmo lugar (o ponto D) para o qual seria levado caso fosse submetido sucessivamente a cada uma das forças no mesmo tempo de forma independente. Esse paralelogramo de forças “era uma adaptação do paralelogramo de movimentos de Galileu” (WESTFALL, 1971, p. 435), e trazia outra importante inconsistência: tratava no mesmo plano dois tipos de força incomensuráveis entre si. A força inerente era interna e responsável pela perseverança do movimento retilíneo uniforme, logo seria mensurada por uma expressão do tipo $f = mv$. Já a força centrífuga era externa e responsável por provocar a alteração do movimento retilíneo uniforme, logo seria mensurada por uma expressão do tipo $f = ma$, o que evidencia uma incompatibilidade dimensional.

¹⁶ Essa Hipótese acabou se convertendo no corolário I que sucede as três leis do movimento de Newton que, por sua vez, antecedem o Livro I do *Principia* (ver NEWTON, 2005, p. 460-461).

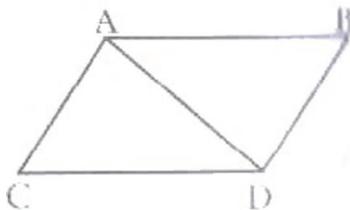


Fig. 2 – Paralelogramo de forças de Newton. Extraída de Newton (2005).

Outra inconsistência que havia na primeira versão do *De Motu* dizia respeito à ausência de uma definição independente de massa, embora afirmasse que a “a força inerente é mensurável por mv ” (WESTFALL, 1971, p. 435). Este problema persistiu em Newton mesmo após o *Principia* e foi uma das críticas apontadas por Ernst Mach em relação à mecânica newtoniana (BASSALO, 1992; WESTFALL, 1971; ASSIS, 1999).

A segunda versão do *De Motu* era uma mera cópia da primeira versão com algumas emendas, mas que em nada contribuíam para resolver as inconsistências presentes na primeira. Diferentemente, a terceira versão apresentava mudanças em relação às outras duas. Newton acrescentou mais hipóteses totalizando cinco e as chamou de leis (que no *Principia* foram reduzidas a três, conhecidas hoje como as ‘leis de Newton’) e incluiu um escólio afirmando a realidade do espaço absoluto¹⁷. Apesar disso, algumas contradições permaneceram: foi introduzido o conceito de inércia para um sistema de corpos girando em torno do seu centro de gravidade; contudo, continuou presente a ideia do movimento mantido por uma força inerente; ainda, apareceu uma lei equivocada para mensurar a resistência de um meio sobre um corpo através do produto conjunto da superfície do corpo pela densidade do meio pela velocidade, essa lei foi suprimida na revisão.

No processo de revisão do *De Motu* é que Newton foi modificando seu conceito de força inerente (deixando de ser um tipo de força com a função de manter o movimento para se tornar um conceito de força de resistência à mudança de estado do corpo) se aproximando do conceito de inércia. Essa mudança levou Newton a ficar sem critério para justificar a translação absoluta, o que o impediu de determinar os movimentos absolutos. “... o conceito de movimento absoluto

¹⁷ Westfall (1971) afirma que Newton, de acordo com a sua cosmovisão, estabeleceu esse conceito de espaço absoluto para se opor ao relativismo cartesiano – no qual, velocidade e direção do movimento não podem ser determinadas em termos absolutos – e assim superar a insegurança trazida pela ideia de um universo sem um referencial seguro, absolutamente fixo.

deixou de ter qualquer função operativa na mecânica de Newton” (WESTFALL, 1971, p. 448).

Dentro desse contexto do momento da revisão do *De Motu* – portanto, pouco antes de Newton escrever o *Principia* – discute-se, a seguir, como Newton, ao abrir mão paulatinamente do conceito de força inerente em adesão ao conceito de inércia, perdeu seu critério operativo para garantir a existência de movimento absoluto.

Segundo o próprio Newton, o movimento absoluto se distingue de um movimento relativo por conta da aplicação de uma força ao corpo que move. O conceito newtoniano de força inerente, uma vez que se tratava de uma força interna ao corpo com a função de mantê-lo em movimento definia, assim, um critério para determinar o movimento absoluto do corpo – sua translação absoluta. Ou seja, estando a força no corpo fica garantido que é este que se move absolutamente. O princípio de inércia, contudo, ao romper com a ideia de força interna ao corpo e ao estabelecer que o mesmo se move por mera translação uniforme, sem a necessidade de uma força aplicada ao corpo, não oferecia tal critério. Apesar disso, Newton manteve o conceito de movimento absoluto em sua mecânica para reafirmar sua posição contra o relativismo cartesiano (WESTFALL, 1971).

Newton discutiu o sistema constituído por dois globos presos entre si por uma corda e girando em torno do centro de gravidade do sistema, localizados em um universo supostamente imenso e vazio. A existência de uma tensão na corda é garantia de movimento em relação ao espaço absoluto. Admitindo, a seguir, que nesse espaço existissem corpos remotos tais como as ‘estrelas fixas’, e havendo movimento relativo entre os globos e as estrelas, não se poderia determinar, apenas a partir do movimento de um em relação ao outro, o verdadeiro movimento desses corpos, caindo-se, portanto, em um relativismo de cunho cartesiano. Contudo, ao se identificar uma tensão na corda, pode-se assegurar que são os globos que estão em movimento absoluto e não as ‘estrelas fixas’. Portanto, a existência de força nos corpos, segundo Newton, define a sua rotação absoluta (WESTFALL, 1971).

Ainda no processo de revisão do *De Motu* Newton completou seu conceito de massa. A ‘força inerente’¹⁸ da matéria é proporcional e idêntica à inatividade da sua massa. Para os cartesianos, ao contrário, força inerente diferia da inati-

¹⁸ O termo aqui já é empregado em termos do princípio de inércia, ou seja, uma resistência à mudança de estado. Interessante notar como uma mudança conceitual ocorre não necessariamente de forma concomitante com uma mudança terminológica.

vidade da matéria, pois se a matéria está inativa não pode se ‘esforçar’ para resistir a uma mudança de estado. Newton reage a isso estabelecendo nas leis a concepção de que a matéria não tem a capacidade de ‘autoagir’ (iniciar uma ação) mas, sendo submetida a uma ação externa, de resistir a tal ação. Esse paradoxo fica explicitado através do termo empregado por Newton, *vis inertiae* ou “atividade da inatividade” (WESTFALL, 1971, p. 450).

Durante as revisões do *De Motu*, Newton chegou a definir seis tipos de força: (i) força inerente – é a resistência de um corpo à mudança do seu estado de movimento ou de repouso; (ii) força exercida – é um suplemento desse novo conceito de força inerente. Representa a forma manifesta dessa última quando o corpo sofre uma força impressa devido a outro corpo. Proporcional a essa força impressa, é a força exercida para reagir a esta. Trata-se de um passo gradual para a conhecida terceira lei de Newton; (iii) força de movimento – é uma tentativa de Newton de salvar a ideia antiga de força inerente, ou seja, uma força interna que faz o corpo perseverar no seu estado; (iv) força impressa – é um termo geral para qualquer força externa que atue sobre um corpo para mudar seu estado; (v) força centrípeta – um tipo de força impressa atuando em um corpo no caso do movimento circular e voltada para o centro da rotação; (vi) força de resistência – outro tipo de força impressa, é exercida sobre um corpo por um meio resistente. Depois, Newton cancelou essas definições deixando apenas dois tipos de força em sua mecânica: força inerente – resistência à mudança de estado do corpo sendo proporcional à sua massa e, portanto, à própria mudança de estado; força impressa – para distinguir da primeira é a força que age em um corpo devido a outro para mudar seu estado. Sua intenção era fazer uma distinção entre força interna e externa e a terceira lei estabelecia uma relação entre elas. Westfall (1971) conclui, assim, que é a revisão da terceira versão do *De Motu* que representa o momento de mudança conceitual significativo que tornou possível Newton escrever o *Principia* e chegar à sua GU.

Cohen (1983), por sua vez, discorda que havia uma confusão nos conceitos de força de Newton. Assim, ele oferece uma interpretação mais simplificada e considera que, para entender as leis de Newton no período compreendido entre 1679 (início da correspondência com Hooke) e 1686 (última revisão do *De Motu*), é preciso levar em conta apenas os seguintes conceitos de força: força externa – impressa a um corpo, devido a outro, causando uma mudança de estado; força interna – oferece resistência à mudança de estado provocada por uma força externa; força contínua – caso limite da sucessão de forças de impacto quando o intervalo de tempo entre estas tende a zero. Cohen (1983), em complemento, acentua que para se compreender como Newton chegou à GU é necessário entender tam-

bém o “estilo newtoniano” de tratar as forças ‘como se’ fossem reais, através da simplificação do sistema físico a formas matematicamente tratáveis. Assim, em não conseguindo provar a causa da força gravitacional (aquilo que possibilitaria a ação à distância), apoiou-se na força dos resultados matemáticos¹⁹.

A despeito de fazer uma discussão mais geral e menos enfocada em minúcias quanto ao processo de transformação dos conceitos de força em Newton – num estilo diferente de Westfall (1971) que, em adição, se concentrou na análise mais detalhada dos manuscritos não publicados – Cohen (1983) apresenta uma discussão sobre a relação que Newton fez entre a força aplicada a um corpo do ponto de vista macroscópico e a força aplicada às partículas de matéria que constituem esse corpo. Segundo Cohen, essas forças têm a mesma natureza para Newton e a força total aplicada ao corpo é dada pelo somatório das forças aplicadas sobre as suas partículas. No *Principia*, Newton afirmou categoricamente a realidade da força gravitacional sobre o corpo, entretanto, quanto à força sobre as partículas, ele apenas fez suposições bastante cautelosas em um rascunho daquilo que seria o prefácio inicialmente destinado à primeira edição do *Principia*, mas que foi suprimido. O argumento para isso aparece em um manuscrito reproduzido por Cohen em uma nota de fim, na qual Newton fala da sua segurança quanto à realidade da GU, bem como da relação intrínseca desta com as forças que atuam sobre as partículas, pois sendo “a natureza simplíssima e plenamente consonante consigo mesma” (ver COHEN, 1983, p. 375, nota 18), haveria de regular as partículas constituintes dos corpos à mesma maneira destes. Contudo, ele não tinha como provar essa relação e como tal concepção destoava fortemente da filosofia aceita em sua época, Newton resolveu retirar o prefácio para não causar “prejuízo” ao livro como um todo (COHEN, 1983).

V. *Principia*

A sequência de passos que Newton seguiu no processo de construção para chegar à GU, conforme a afirmativa de Cohen, é a mesma que está presente tanto em *De Motu* como nas seções II e III do Livro I do *Principia*. Segundo Cohen, concordam com isso “quase todos os estudiosos de Newton (R. S. Westfall é uma

¹⁹ Vale ressaltar, entretanto, que Cohen (1983) admite que, em algum momento anterior à escrita do *Principia*, Newton se achava seguro de ter encontrado provas da existência da força de GU – a partir de um conjunto de fenômenos que, segundo ele, decorriam desta força – e, então, adotou uma postura realista passando a buscar, embora sem sucesso, a causa desta força.

notável exceção)” (COHEN, 1983, p. 373). Será apresentada, em seguida, essa sequência de passos acompanhando a reconstrução feita por Cohen (1983).

A seção II do Livro I do *Principia* inicia com a Proposição I (ver NEWTON, 2005), que também aparece em *De Motu*. A Proposição I mostra que um corpo inicialmente inercial, ao sofrer uma força central, se move de forma a obedecer à lei das áreas (Fig. 3). Isso dá um significado físico (dinâmico) à lei das áreas de Kepler, pois esta deixa de ser uma lei puramente matemática e passa a se tornar uma lei que fornece uma explicação de como ocorre o movimento de um corpo submetido a uma força central: um segmento traçado do centro de força ao corpo varre áreas iguais em intervalos de tempo iguais descrevendo, no limite, um movimento curvo. Trata-se, portanto, de uma demonstração geral, uma vez que não especifica a natureza da força e nem o tipo de curva. É curioso notar que Cohen (1983, 1988) afirma que Newton mostrou na Proposição I que o movimento inercial – de **A** para **B** e de **B** para *c* – obedece à lei das áreas, entretanto, essa suposta demonstração não está feita na referida proposição. Newton apenas afirmou, sem demonstrar, que as áreas iguais dos triângulos **ASB** e **BS*c*** seriam descritas. Presumivelmente, Cohen estaria tentando explicitar o que está implicitamente assumido na proposição. De qualquer modo, é fácil demonstrar essa igualdade das áreas por simples operação geométrica.

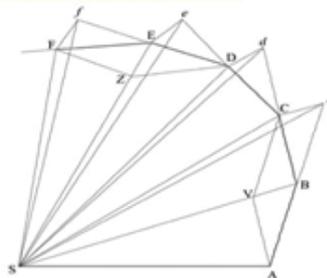


Fig. 3 – Um corpo se move inercialmente de **A** para **B** em um determinado intervalo de tempo. Caso continuasse este movimento reto iria de **B** até *c* no mesmo tempo. Contudo, ao chegar em **B** sofre a ação de uma força de impulso na direção de **S** e muda a direção do seu movimento indo até **C** no mesmo intervalo de tempo. Newton mostra na Proposição que as áreas dos triângulos **SBC** e **SAB** são iguais, portanto o movimento obedece à lei das áreas. O mesmo ocorre quando alcança os pontos **C**, **D**, **E**, **F** e assim sucessivamente, e no limite em que o número de triângulos aumenta e suas áreas diminuem proporcionalmente, a trajetória do corpo tende a uma curva. Figura extraída de Newton (2005).

A proposição II, que não aparece em *De Motu*, mostra o inverso da primeira. Um corpo que se move numa curva obedecendo à lei das áreas está sujeito a uma força central, cujo centro pode ser fixo ou móvel com velocidade constante. Na Proposição I, uma força central implica um movimento curvo, que obedece à lei das áreas e, na Proposição II, a trajetória curva que obedece à lei das áreas implica uma força central. Assim, as duas proposições juntas indicam que “a lei das áreas transformada fornece, nas mãos de Newton, uma condição necessária e suficiente para uma força centrípeta” (COHEN, 1983, p. 274).

A Proposição III, que também só aparece no *Principia*, é uma generalização da anterior para um centro de força que pode se mover acelerado. Isso é feito para conduzir o leitor à possibilidade de aplicar a dita proposição ao sistema físico Terra-Lua. As letras usadas por Newton para designar o centro de força (T) e o corpo que se move (L) corroboram isso.

Em seguida, Newton passou à Proposição IV, também presente em *De Motu*. Trata-se de uma proposição de grande importância, pois estabelece, pela primeira vez, uma medição da força centrípeta para o movimento circular uniforme e anuncia a possibilidade de extrapolação desse resultado para o caso dos corpos celestes. Abaixo, segue uma discussão desta Proposição e alguns dos seus corolários.

PROPOSIÇÃO IV. TEOREMA IV.

AS FORÇAS CENTRÍPETAS DOS CORPOS, QUE POR MOVIMENTOS UNIFORMES DESCREVEM CÍRCULOS DIFERENTES, TENDEM AOS CENTROS DOS MESMOS CÍRCULOS; E ESTÃO UMAS PARA AS OUTRAS DA MESMA FORMA QUE OS QUADRADOS DOS ARCOS DESCRITOS EM TEMPOS IGUAIS APLICADOS AOS RAIOS DOS CÍRCULOS.

Estas forças tendem aos centros dos círculos (pela Proposição 2 e Corolário 2 da Proposição 1) e estão umas para as outras da mesma forma que os versos-senos dos arcos menores descritos em tempos iguais (pelo Corolário 4, Proposição 1), ou seja, da mesma forma que os quadrados dos mesmos arcos aplicados aos diâmetros dos círculos (pelo Lema 7), e, portanto, já que estes arcos são proporcionais aos arcos descritos em quaisquer tempos iguais, e os diâmetros são proporcionais aos raios, as forças serão proporcionais aos quadrados de quaisquer arcos descritos no mesmo tempo aplicados aos raios dos círculos. Q.E.D.

Assim, em linguagem contemporânea, a Proposição IV afirma que

$$F \propto \frac{S^2}{R} \quad (1)$$

Nota-se que, embora a expressão (1) seja a conclusão da Proposição IV em si, o resultado de maior impacto veio com o Corolário 6 que segue à dita proposição. Para entender como Newton chegou a isso, serão reproduzidos e discutidos, em seguida, os corolários 1, 2 e 6 dessa Proposição:

COROLÁRIO 1. Portanto, já que estes arcos são proporcionais às velocidades dos corpos, as forças centrípetas estão em uma razão composta da razão direta dos quadrados das velocidades e da razão inversa simples dos raios.

Fig. 5 - Extraída de Newton (2005, p. 487).

Como, para tempos iguais, o resultado obtido por Galileu afirma que

$$S \propto v$$

utilizando isto na expressão (1), tem-se que

$$F \propto \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

COROLÁRIO 2. E, já que os tempos periódicos estão em uma razão composta da razão direta dos raios e da razão inversa das velocidades, as forças centrípetas estão em uma razão composta da razão direta dos raios e do quadrado da razão inversa dos tempos periódicos.

Fig. 6 - Extraída de Newton (2005, p. 487).

Segundo Galileu

$$T \propto \frac{R}{v} \quad (3)$$

Substituindo (3) em (2), tem-se

$$F \propto \frac{R^2}{T^2 R}$$

Logo

$$F \propto \frac{R}{T^2} \quad (4)$$

COROLÁRIO 6. Se os tempos periódicos estão na raiz quadrada do cubo da razão dos raios, e portanto as velocidades inversamente na raiz quadrada da razão dos raios, as forças centrípetas estarão na razão inversa dos quadrados dos raios e vice-versa.

Fig. 7 - Extraída de Newton (2005, p. 488).

Sendo

$$T \propto \sqrt{R^3}.$$

A terceira lei de Kepler pode ser escrita na forma

$$T^2 \propto R^3 \quad (5)$$

Portanto, pelas expressões (3) e (5)

$$v \propto \frac{R}{T} \quad \therefore \quad v^2 \propto \frac{R^2}{T^2} \quad \therefore \quad v^2 \propto \frac{R^2}{R^3} \quad \therefore \quad v^2 \propto \frac{1}{R} \quad \therefore \quad v \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$

Assim, substituindo (5) em (4)

$$F \propto \frac{R}{T^2} \quad \therefore \quad F \propto \frac{R}{R^3} \quad \therefore \quad F \propto \frac{1}{R^2}.$$

Essa relação estabelece que a força centrípeta que gera um movimento circular e uniforme é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o corpo que gira e o centro do círculo. Newton comenta no Escólio que sucede aos nove corolários da proposição IV que o resultado desse Corolário 6 “acontece nos corpos celestiais (conforme Sir Christopher Wren, dr. Hooke e dr. Halley observaram separadamente)” (NEWTON, 2005, p. 488). E anuncia que, por meio dessa proposição e seus corolários, “poderemos descobrir a proporção de uma força centrípeta para qualquer outra força conhecida, tal qual a da gravidade. Pois se um corpo, por meio de sua gravidade, gira em um círculo concêntrico à Terra, esta gravidade é a força centrípeta deste corpo” (NEWTON, 2005, p. 488-489). Os resultados dessa proposição são tão fundamentais para a elaboração da lei da GU, que Newton, no mesmo Escólio, tem a preocupação de demonstrá-la de outra maneira, usando a geometria de um polígono.

A Proposição V, que só aparece no *Principia*, apresenta “um modo claro de achar o centro de força, dada uma órbita e a velocidade em dois pontos quaisquer.” (COHEN, 1983, p. 283) e a Proposição VI, também encontrada em *De*

Motu, é uma generalização da Proposição IV, fornecendo um meio de medir a força centrípeta, através da expressão (3), para qualquer órbita com centro imóvel. Isso permitiu a Newton resolver os problemas das proposições VII a XIII, sintetizadas na tabela a seguir.

| Proposição | Forma da órbita | Localização do centro de força | Lei de força |
|------------------------------------|--------------------|--------------------------------|--|
| VII (também em <i>De Motu</i>) | Círculo | Qualquer ponto do círculo | $F \propto \frac{1}{R^2 C^3}$ R = altura do corpo (da posição do corpo na órbita ao centro de força) C = corda que sai do corpo e passa pelo centro de força |
| VIII | Semicircunferência | Ponto muito distante | $F \propto \frac{1}{R^3}$ |
| IX | Espiral | Centro | $F \propto \frac{1}{R^3}$ |
| X (também em <i>De Motu</i>) | Elipse | Centro | $F \propto R$ |
| XI (também em <i>De Motu</i>) | Elipse | Um dos focos | $F \propto \frac{1}{R^2}$ |
| XII | Hipérbole | Um dos focos | $F \propto \frac{1}{R^2}$ |
| XIII | Parábola | Um dos focos | $F \propto \frac{1}{R^2}$ |

Há de se levar em conta que esses resultados apresentados por Newton eram considerados sempre no limite em que os arcos, cordas e tangentes tendiam a coincidir entre si por aproximação entre os extremos de tais linhas, portanto era com tais aproximações que os resultados eram válidos. A dificuldade de aceitação inicial do *Principia* por parte de muitos dos contemporâneos de Newton pode se

dever em grande parte à falta de familiaridade e mesmo compreensão dessa nova matemática que estava sendo utilizada e que foi por ele inventada.

Newton mostrou que, para o movimento orbital em uma elipse, em uma hipérbole e em uma parábola, a força, com centro nos respectivos focos, é inversamente proporcional ao quadrado da distância, logo ele generaliza os resultados das proposições XI, XII e XIII mostrando que, para secções cônicas, a força é do tipo $1/R^2$, resolvendo assim o ‘problema direto de Halley’²⁰.

No Corolário 1 da Proposição XIII, na primeira edição do *Principia* em 1687, ele enunciou o problema inverso, porém não fez nenhuma demonstração (COHEN, 1983; CUSHING, 1982). Isso gerou muitas críticas e somente na segunda edição em 1713 ele incluiu sentenças adicionais ao Corolário 1 e uma proposição (Proposição XVII) com a suposta prova do problema inverso. Entretanto, não há consenso entre os historiadores quanto à veracidade dessa prova. Robert Weinstock, por exemplo, considera que essa demonstração de Newton é falaciosa e que “Foi Johann Bernoulli, evidentemente, quem, em 1710, primeiro provou que a força do inverso do quadrado implica em uma órbita de secção cônica” (WEINSTOCK, 1982, p. 610). O argumento de Weinstock acerca dessa falácia é que o adendo de Newton ao Corolário 1 da segunda edição do *Principia* apenas estabelece que se um corpo orbita sob uma força do tipo $1/R^2$ descrevendo uma secção cônica, esta secção é unicamente determinada pelas condições iniciais, a saber, a posição e a velocidade do corpo. Cushing (1982) afirma que a Proposição XVII também estabelece a mesma coisa. Portanto, para Weinstock (1982) não se trata, do ponto de vista lógico, de uma prova do problema inverso e este autor cita, ainda, outro conhecido estudioso de Newton, J. Herivel, que também põe em dúvida, embora de forma mais contida, que Newton tenha resolvido com uma completa demonstração o referido problema.

Newton identificou, em um escólio do *De Motu*, essa lei de força com o movimento orbital dos planetas, entretanto retirou este escólio no *Principia*, pois reconheceu que esse movimento não ocorre com o centro de força fixo e sim móvel – a Terra e o Sol giram em torno do centro de gravidade comum a ambos – tratando-se, portanto, de um problema de dois corpos interagindo entre si. Assim, somente no *Principia* Newton compreendeu a atração mútua entre a Terra e o Sol como um caso particular da sua terceira lei – a lei geral de ação e reação. Vale ressaltar quanto a isso que em *De Motu* somente a primeira lei de Newton apare-

²⁰ O ‘problema direto de Halley’ é: dado o tipo de trajetória orbital, qual a lei de força? O problema inverso, portanto, é: dado que a força é do tipo $1/R^2$, qual a trajetória da órbita?

ceu explicitamente; a segunda lei apareceu implicitamente na Proposição I; e a terceira lei sequer apareceu, logo esta é uma novidade do *Principia*, o que “constitui um dos aspectos notáveis deste tratado” (COHEN, 1983, p. 284).

Cohen (1983, 1988) acentua o papel da terceira lei de Newton na compreensão deste acerca da interação mútua entre os corpos, e transcreve duas passagens do *Principia* que deixa isso claro, um trecho das quais será reproduzido a seguir:

A força atrativa encontra-se em ambos os corpos... Embora as ações de cada planeta sobre outro se possam distinguir entre si e possam ser consideradas como as duas ações pelas quais um atrai o outro, porém, como se trata de ações entre os mesmos dois corpos, não são duas ações, mas uma operação simples entre dois termos... A causa da ação é dupla, nomeadamente a disposição de cada um dos dois corpos; a ação é de outro modo dupla, na medida em que se exerce entre dois corpos; mas, por ser entre dois corpos, ela é singular e unitária. Não há, por exemplo, uma operação pela qual o Sol atraia Júpiter e outra operação pela qual Júpiter atraia o Sol, mas uma operação pela qual Júpiter e o Sol se atraem mutuamente (NEWTON, citado por COHEN, 1988, p. 297).

Newton considerou que, se a Terra e Sol interagem mutuamente, os demais planetas, juntamente com o Sol e a Terra, também devem interagir entre si, logo generalizou o problema de dois corpos para o problema de muitos corpos, que ele próprio reconheceu não haver solução exata (Cohen, 1988). Nesse sentido, conforme afirma Cohen, as leis de Kepler, que exerceram um papel fundamental na dinâmica planetária de Newton,

não são estritamente verdadeiras no mundo físico, mas são verdadeiras apenas para uma construção matemática na qual as massas pontuais não interatuam entre si e orbitam ou um centro de forças matemático ou um corpo estacionário que as atrai (Cohen, 1988, p. 296).

Assim, com uma postura instrumentalista, conforme afirma Cohen (1988), Newton mostrou, usando a terceira lei de Kepler – válida apenas por aproximação na dinâmica celeste de Newton – que a força de atração mútua entre o Sol e cada um dos planetas é exatamente a mesma e, em um momento posterior (no Livro III do *Principia*, que trata do ‘sistema do mundo’), mostrou que se trata da mesma força que age mutuamente entre a Terra e a Lua e igualmente a que

atrai os corpos na superfície da Terra devido a esta²¹. Assim, a essa força ele dá o nome de *gravidade*, conforme pode ser visto no Escólio à Proposição V do Livro III:

A força que retém os corpos celestiais em suas órbitas foi até aqui chamada de força centrípeta; mas, sendo tornado claro agora que não pode ser nenhuma outra senão uma força gravitacional, a chamaremos a partir de agora de gravidade. Pois, a causa desta força centrípeta que retém a Lua em sua órbita irá se estender para todos os planetas (NEWTON, 2005, p. 787).

Em seguida (na Proposição VII, Livro III), Newton estende essa generalização da força da gravidade como uma “propriedade universal de todos os planetas” para uma propriedade universal de todos os corpos (COHEN, 1983; CUSHING, 1982), convertendo-a “em uma ‘gravitação universal’, em uma força que atua mutuamente sobre e entre qualquer par de mostras de matéria em qualquer parte do universo” (COHEN, 1983, p. 286). Um aspecto adicional que aumentou ainda mais o grau de generalização da atração gravitacional foi a sua explicação, no Livro III, do movimento dos cometas que ele tratou como espécies de planetas que se moviam com trajetórias elípticas (para os periódicos, que retornavam) ou parabólicas (para os não periódicos, que não retornavam) interagindo gravitacionalmente com o Sol. Isso aumenta ainda mais a amplitude da lei da gravitação universal de Newton, estendendo a ação gravitacional do Sol aos confins do universo.

VI. Implicações para o Ensino da GU

Há uma ampla literatura disponível discutindo o uso da história da ciência no ensino de ciências e, em particular, no ensino de física (MATTHEWS,

²¹ Newton fez essa demonstração na Proposição IV do Livro III do *Principia*, a partir de uma interessante experiência de pensamento no qual supõe a Lua caindo em direção à Terra e calcula a aceleração que atrai a Lua em sua órbita em direção à Terra, comparando em seguida com a aceleração de um corpo na superfície desta, chegando a resultados suficientemente próximos para concluir que se trata da mesma aceleração, logo da mesma força. Cohen (1983) chama a atenção, contudo, para a suspeita de Westfall de que Newton manipulou os dados para obter essa exatidão entre teoria e observação. Uma discussão interessante dessa proposição e de como usá-la didaticamente em salas de aula de física encontra-se em Freire et al. (2004).

1994; AIKENHEAD, 2003; ROBINSON, 1969; ABD-EL-KHALICK; LEDERMAN, 2000; CARVALHO; VANNUCCHI, 2000; DEDES; RAVANIS, 2009; GALILI; HAZAN, 2000, 2001; HEERING, 2000; HOSSON; KAMINSKI, 2007; KLOPFER; COOLEY, 1963; NOTT, 1994; OGUNNIYI, 1987; POCOVÍ, 2007; SEKER; WELCH, 2006; SOLBES; TRAVER, 2003; SEROGLU; KOU-MARAS, 2001). Nessa mesma literatura, pode se encontrar várias formas de implementar esse tipo de abordagem, seja em relação aos objetivos de ensino (uso da história da ciência com vistas a alcançar: aprendizagem conceitual, natureza da ciência, atitudes em direção à ciência, argumentação, metacognição); seja em relação às estratégias de ensino (uso de história da ciência de forma: integrada com o assunto da física, integrada com outra estratégia de ensino, não-integrada); ou seja ainda em relação ao uso dos materiais didáticos (narrativas históricas, biografias, réplicas de experimentos históricos, problemas historicamente contextualizados, estórias de vida de cientistas) (TEIXEIRA et al., 2009). Portanto, não se pretende, nesta seção, fazer uma discussão sobre as razões e as formas para o uso didático da história da ciência. A intenção, aqui, é apenas discutir quais possíveis benefícios que o debate historiográfico acima apresentado pode trazer para auxiliar um professor que pretenda usar a história da ciência como forma de abordar o tópico Gravitação Universal de Newton em sala de aula.

Nesse sentido, um primeiro aspecto que chama a atenção é em relação à imagem de ciência e dos cientistas que o referido debate pode propiciar aos estudantes de graduação (em especial, os de licenciatura em física)²². Como é bem conhecido da literatura, o ensino de ciências convencional tem propiciado uma imagem de ciência e do trabalho dos cientistas muito distante da realidade (GILPEREZ et al., 2001). O debate historiográfico apresentando as visões de Cohen e Westfall sobre os passos de Newton em direção à GU pode ser benéfico nesse sentido por tornar explícito o fato de que Newton desenvolveu esse conhecimento através de um processo lento, trabalhoso e com a contribuição de outros estudiosos, portanto, longe de ter sido obtido por meio de *insights* como é divulgado, por exemplo, no inverossímil episódio da ‘queda da maçã’, encontrado em livros didáticos de física, tais como Máximo e Alvarenga (1997), Lucie (1975), Resnick et al. (1996) e Hewitt (2002).

²² É assumido neste trabalho que, em função da profundidade com que foi tratado o debate historiográfico, parece mais apropriado que ele se destine, em princípio, a estudantes de graduação, especialmente aos futuros professores de física que poderão fazer uso didático do mesmo. Entretanto, com os devidos ajustes, nada impede que possa ser feita uma adaptação para os estudantes do Ensino Médio.

O debate mostra como Newton desenvolveu seus conceitos de força, que inicialmente concebia a ideia de força inerente, ainda sob influência da visão medieval do ímpeto, ou seja, da necessidade da existência de uma força para a produção e manutenção do movimento e somente quinze ou vinte anos depois – a depender da interpretação do historiador – sob influência da interlocução com seus pares, aderiu ao conceito de inércia. O debate também ilustra os processos de transformação de pensamento pelos quais Newton passou até amadurecer sua visão de mundo e chegar a uma concepção acerca do movimento planetário que o permitiu elaborar a lei da GU. Os conceitos inicialmente equivocados de força e os primeiros cálculos errados do ‘teste da Lua’ são exemplos desses processos de mudança. Ademais, as diferenças nas interpretações de Cohen e Westfall sobre a relação que Newton estabelecia entre o conceito de força e o mundo real, o primeiro defendendo uma postura instrumentalista e o segundo defendendo uma postura realista, podem contribuir para uma discussão epistemológica em sala de aula sobre realismo e instrumentalismo na ciência.

Assim, todos esses aspectos presentes nas reconstruções apresentadas nas seções anteriores podem contribuir para propiciar aos estudantes visões mais críticas e mais próximas de concepções pós-positivistas sobre determinados aspectos acerca da natureza da ciência²³, tais como: o conhecimento científico é coletivo, cultural, conjectural, provisório e dinâmico, é influenciado por aspectos subjetivos, não é rígido nem linearmente construído, dentre outros (GIL-PEREZ et al., 2001; LEDERMAN et al., 2001; OSBORNE et al., 2003). Em adição, aquelas reconstruções podem auxiliar também para a ruptura de visões mitificadas do trabalho do cientista, tais como a de que a ciência é produzida por ‘gênios iluminados pelo dom da sabedoria’, muito comuns na imagem geral que os estudantes têm do cientista (GIL-PEREZ et al., 2001).

Outro aspecto que pode ser enfatizado em termos de implicações pedagógicas da revisão desenvolvida neste trabalho diz respeito à aprendizagem conceitual. É bem verdade que não há consenso na literatura quanto aos benefícios do uso didático da história da ciência na aprendizagem dos conceitos científicos

²³ Sabe-se da dificuldade de se chegar a um termo comum sobre o que pode ser considerada uma visão adequada sobre a natureza da ciência, de acordo com as concepções epistemológicas predominantes num dado período. Assume-se aqui, portanto, que é possível propor um número de características atualmente pouco ou não controversas sobre a natureza da ciência em acordo com uma visão pós-positivista da ciência, que passou a tomar corpo a partir da década de sessenta (ver LAUDAN, 2003; MCEVOY, 2007; ROSA, 2006).

(TEIXEIRA et al., 2009), entretanto há relatos da ocorrência de efeitos positivos desse uso (GALILI; HAZAN, 2000; POCOVÍ, 2007; OGUNNIYI, 1987; HOS-SON; KAMINSKI, 2007; DEDES; RAVANIS, 2009). Assumindo essa possibilidade, pode-se afirmar que a discussão histórica sobre a dificuldade de Newton na elaboração da sua dinâmica orbital antes de ter devidamente compreendido os conceitos de inércia e de força centrípeta remete à importância pedagógica para o entendimento destes conceitos por parte dos graduandos com vistas a uma melhor compreensão da GU de Newton.

Há trabalhos que mostram as dificuldades dos estudantes na compreensão da ação gravitacional (LEBOEUF; BORGES, 2002)²⁴. Assim, a referida revisão pode contribuir para a identificação, por parte dos estudantes, dos conceitos anteriores de Newton – sobre força inerente e sobre o equilíbrio entre força centrífuga e gravidade solar – com suas próprias concepções a esse respeito; isso pode ajudar na compreensão das transformações de pensamento em Newton e da necessidade dos conceitos de inércia e de força centrípeta para a GU newtoniana; logo, pode servir como estímulo para um melhor entendimento dos próprios conceitos referidos²⁵.

Outra maneira com que o debate pode contribuir para uma melhor compreensão conceitual diz respeito à própria dedução matemática da lei da GU de Newton, conforme apresentada em muitos livros didáticos de física, tais como Lucie (1975), Nussenzveig (1981) e Alonso e Finn (1972). Nessas deduções, é feita uma aproximação do movimento orbital de um planeta em torno do Sol a uma órbita circular e uniforme e, com uso da expressão da aceleração centrípeta e da terceira lei de Kepler, se deduz a lei de força como inversamente proporcional ao quadrado da distância planeta-Sol (CUSHING, 1982)²⁶. Como nessa dedução

²⁴ Deve-se considerar, entretanto, que o referido trabalho foi feito com estudantes da educação básica.

²⁵ Vale esclarecer que não se está assumindo aqui a ideia de paralelismo entre ontogênese e filogênese como base para a mudança conceitual, já bastante criticada na literatura (MATTHEWS, 1994; DRIVER; EASLEY, 1978; ROWLANDS et al., 1999; MOREIRA; GRECA, 2003). Mas, que a conscientização pelos estudantes das suas próprias concepções com o auxílio da história da ciência e a compreensão das transformações conceituais historicamente contextualizadas, podem contribuir para um entendimento dos novos conceitos científicos sem necessariamente incorrer em abandono das concepções prévias.

²⁶ Em muitos livros didáticos de física, entretanto, a lei da GU de Newton é apresentada diretamente ao leitor sem que essa dedução seja feita, sendo que, em alguns casos, se

não aparece a massa do Sol, são feitos alguns artifícios para resolver esse problema. No caso dos livros de Nussenzveig (1981) e Alonso e Finn (1972) é usada a terceira lei de Newton como artifício para incluir de forma *ad hoc* a massa do Sol, sem uma discussão mais pormenorizada do argumento usado por Newton para dar significado a essa operação. No caso do livro de Lucie (1975), essa massa aparece embutida numa constante geral K , que envolve as demais constantes ($4\pi^2 R^3/T^2$), sem discutir, entretanto, como e porquê a massa do Sol aparece na constante. Esses procedimentos levam à ‘aceitação’ do resultado da dedução sem uma devida compreensão conceitual, sendo que essa última pode ser alcançada de melhor maneira quando o argumento original é apresentado (CUSHING, 1982).

Como salienta Cushing (1982), em nenhum lugar do *Principia* aparece a fórmula $F=GMm/R^2$, logo esta é uma reconstrução contemporânea de um resultado histórico, o que precisa ser feito com cuidado para não incorrer em uma excessiva simplificação da história, distorcendo-a do seu sentido original (BIZZO, 1992; WHITAKER, 1979). A reconstrução histórica feita nas seções precedentes, ao mostrar o argumento de Newton para explicar a interação gravitacional entre o planeta e o Sol a partir da sua terceira lei de movimento em termos de uma única “operação pela qual Júpiter e o Sol se atraem mutuamente”, por conta de que “a força atrativa encontra-se em ambos os corpos” e, assim, “como se trata de ações entre os mesmos dois corpos, não são duas ações, mas uma operação simples entre dois termos” (NEWTON, apud COHEN, 1988, p. 297), torna mais claro conceitualmente o significado da presença das duas massas na lei de força gravitacional²⁷. Quando se pensa na terceira lei de Newton em termos de duas operações independentes, ou seja, em uma ação e, como consequência, uma reação, passam-se intuitivamente duas ideias equivocadas: a de que há uma diferença temporal entre uma operação e outra; e a de que cada uma dessas operações, uma vez independentes entre si, guarda uma relação com a massa do corpo que é agido, ou seja, ao se pensar no Sol agindo sobre o planeta, faz sentido na expressão a presença da massa do planeta, mas não a do Sol, e vice-versa. Portanto, quando se traz à tona o argumento de Newton em termos de uma única ação atuando simultaneamente

deduz as leis de Kepler após a lei da GU ser apresentada. São exemplos de tais livros: Resnick et al. (1996), Halliday et al. (1996), Gonçalves e Toscano (1997), Amaldi (1995), Chaves (2001), McKelvey e Grotch (1979), Orear (1975), Sears et al. (1985), Serway (1996), Máximo e Alvarenga (1997), Tipler (1995), Gaspar (2000), Paraná (2002), Ramalho et al. (2007). Nota-se que foram incluídos aqui livros universitários e do Ensino Médio.

²⁷ O livro didático de Keller et al. (1997) apresenta uma discussão da lei da GU de Newton com um enfoque similar.

nos dois corpos, fica conceitualmente explícita e justificada a presença das duas massas na expressão acima.

Um último aspecto a se discutir aqui é quanto à possibilidade do debate historiográfico apresentado neste trabalho propiciar uma melhor habilidade de argumentação nos estudantes sobre a GU. Vários trabalhos têm apontado a importância da argumentação como parte da educação científica (ABI-EL-MONA; ABD-EL-KHALICK, 2006; ERDURAN et al., 2004; ALBE, 2008; MUNFORD; ZEMBAL-SAUL, 2002; JIMÉNEZ-ALEIXANDRE et al., 2000a,b). Alguns trabalhos (HOSSON; KAMINSKI, 2007; CARVALHO; VANNUCCHI, 2000; TEIXEIRA et al., 2010), em particular, salientam o papel de uma abordagem histórica do ensino de física na melhoria da capacidade de argumentação dos estudantes, “nós podemos afirmar, em primeiro lugar, que discussões histórico-filosóficas podem contribuir para o desenvolvimento de habilidades cognitivas e de argumentação” (CARVALHO; VANNUCCHI, 2000, p. 442). O principal argumento para isto é que o envolvimento dos estudantes em atividades dialógicas em sala de aula os habilita a melhor desenvolver sua capacidade de argumentação sobre o conteúdo – objeto da discussão – em função da exposição dos estudantes à prática de expressar e defender suas ideias e de se contrapor às dos outros.

O envolvimento dos estudantes em atividades discursivas sobre controvérsias científicas, como as que Newton esteve envolvido em quase todo o seu percurso em direção à GU, conforme foi apresentado no debate historiográfico que precedeu esta seção aparece, portanto, como uma vantajosa ferramenta pedagógica que, utilizando a história da ciência, pode propiciar melhor destreza na argumentação dos estudantes sobre o que aprenderam em relação à GU.

Referências

ABD-EL-KHALICK, F.; LEDERMAN, N. G. The Influence of History of Science Courses on Students' Views of Nature of Science. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 37, n. 10, p. 1057-1095, 2000.

ABI-EL-MONA, I.; ABD-EL-KHALICK, F. Argumentative Discourse in a High School Chemistry Classroom. **School Science and Mathematics**, v. 106, n. 8, p. 349-361, 2006.

ABRANTES, P. **Imagens de Natureza, Imagens de Ciência**. São Paulo: Papirus, 1998. 248p.

AIKENHEAD, G. S. Review of Research on Humanistic Perspectives in Science Curricula. In: EUROPEAN SCIENCE EDUCATION RESEARCH ASSOCIATION (ESERA), 2003, Noordwijkerhout, The Netherlands. 19-23.

ALBE, V. When scientific knowledge, daily life experience, epistemological and social considerations intersect: students' argumentation in group discussions on a socio-scientific issue. **Research in Science Education**, v. 38, n. 1, p. 67-90, 2008.

ALONSO, M.; FINN, E. **Física: Um Curso Universitário. Mecânica**. Tradução: Giorgio Mascati. São Paulo: Edgard Blucher, 1972. v. 1

AMALDI, U. **Imagens da Física**. São Paulo: Scipione, 1995.

ASSIS, A. K. T. **Uma nova Física**. São Paulo: Perspectiva, 1999. 176p.

BASSALO, J. M. F. **Crônicas da Física**. Tomo 3. Belém: EDUFPA, 1992. 401p.

BIZZO, N. M. V. História da Ciência e Ensino: Onde terminam os paralelos possíveis? **Em Aberto**, v. 11, n. 55, p. 29-35, 1992.

CARVALHO, A. M. P.; VANNUCCHI, A. I. History, Philosophy and Science Teaching: Some Answers to "How?" **Science and Education**, v. 9, n. 5, p. 427-448, 2000.

CHAVES, A. **Física. Mecânica**. Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso, 2001. v. 1

COHEN, I. B. **La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas**. Tradução: Carlos Solís Santos. Madrid: Alianza Editorial, 1983. 425p.

COHEN, I. B. **O nascimento de uma nova Física**. Tradução: Maria Alice Gomes da Costa. Lisboa: Gradiva, 1988. 305p.

CUSHING, J. T. Kepler's Laws and Universal Gravitation in Newton's Principia. **American Journal of Physics**, v. 50, n. 7, p. 617-628, 1982.

DEDES, C.; RAVANIS, K. Teaching image formation by extended light sources: the use of a model derived from the History of Science. **Research in Science Education**, v. 39, n. 1, p. 57-73, 2009.

DIAS, P. M. C. $F = ma$?! O nascimento da lei Dinâmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 28, n. 2, p. 205-234, 2006.

DOBBS, B. J. T. **The Foundations of Newton's Alchemy**. Cambridge: University Press, 1974.

DRIVER, R.; EASLEY, J. Students and paradigms: a review of literature related to concept development in adolescent science students. **Studies in Science Education**, v. 5, p. 61-84, 1978.

ERDURAN, S.; SIMON, S.; OSBORNE, J. TAPing into argumentation: developments in the application of Toulmin's argument pattern for studying science discourse. **Science Education**, v. 88, n. 6, p. 915-933, 2004.

FREIRE, O.; MATOS, M.; VALLE, A. Uma exposição didática de como Newton apresentou a força gravitacional. **Física na Escola**, v. 5, n. 1, 2004.

GALILI, I.; HAZAN, A. The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in Optics evaluated by means of facets-schemes analysis. **American Journal of Physics**, v. 68 (S1), S3-S15, 2000.

GALILI, I.; HAZAN, A. The Effect of a History-based Course in Optics on Students' Views about Science. **Science and Education**, v. 10, n.1-2, p. 7-32, 2001.

GASPAR, A. **Física**. Mecânica 1. São Paulo: Ática, 2000.

GIL-PEREZ, D.; MONTORO, I. F.; ALÍS, J. C.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência e Educação**, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GONÇALVES, A.; TOSCANO, C. **Física e Realidade**. Mecânica.. São Paulo: Scipione, 1997. v.1

HALL, A. R. Newton on the calculation of central forces. **Annals of Science**, v. 13, p. 62-71, 1957.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física 2**. 4. ed Rio de Janeiro: LTC, 1996.

HEERING, P. Getting shocks: Teaching Secondary School Physics through History. **Science and Education**, v. 9, n. 4, p. 363-373, 2000.

HEWITT, P. G. **Física Conceitual**. Tradução: Trieste Freire Ricci e Maria Helena Gravina. 9. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

HOSSON, C.; KAMINSKI, W. Historical controversy as an educational Tool: Evaluating elements of a teaching-learning sequence conducted with the text “Dialogue on the Ways that Vision Operates”. **International Journal of Science Education**, v. 29, n. 5, p. 617–642, 2007.

JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M.; MUÑOZ, C; CUADRADO, V. (2000a). Expertise, argumentation and scientific practice: A case study about Environmental Education in the 11th Grade. In: ANNUAL MEETING OF THE NATIONAL ASSOCIATION FOR RESEARCH IN SCIENCE TEACHING (NARST), 2000a, New Orleans, L.A. (ERIC Document Reproduction Service no ED 439 960).

JIMÉNEZ-ALEIXANDRE, M.; RODRÍGUEZ, A.; DUSCHL, R. “Doing the Lesson” or “Doing Science”: Argument in High School Genetics. **Science Education**. v. 84, n. 6, p. 757-792, 2000b.

KELLER, F.; GETTYS, W.; SKOVE, M. **Física**. São Paulo: Makron Books, 1997. v. 1.

KLOPFER, L. E.; COOLEY, W. W. The History of Science cases for High Schools in the development of student understanding of science and scientists: A report on the HOSC Instruction Project. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 1, n. 1, p. 33-47, 1963.

LAUDAN, R. Positivism and Scientism. In: HEILBRON, J. L. (Ed.). **The Oxford Companion to the History of Modern Science**. New York: Oxford University Press, 2003. p. 670-671.

LEBOEUF, H. A.; BORGES, A. T. (2002). Cai por causa do ar: a gravidade como ação à distância. In: EPEF, VIII, 2002, Águas de Lindóia, SP. **Resumos...** Disponível em: <http://www.sbf1.sbfisica.org.br/eventos/epf/viii/PDFs/CO14_2.pdf>. Acesso em: 13 out. 2009.

LEDERMAN, N. G.; SCHWARTZ, R. S.; ABD-EL-KHALICK, F.; BELL, R. L. Pre-service teachers’ understanding and teaching of the nature of science: An intervention study. **Canadian Journal of Science, Mathematics, and Technology Education**, v. 1, p. 135-160, 2001.

- LUCIE, P. **Física Básica 1**. Rio de Janeiro: Fundação Cesgranrio, 1975. 373p.
- MCEVOY, J. G. Modernism, postmodernism and the historiography of science. **Historical Studies in the Physical and Biological Sciences**, v. 37, n. 2, 383-408, 2007.
- MATTHEWS, M. **Science Teaching: The role of History and Philosophy of Science**. New York: Routledge, 1994.
- MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. **Curso de Física 1**. São Paulo: Scipione, 1997. 392p.
- MCKELVEY, J.; GROTCHE, H. **Física 2**. São Paulo: Harbra, 1979.
- MOREIRA, M. A.; GRECA, I. M. Cambio conceptual: Análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo. **Ciência & Educação**, v. 9, n. 2, p. 301-315, 2003.
- MUNFORD, D.; ZEMBAL-SAUL, C. Learning Science Through Argumentation: Prospective Teachers' Experiences in an Innovative Science Course. In: ANNUAL MEETING OF THE NATIONAL ASSOCIATION FOR RESEARCH IN SCIENCE TEACHING (NARST), 2002, New Orleans, L.A. (ERIC Document Reproduction Service nº ED 465 520).
- NEWTON, I. Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural. In: HAWKING, S. **Os Gênios da Ciência: sobre os Ombros de Gigantes**. Tradução: Sergio M. Dutra. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. p. 441-638.
- NOTT, M. Teaching Physics and the Nature of Science Together: A Case Study. **Physics Education**, v. 29, n. 3, p. 170-176, 1994.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 1. Mecânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. 519p.
- OGUNNIYI, M. B. Conceptions of traditional cosmological ideas among literate and nonliterate nigerians. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 24, n. 2, p. 107-117, 1987.
- OREAR, J. **Física**. Rio de Janeiro: LTC, 1975.

OSBORNE, J.; COLLINS, S.; RATCLIFFE, M.; MILLAR, R.; DUSCHL, R. What “Ideas-about-Science” Should Be Taught in School Science? A Delphi Study of the Expert Community. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 40, n. 7, p. 692–720, 2003.

PARANÁ. **Física**. 3. ed. São Paulo: Ática, 2002. v. único.

PEDUZZI, L. O. Q. **Da Física e da Cosmologia de Descartes à Gravitação Newtoniana**. Publicação interna. Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008. 109p.

POCOVÍ, M. C. The effects of a history-based instructional material on the students' understanding of field lines. **Journal of Research in Science Teaching**, v. 44, n. 1, p. 107-132, 2007.

RAMALHO, F.; FERRARO, N.; TOLEDO, P. **Os Fundamentos da Física 1**. Mecânica. 9. ed. São Paulo: Moderna, 2007.

RATTANSI, P. M. Newton and the wisdom of the ancients. In: FLAUVEL, J. et al. **Let Newton Be!** New York: Oxford University Press, 1988.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D.; KRANE, K. **Física 2**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

ROBINSON, J. T. Philosophical and historical bases of science teaching. **Review Educational Research**, v. 39, n. 4, p. 459-471, 1969.

ROSA, L. P. **Tecnociências e Humanidades: Novos Paradigmas, Velhas Questões**. São Paulo: Paz e Terra, 2006.

ROWLANDS, S.; GRAHAN, T.; BERRY, J. Can we speak of alternatives frameworks and conceptual change in Mechanics? **Science and Education**, v. 8, p. 241-271, 1999.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M.; YOUNG, H. **Física 1**. Mecânica da Partícula e dos Corpos Rígidos. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1985.

SEKER, H.; WELCH, L. C. The use of History of Mechanics in teaching motion and force units. **Science and Education**, v. 15, n. 1, p. 55-89, 2006.

SEROGLOU, F.; KOUMARAS, P. The contribution of the History of Physics in Physics Education: A review. **Science and Education**, v. 10, n. 1, p. 153-172, 2001.

SERWAY, R. **Física 1**. Mecânica e Gravitação. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

SOLBES, J.; TRAVER, M. Against a negative image of Science: History of Science and the teaching of Physics and Chemistry. **Science and Education**, v. 12, n. 7, p. 703-717, 2003.

TEIXEIRA, E. S.; SILVA, C. P.; FREIRE, O.; GRECA, I. (2010). A Construção de uma Argumentação sobre a Síntese Newtoniana a partir de Atividades em Grupos. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 15, n. 1, p. 61-95, 2010.

TEIXEIRA, E. S.; GRECA, I.; FREIRE, O. The History and Philosophy of Science in Physics Teaching: A research synthesis of didactic interventions. **Science and Education**, 2009. DOI 10.1007/s11191-009-9217-3.

TIPLER, P. **Física**. Gravitação, Ondas e Termodinâmica. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1995. v. 2.

WEINSTOCK, R. Dismantling a Centuries-old Myth: Newton's Principia and Inverse-Square Orbits. **American Journal of Physics**, v. 50, n. 7, p. 610-617, 1982.

WESTFALL, R. S. **Force in Newton's Physics**. London: MacDonald; New York: American Elsevier, 1971.

WESTFALL, R. S. A vida de Isaac Newton. Tradução: Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

WHITAKER, M. A. B. History and quasi-history in Physics Education – Part 2. **Physics Education**, v. 14, p. 239-242, 1979.

WHITESIDE, D. T. Newton's early thoughts on planetary motion: A fresh look. **The British Journal for the History of Science**, v. 2, n. 6, p. 117-137, 1964.

WHITESIDE, D. T. Before the Principia: the maturing of Newton's thoughts on Dynamical Astronomy, 1664-1684. **Journal for the History of Astronomy**, v. 1, p. 5-19, 1970.

WILSON, C. From Kepler's laws, so-called, to Universal Gravitation: Empirical Factors. **Archive for History of Exact Sciences**, v. 6, p. 89-170, 1970.