

UNIFICAÇÃO NEWTONIANA À LUZ DE UMA RECONSTRUÇÃO RACIONAL SOB VIÉS EPISTEMOLÓGICO

Jenner Barretto Bastos Filho

Instituto de Física – Universidade Federal de Alagoas

jenner@fis.ufal.br

RESUMO

Argumento aqui que o complexo processo histórico que redundou na unificação newtoniana pode ser compreendido por meio de uma reconstrução racional com viés epistemológico e que esta opção é salutar em situações de ensino de ciências pelo fato de suscitar inúmeros problemas. Esta opção pedagógica não exclui outras opções. Deste modo, uma abordagem do gênero provê meios para o enfrentamento de várias tensões que se apresentam por ocasião da introdução da história e da filosofia da ciência no seio do ensino de ciências, notadamente no seio do ensino de física. Argumento, outrossim, que reconstruções racionais sob um viés epistemológico favorecem o exercício da autonomia intelectual tanto do professor quanto de seus estudantes devido à permanente solicitação exigida em prol da produção de significados.

Palavras chave: Unificação Newtoniana; Revolução Científica; Galileu; Kepler; Newton.

ABSTRACT

I argue that the complex historical process leading to the Newtonian Unification can be understood by means of an approach consisting of a rational reconstruction with epistemological emphasis. In science teaching situations involving criticism this approach reveals as a suitable one by virtue of its potentiality to providing great number of concepts in confrontation among them. We argue also that rational reconstructions with epistemological emphasis are probably the best way in order to provide intellectual autonomy of both, teachers and students, due to the natural solicitation for production of meanings.

Keywords: Newtonian Unification; Scientific Revolution; Galileo; Kepler; Newton.

1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

O presente trabalho se apresenta em linha de continuidade conceitual com dois trabalhos anteriores (BASTOS FILHO, 2017a; 2017b) nos quais apresentei a fundamentação da tese segundo a qual, em situações de ensino, uma abordagem que adote **reconstruções racionais sob um viés epistemológico** pode favorecer sobremaneira a introdução da história e da filosofia da ciência por ocasião dos cursos de ciências e em especial dos cursos de física. Pautei-me pela análise cuidadosa dos seguintes elementos intervenientes: (1) das tensões entre uma interpretação whig da história e uma interpretação não whig da mesma; (2) das tensões entre a filosofia e a

história da filosofia; (3) das tensões entre a história da ciência e a filosofia da ciência; (4) das tensões e possíveis conciliações, ou mesmo dissoluções entre o contexto da descoberta e o contexto da justificação; (5) das tensões ensejadas pela transposição didática; (6) do conceito de presente contínuo e do desafio das novas tecnologias; (7) do desafio do ensino de ciências em tempos de modernidade líquida; (8) do desafio da passagem do dialético ao dialógico e; (9) da proposta que aproxima a aprendizagem significativa da reconstrução racional com viés epistemológico. A argumentação é longa e articulada, razão pela qual não a reproduzo aqui; remeto para os trabalhos citados precedentemente nos quais se concentra a fundamentação da tese.

Neste trabalho tenho a intenção de me ater a um importante e emblemático exemplo que, a meu ver, consubstancia a tese segundo a qual uma abordagem centrada em *reconstruções racionais com viés epistemológico* revela-se mais apropriada para o ensino de ciências - notadamente para o ensino de física- na medida em que as possibilidades de prover debate são férteis, são diversas e ensejam potencialidades para estudos segundo diferentes pontos de vista. Além do mais, uma abordagem do gênero oferece possibilidades adequadas para o enfrentamento das inúmeras tensões que aparecem quando nos deparamos com temas de tamanha complexidade e, deste modo, favorecem também o exercício da autonomia intelectual de professores e estudantes tanto pelo desafio perante o enfrentamento das tensões que inevitavelmente emergem, quanto pelo desafio devido à solicitação permanente em prol de produção de significados.

2. A UNIFICAÇÃO NEWTONIANA E A QUESTÃO DAS INFERÊNCIAS INDUTIVAS, DEDUTIVAS E ABDUTIVAS

O primeiro exemplo que trarei à baila para a discussão será o da *Unificação Newtoniana*. Em 1995, (BASTOS FILHO, 1995) publiquei um artigo na Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF). A minha intenção na época era a de oferecer um texto que privilegiasse a *compreensão* deste importante episódio, ou talvez mais precisamente, dessa enorme gama de episódios, episódios esses que redundaram nesse extraordinário feito constituído pela unificação newtoniana. Uma abordagem do gênero, em que pese necessariamente esquemática e lacunar, tinha a vantagem de oferecer um quadro de compreensibilidade relativamente conciso de uma grande realização do espírito humano.

Repito aqui que o objetivo precípua de meu artigo sobre a unificação newtoniana estava intimamente conectado com a minha atividade de professor de física: prover a mim próprio, a meus alunos e a meus eventuais leitores uma *compreensão* clara deste feito grandioso da história da ciência bem como do conjunto de conceitos e teorias subjacentes a esse processo necessariamente complexo. A *compreensão* constitui-se em palavra chave aqui neste contexto, razão pela qual aqui a ênfase lançando mão, para grafá-la, com caracteres itálicos e, além disso, com caracteres em negrito.

Foram várias as fontes de inspiração para escrevê-lo: uma delas foi o argumento de Popper (POPPER, 1974a, p. 186-192; POPPER, 1982, p. 23-25) sobre a impossibilidade de ambas as passagens indutivas: tanto, por um lado, da pressuposta passagem indutiva da teoria de Galileu dos movimentos locais para a lei da gravitação universal de Newton, quanto, por outro lado, da pressuposta passagem indutiva da astronomia de Kepler para a lei da gravitação universal de Newton.

Quanto à pressuposta passagem indutiva da teoria dos movimentos locais de Galileu para a teoria da gravitação universal de Newton isso, segundo Popper, seria impossível pelo fato das premissas de partida serem contraditas pelo resultado de chegada. Em outras palavras, a teoria da queda livre de Galileu assevera que os corpos caem com aceleração constante a partir de pequenas alturas comparativamente ao raio da Terra; à luz da teoria gravitacional de Newton, no entanto, a queda livre constitui-se em um movimento no qual a aceleração aumenta durante a queda. Deste modo, não se poderá concluir algo a partir da premissa segundo a qual *a aceleração durante a queda seja constante*, para se concluir que *a aceleração aumenta durante a queda* pois, a premissa de partida (a aceleração é constante) seria contradita pelo resultado de chegada (a aceleração aumenta). Consequentemente, para esse caso, a inferência indutiva é falsa e não pode se sustentar.

Obviamente, o caminho inverso é legítimo, ou seja, o caminho a partir da teoria gravitacional de Newton para a teoria da queda livre de Galileu. Ora, se bem que segundo a teoria gravitacional de Newton a aceleração com a qual os corpos caem a pequenas alturas comparadas com o raio da Terra aumente durante a queda, podemos, em ótima aproximação, considerá-la para todos os propósitos práticos como constante e aí a passagem da teoria da gravitação universal de Newton para a teoria da queda livre

de Galileu torna-se inteiramente inteligível enquanto uma passagem de um caso geral para um caso particular.

Situação análoga se dá, segundo Popper, se considerarmos uma pressuposta passagem indutiva a partir da teoria de Kepler para a teoria da gravitação universal de Newton pois as premissas da teoria de Kepler baseadas em uma harmonia do mundo envolvendo multicorpos seriam contraditas pela teoria da gravitação universal de Newton que trata de interações entre pares de corpos tomados de per si.

Novamente aqui, o caminho inverso é perfeitamente legítimo pois podemos considerar a teoria de Kepler como um caso particular de uma teoria mais geral como é o caso da teoria gravitacional de Newton.

Era um poderoso argumento contra a inferência indutiva e nisso Popper revelava-se como alguém que praticava a sua autoridade intelectual manifestando a sua autonomia, pois conforme o próprio Popper enfatizava, ele se insurgia contra argumentos de homens como Isaac Newton (1642-1727) e Max Born (1882-1970).

Uma passagem importante na qual Newton se refere a uma inferência indutiva pode ser encontrada no Escólio Geral de seus *Principia* logo após escrever sobre a lei do inverso do quadrado da distância concluída de sua pesquisa sobre a órbita de Saturno. Trata-se da mesma passagem do famoso *Hypotheses non fingo*. Newton escreve:

Mas até então não consegui descobrir a causa dessas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos, e não faço hipóteses. Para algo que não seja deduzido a partir dos fenômenos é chamado de hipótese; e hipóteses, se ou físicas, se de qualidades ocultas ou mecânicas não têm lugar na filosofia experimental. Nesta filosofia, proposições particulares são inferidas a partir dos fenômenos e a partir de então tornadas gerais por indução (NEWTON, nossa tradução para o português a partir da tradução em inglês).¹

Embora Newton tenha afirmado isso, pode-se seriamente duvidar de sua sinceridade, pois a sua obra é demasiadamente grandiosa para que pudéssemos considerá-la como resultante meramente de uma inferência indutiva. Aqui, não se trata

¹ But hitherto I have not been able to discover the cause of those properties of gravity from phenomena, and I frame no hypotheses. For whatever is not deduced from the phenomena is to be called an hypothesis; and hypotheses, whether metaphysical or physical, whether of occult qualities or mechanical, have no place in experimental philosophy. In this philosophy particular propositions are inferred from phenomena, and afterwards rendered general by induction. (NEWTON, 1978, p. 371; o livro original foi publicado em latim em 1687)

propriamente de discutir Newton sob a ótica psicológica e sim do modo como Popper o faz, considerando que a inferência indutiva não se sustenta para o caso newtoniano. É possível que Newton quisesse agradar o *establishment* empirista inglês que considerava a indução como a inferência que sustenta o empirismo, pelo menos o empirismo da época.

Pode até parecer algo espantoso como um pensador tão extraordinário como Newton, considerado como singularíssimo em importância e em poder criador, tenha feito uma avaliação assim tão imprecisa acerca de seu próprio pensamento rebaixando-o a meras inferências indutivas. A propósito. Edwin A. Burtt em seu importante livro *As Bases Metafísica da Ciência Moderna*, escreve: Em descoberta científica e formulação, Newton foi gênio; como filósofo, era desprovido de crítica, impreciso, inconsistente e, até mesmo secundário. (BURTT, 1991, p. 168)

Ao analisar o estatuto das inferências indutivas, dedutivas bem como aquelas por abdução, Charles Sanders Peirce (PEIRCE, 1989) argumentou que ideias realmente novas não são inferidas nem por indução nem por dedução e sim por abdução que é uma inferência bem mais nobre e que consiste em inventar uma teoria nova para explicar fatos ou, mais geralmente, para explicar um conjunto de fatos. Haveremos pois de convir que um trabalho grandioso como o da unificação newtoniana exige algo como a abdução de Peirce, ou uma intuição criadora à la Bergson ou ainda a livre criação de Einstein; neste estágio podemos trazer a lume a seguinte citação de Popper:

“Todavia, a visão que tenho do assunto, valha o que valer, é a de que não existe um método lógico de conceber ideias novas ou de reconstruir logicamente esse processo. Minha maneira de ver pode ser expressa na afirmativa de que toda descoberta encerra um "elemento irracional" ou uma "intuição criadora", no sentido de Bergson. De modo similar, Einstein fala da "busca daquelas leis universais (...) com base nas quais é possível obter, por dedução pura, uma imagem do universo. Não há caminho lógico", diz ele "que leve a essas (...) leis. Elas só podem ser alcançadas por intuição alicerçada em algo como um amor intelectual (*Einfühlung*) aos objetos de experiência". (POPPER, 1974b, p. 32)

Einstein expressou essas ideias em famosa carta de 7 de maio de 1952 a seu amigo de juventude Maurice Solovine (EINSTEIN, 1993, p. 135-139). A despeito da importância deste ponto, que no fundo revela a adoção epistemológica de Einstein, a opção de explorá-lo neste artigo nos levaria muito longe, razão pela qual não o faremos aqui. Centraremos a nossa atenção no importante problema da causalidade que será objeto da próxima seção.

3. A QUESTÃO DA CAUSALIDADE COLOCADA POR MAX BORN

Vejam agora uma passagem na qual Max Born argumenta que a lei do inverso do quadrado da distância pode ser deduzida a partir das leis de Kepler. É necessário esclarecer o que isso significa ou pode significar. Born escreve:

O fato de que a lei de Newton é uma consequência lógica das leis de Kepler é a base sobre a qual reside toda a minha concepção de causalidade em física. Pois é, além da simples demonstração de Galileu, o primeiro e principal exemplo de uma relação atemporal de causa-efeito deduzida a partir de observações. Na maioria dos livros-textos de mecânica é seguido o caminho oposto (dedução das leis de Kepler a partir das de Newton). Portanto, pode ser útil dar a prova completa em termos modernos (BORN, nossa tradução para o português a partir do texto em inglês).²

Após deduzir que a partir das leis de Kepler para o movimento orbital dos planetas em torno do Sol, podemos concluir que a aceleração centrípeta agindo sobre cada planeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao Sol, Born escreve:

Isso demonstra a afirmação do texto de que a obtenção de Newton de sua lei de força é puramente dedutiva, com base no trabalho indutivo de Tycho Brahe e Kepler. A nova propriedade característica devido a Newton é a interpretação teórica da fórmula deduzida para a aceleração, como representando a "causa" do movimento, ou a força que determina o movimento, o que o levou à idéia fundamental de gravitação geral (cada corpo atrai um ao outro). Nos livros-texto, esta situação nem sempre é clara; isso pode ser devido à própria representação de Newton em seus *Principia*, onde ele usa apenas construções geométricas no estilo clássico dos gregos (BORN, tradução para o português).³

Popper não concorda nem com Isaac Newton nem com Max Born e aqui podemos tecer um comentário rápido acerca dos argumentos de Born. Mais tarde desenvolveremos mais detalhadamente esse ponto.

Ora, é possível provar, tal como mostrou Born, que a partir das leis de Kepler, obtemos o resultado segundo o qual a aceleração centrípeta que age sobre um dado

² The fact that Newton's law is a logical consequence of Kepler's laws is the basis on which my whole conception of causality in physics rests. For it is, apart from Galileo's simple demonstration the first and foremost example of a timeless cause-effect relation derived from observations. In most text-books of mechanics the opposite way (deduction of Kepler's laws from Newton's) is followed. Therefore it may be useful to give the full proof in modern terms. (BORN, 1949, p. 129)

³ This demonstrates the statement of the text that Newton's derivation of his law of force is purely deductive, based on the inductive work of Tycho Brahe and Kepler. The new feature due to Newton is the theoretical interpretation of the deduced formula for the acceleration, as representing the 'cause' of the motion, or the force determining the motion, which then led him to the fundamental idea of general gravitation (each body attracts each other one). In the text-books this situation is not always clear; this may be due to Newton's own representation in his *Principia* where he uses only geometrical constructions in the classical style of the Greeks. (BORN, 1949, p. 132-133)

planeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao Sol. Embora Born tenha demonstrado isso para o caso geral de uma trajetória elíptica, é muito fácil mostrar isso se admitirmos o movimento segundo uma órbita circular que é um caso particular da órbita elíptica.

Para tal, temos que pressupor que a teoria da aceleração centrípeta que é válida para o movimento circular de uma pedra que gira sob ação de um menino mediante um fio que liga a mão do menino à pedra, devidamente amarrada ao fio, seja também válida para a situação do planeta que gira em torno do Sol em uma trajetória que supomos, por simplicidade, ser circular.

Até aqui estamos no domínio da cinemática. É conveniente lembrar que tanto a física dos movimentos locais de Galileu quanto a astronomia de Kepler são, ambas, cinemáticas, isto é, ambas apenas exibem relações espaciais e temporais puras (espaço, tempo, velocidade, aceleração). A conexão delas com a dinâmica se dá mediante a introdução dos conceitos newtonianos de massa e força e também dos conceitos newtonianos de espaço absoluto e tempo absoluto quando esses são conectados com os princípios da dinâmica newtoniana. O foco de Born é a causa atribuída à aceleração centrípeta e, mais adiante, ao considerar os conceitos newtonianos de massa e de força, o foco também é a causa atribuída à força newtoniana que age sobre o planeta e que é, da mesma maneira, inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao sol.

Este desenvolvimento envolve pelo menos dois passos: o primeiro é supor que a teoria da aceleração centrípeta que vale para o par {menino-pedra} seja também válida para o par {sol-planeta}; assim, obtemos o resultado segundo o qual a aceleração centrípeta sofrida pelo planeta é inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao sol, passo este que ainda pressupõe que tudo se passa como se houvesse um "fio" ligando planeta ao Sol, abstração essa necessária ao se trabalhar com grandes ideias; o segundo passo constitui-se na passagem da cinemática para a dinâmica e assim, podemos dizer simplificada, que a partir da fórmula $\mathbf{F}=\mathbf{ma}$ concluímos que a força centrípeta que age sobre o planeta é também inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao sol.

Esses dois passos introduzem as leis de Newton e, evidentemente, os conceitos newtonianos de massa e de força. Contudo, mesmo este resultado **ainda** não se constitui

na lei gravitacional de Newton. Há **ainda** uma grande distância conceitual entre este resultado e a lei da gravitação de Newton pelas razões que em seguida mostraremos.

4. AS QUESTÕES DA UNIVERSALIDADE E DA UNIFICAÇÃO

Ora, o resultado discutido na seção anterior, já obtido no contexto da dinâmica newtoniana, uma vez que os conceitos de massa e de força newtonianas já se encontram devidamente incorporados, diz respeito apenas ao par {sol-planeta} de maneira análoga ao que acontece para o par {menino-pedra}, ou seja, para a força centrípeta que age sobre a pedra. As massas, respectivamente, da pedra e do planeta tem o mesmo estatuto e se referem ao que chamamos de suas respectivas *massas inerciais*. Até aqui, nada de gravitação foi considerado.

Passo gigantesco é dado quando se postula, ou se conjectura, que quaisquer duas massas do universo, M_1 e M_2 interagem entre si segundo forças de interação mútua (ação e reação) que são inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre elas e, que além disso, há uma constante **universal G** que comparece na fórmula que expressa essa interação como

$$F = G M_1 M_2 / (R_{1,2})^2$$

Nesta fórmula, $R_{1,2}$ diz respeito à distância entre as massas respectivamente, M_1 e M_2 .

Se aplicarmos a fórmula acima à força de natureza gravitacional que age sobre o planeta devido à interação {sol-planeta} e a igualarmos à força centrípeta que age sobre o planeta considerado, então estaremos dando, de uma cajadada só, passos conceituais gigantescos que significam, a um só tempo que: (1) a força centrípeta que age sobre o planeta (que até então era de natureza inercial, posto que resultante de uma extensão do par {menino-pedra} para o par {sol-planeta}), passa então a ser igual a uma força de natureza gravitacional resultante de uma lei de caráter **universal**; (2) como de um lado da igualdade aparece uma massa do planeta de natureza inercial e do outro lado da igualdade aparece uma massa do planeta de natureza gravitacional, então admitiremos que **a massa inercial é igual à massa gravitacional**; (3) o caráter **universal** de **G** é de imprescindível importância tanto para encontrar vínculos com a teoria de Kepler quanto, como veremos, para encontrar vínculos com a teoria de Galileu.

Uma vez admitindo isso, concluiremos a seguinte e importante relação de vínculo entre a constante universal G de Newton e a constante característica da astronomia kepleriana K :

$$(G/4\pi^2) = K_{\text{Planeta}}/M_{\text{Sol}}$$

Aqui, K_{planeta} diz respeito à constante de Kepler relativa aos planetas que giram em torno do Sol e M_{Sol} se refere à massa do Sol. Da universalidade de G decorre necessariamente que, embora K_{planeta} e M_{Sol} sejam grandezas particulares e portanto não universais, a relação matemática obtida, contudo, é universal, ou seja,

$$(G/4\pi^2) = K_{\lambda}/M_{\sigma}$$

Aqui, K_{λ} diz respeito à constante de Kepler válida para qualquer um dos λ satélites que giram em torno de um centro σ de massa M_{σ} . Tudo isso acarreta que:

$$(K_{\text{Planeta}}/M_{\text{Sol}}) = (K_{\text{Lua}}/M_{\text{Terra}}) = (K_{\text{Reia}}/M_{\text{Saturno}}) = (K_{\text{Io}}/M_{\text{Júpiter}}) = \dots\dots$$

De maneira análoga, podemos facilmente encontrar a relação que estabelece o vínculo entre a constante de gravitação universal G de Newton com a constante que caracteriza a física dos movimentos locais de Galileu que é a aceleração constante g com a qual os corpos caem a pequenas alturas da superfície da Terra comparativamente com o raio geométrico da Terra $R_{\text{geo.T}}$ e aqui assumimos explicitamente que $R_{\text{geo.T}} \gg h$; assim, podemos dizer que a força $[(M_{\text{Corpo}}) g]$ será igual à força gravitacional

$$[G M_{\text{Corpo}} M_{\text{Terra}}/(R_{\text{geom.T}})^2].$$

Novamente aqui, ao igualarmos as duas forças estamos pressupondo que a força newtoniana que aparece na fórmula da lei da queda livre que, em princípio decorre de considerações de uma física inercial ao fazermos uso apenas da relação $F = ma$, e não de uma física gravitacional, é, de fato, igual à força gravitacional que age sobre o corpo que cai devido a sua interação com a Terra. Desde modo, pressupõe-se que **a massa inercial do corpo seja igual à sua massa gravitacional** e isso é um passo que transcende em muito a física dos movimentos locais que como vimos constitui-se em uma cinemática.

Da igualdade entre essas duas forças (uma de natureza inercial e outra de natureza gravitacional) encontramos a seguinte relação

$$G = g_{\text{Terra}} (R_{\text{geom.T}})^2/M_{\text{Terra}}$$

Novamente aqui, da universalidade de G decorre que, embora as três grandezas do segundo membro da igualdade digam respeito a um objeto particular que é a Terra, a relação matemática obtida é necessariamente universal e válida para qualquer que seja o corpo celeste β para o qual possamos admitir uma queda livre no sentido da física dos movimentos locais de Galileu. Assim, podemos escrever

$$G = g_{\beta} (R_{\beta})^2 / M_{\beta}$$

Então já nos encontramos aptos a estabelecer vínculos entre as três constantes características: a constante universal G da lei da gravitação de Newton e as constantes K de Kepler e g de Galileu e, a partir daí calcular a aceleração constante com a qual os corpos caem a pequenas alturas da superfície da Terra utilizando-nos de dados astronômicos como o raio orbital da Lua em torno da Terra bem como o período orbital da Lua em torno da Terra. Calculando (ver detalhes em BASTOS FILHO, 1995; BASTOS FILHO, 2011) obtemos

$$g_{Terra} = [4\pi^2 / (T_{Lua})^2] (R_{Lua} / R_{geom.T})^3 R_{geom.T}$$

Aqui, T_{Lua} e R_{Lua} são respectivamente, o período orbital e o raio orbital da Lua em torno da Terra. Os cálculos levam a um valor aproximadamente igual a $9,8 \text{ m/s}^2$ e assim as ideias de unificação passam a conhecer um importante elemento de corroboração.

5. DISCUSSÃO DESTE EXEMPLO SOBRE A UNIFICAÇÃO NEWTONIANA

Tendo em vista os argumentos até então articulados neste trabalho, reflito enquanto professor de física, sobre qual seja a natureza do artigo que publiquei em 1995. Certamente, não se trata de um trabalho de história da ciência no sentido estrito do termo nem se constitui em um estudo propriamente engajado nos cânones da filosofia da ciência. Também nele não são analisados elementos da sociologia da ciência nem tampouco de uma história externalista que de alguma maneira pudesse ser contraposta a uma história internalista sobre o tema. O trabalho não é de maneira alguma nada que pudesse se assemelhar a uma pseudo-história, não atropela cronologias, nem comete anacronismos, pelo menos aqueles graves, na medida em que não confunde épocas e tenta analisar conceitos de uma maneira em que um grandioso feito constituído pela unificação newtoniana pudesse ser *compreendido* de uma

maneira racional em contextos que representem **situações de ensino**, quer sejam formais quer sejam informais.

Pergunto, pois:

-Qual a natureza do artigo em tela?

Lembro que o foco do artigo é de **natureza educacional** e a palavra **compreensão** é de fundamental importância no presente contexto. O artigo, no entanto, não se enquadrando nos cânones nem da história nem da filosofia no sentido estrito do termo, não deixa de ser carregado com elementos importantes tanto da história da ciência quanto da epistemologia, tratados com o devido respeito ao que foi consultado de historiadores e de filósofos, mas mantendo e nunca renunciando à autonomia intelectual do professor de física que a seu modo e segundo os seus próprios critérios julgará sobre a pertinência de sua abordagem e decidirá pela sua introdução ou não em situações de ensino, razão pela qual considero que uma abordagem do gênero venha a ser considerada como **uma reconstrução racional com viés epistemológico**, na qual, repito mais uma vez, a autonomia do professor de física é manifestada conforme o famoso grito de **sapere aude** de Kant. É também importante asseverar, com todas as letras, que o conteúdo de física presente no artigo é imprescindível para a sua correta articulação e ele está presente em todas as etapas da argumentação.

Referi-me a uma fonte de inspiração que foi o do argumento de Popper contra a indução - o que atesta a incorporação de ingredientes epistemológicos desde o início da abordagem- e agora vou me referir a um belo excerto de Koyré que interpretei livremente, mas acho que o interpreto coerentemente. Koyré escreve:

A nova física não nasce apenas sobre a terra: ela nasce igualmente sobre os céus. E é nos céus também que ela encontra seu fechamento. Este fato - o fato de que a física clássica possui um "prólogo" e um "epílogo" celestes- ou para falar uma linguagem mais sóbria, o fato de que a física clássica nasce em função da astronomia, e lhe permanece solidária durante toda sua história, é pleno de significado e de relevantes consequências. (KOYRÉ, tradução para o português)⁴

⁴ La physique nouvelle ne naît pas seulement sur la terre: elle naît tout autant dans les cieux. Et c'est dans les cieux aussi qu'elle trouve son achèvement. Ce fait – le fait que la physique classique possède un "prologue" et un "épilogue" celestes – ou pour parler un langage plus sobre, le fait que la physique classique naît en fonction de l'astronomie, et en reste solidaire pendant toute son histoire, est plein de sens et gros de conséquences. (KOYRÉ, *Études Galiléennes*, 1966, p. 165).

Este belo excerto de Koyré, um autor que me foi apresentado em 1972 pelo meu querido amigo e professor Roberto Moreira Xavier de Araújo, me ajudou a pensar bastante sobre o assunto. Creio que seja uma interpretação bastante razoável a atribuição de que a ciência clássica -e aqui a estou interpretando na linha de autores como Copérnico (1473-1543), Galileu (1564-1642), Kepler (1571-1630) e Newton (1642-1727)- tenha um prólogo e um epílogo celestes. Interpreto, sem maiores cerimônias, o prólogo como sendo a publicação do *De Revolutionibus* de Copérnico em 1543 (ano de sua morte) e o epílogo como sendo os *Principia* de Newton publicados em 1687.

De 1543 a 1687 são 144 anos, ou seja, aproximadamente um século e meio, mas isso por si só não significa que a Revolução Científica tenha durado 144 anos. Um conjunto de episódios redundando neste feito tão grandioso para a história da humanidade e para o história do pensamento não teria propriamente uma dada certa nem para começar nem uma data precisa para acabar. Como um exemplo simples de que arbitrar a data de 1543 para o "começo" da Revolução Científica não deixa de ser algo deveras impreciso, basta que nos reportemos ao famoso *Commentariolos* presumivelmente atribuído ao próprio Copérnico (COPÉRNICO, 1990) e presumivelmente escrito em 1510, ou seja, escrito 33 anos antes do famoso *De Revolutionibus*.

Também naquilo que concerne a um pressuposto epílogo não podemos atribuí-lo unicamente a uma data tão exata, em que pese a extraordinária importância de 1687. Lembremos que o século seguinte, o século XVIII, foi profícuo em desdobramentos matemáticos e conceituais importantes da mecânica racional que representaram relevantes aprofundamentos e também de tentativas de divulgação científica como as que constituíram as famosas cartas de Euler a uma princesa alemã (EULER, 1985); em especial, ver a carta n^o 52, escrita em 3 de setembro de 1760, intitulada *Sobre o descobrimento da gravitação universal feita pelo grande Newton* (EULER, 1985. p. 74-77).

Esta carta, se bem que se constitua em exposição belíssima e clara desta grande realização, introduz também alguns elementos que hoje em dia são bastante criticados na literatura da área de ensino de ciências bem como em vários setores da área educacional; na carta, Euler ressalta de maneira mitológica a lenda da maçã e, ainda mais grave, ressalta a imprescindibilidade desta queda para a formulação da teoria da

gravitação universal por Newton; Euler menciona que se a maçã não tivesse caído então talvez nos encontrássemos na mesma ignorância que antes de Newton. Alguns trabalhos levados a termo abordam alguns pontos de obstáculo para o ensino de ciências entre os quais aquele concernente à mitologia da genialidade, o que pode distanciar os estudantes da real natureza do fazer ciência (COSTA DE LUCENA et al. 2017a,b)⁵. Além da verdade, nos dois referidos artigos, não é a genialidade que é vista como problema e sim é a mitologia desta que funciona como elemento intimidador que pode obliterar tanto a autoestima quanto o encorajamento ao protagonismo intelectual dos estudantes e professores e por conseguinte, uma mitologia do gênero funcionaria como um obstáculo à autonomia daqueles que se dedicam tanto ao ensino quanto à pesquisa quanto também a ambas as atividades.

Uma questão importante então aparece. Perguntaríamos a propósito: ora, se criticamos severamente um ensino de ciências centrado na genialidade e na excessiva linearização do processo histórico, então por que colocamos o foco de nossa atenção apenas nos quatro singularíssimos personagens Copérnico, Galileu, Kepler e Newton?

Evidentemente, embora a carta de Euler seja uma explicação clara e pedagógica do tema da unificação newtoniana, não necessariamente apenas por isso, teremos que aceitar o fatalismo extremista segundo o qual se a maçã não tivesse caído naquela hora, então estaríamos privados para sempre do conhecimento da lei da gravitação universal. O episódio da queda da maçã, se verdadeiro ou fictício, tem muito pouca importância na análise dos conteúdos aqui considerados; a importância apenas residiria se quiséssemos analisar o episódio enquanto insight abduutivo pertencente ao campo da psicologia ou acerca de certos processos mentais intervenientes. O ponto mais importante é que a interpretação do episódio, ou do suposto episódio, enquanto apologia triunfalista e intimidadora da figura do gênio em detrimento do protagonismo de simples mortais não gênios, não se constitui, de fato, em uma boa recomendação para a educação científica.

Por outro lado, embora admitamos que centrar o foco de nossa atenção em apenas quatro singularíssimos e importantíssimos personagens seja uma redução de um processo muito mais complexo, ela contém vantagens comparativas em termos de uma

⁵ Nos artigos de Costa de Lucena et al. são analisados e discutidos quatro obstáculos, dos muitos obstáculos que existem para a introdução da História e da Filosofia da Ciência no contexto do Ensino de Ciências, notadamente no contexto do Ensino de Ciências no nível médio; são eles: 1) a excessiva linearização dos processos históricos; 2) a mitologia da genialidade; 3) a ocultação, programática ou não, do importante protagonismo das mulheres; e 4) a não consideração do conflito entre as concepções, interna e externa da ciência.

compreensão do teor da unificação por parte de professores e estudantes. Deste modo, a *compreensão* do processo assim denominado de *Revolução Científica* emerge mediante uma *reconstrução racional de viés epistemológico* que além de didática e pedagógica tem a vantagem de não impedir, em uma análise ulterior que seja mais abrangente, a inclusão de outros importantes protagonistas, bem como de outras relevantes circunstâncias históricas, epistemológicas e inclusive aquelas de teor sociológico.

No tocante à eleição dos quatro mencionados personagens, diríamos que, pelo menos, dois autores também adotaram essa mesma escolha geral: Russell e Cohen.

Russell, por exemplo, (RUSSELL 1993, p.510) centra a sua avaliação acerca do nascimento da ciência, embora não exclusivamente, em quatro protagonistas de primeiríssimo plano, quais sejam Copérnico (1473-1543), Kepler (1571-1630), Galileu (1564-1642) e Newton (1642-1727).

Na mesma direção, Cohen (1987) no prefácio de seu livro sobre o nascimento de uma nova física também dá especial atenção aos mesmos protagonistas referidos por Russell e declara a intenção de seu livro. A propósito ele escreve que,

[...], a intenção é explorar um aspecto da grande Revolução Científica que ocorreu durante os séculos XVI e XVII para esclarecer certos aspectos fundamentais da natureza e desenvolvimento da ciência moderna. (COHEN⁶, 1987, prefácio)

Reiteramos ainda que quando centramos a nossa atenção nos quatro ilustres nomes referidos estamos fazendo uma escolha que -embora legítima e em vários aspectos seja também uma escolha defensável- ela não deixa de ser, apenas por isso, uma simplificação de um processo bem mais complexo. Basta lembrar que o século XVII é especialmente pródigo em nomes seminais como Descartes (1596-1650), Huygens (1629-1695), Pascal (1623-1662), Leibniz (1646-1716) entre vários outros. Se levarmos em conta uma análise mais abrangente, esses nomes, entre outros, devem certamente vir a lume.

Em que pese tudo isso, centro agora a minha atenção na enorme gama de conceitos articulados e profundamente significativos que esta abordagem pode propiciar para um ensino consequente de física.

⁶ [...], the intention is to explore one aspect of the great Scientific Revolution that occurred during the sixteenth and seventeenth centuries, to clarify certain fundamental aspects of the nature and development of modern science (COHEN, 1987, preface, p. xi)

Esta abordagem se constitui em uma *reconstrução racional de um conjunto de episódios da história da ciência sob um viés epistemológico*.

6. A TÍTULO DE CONCLUSÃO: SOBRE A RIQUEZA CONCEITUAL ENSEJADA POR ESTA ABORDAGEM DIDÁTICA

Nesta abordagem, não apenas aparecem os conceitos de *espaço, tempo, velocidade, aceleração, aceleração centrípeta, massa, força newtoniana, força gravitacional, força decorrente de considerações de uma física inercial, a igualdade entre massa inercial e massa gravitacional, universalidade, unificação entre céu e terra, espaço absoluto, tempo absoluto e interações a distância*. Outros conceitos como aqueles que surgem na crítica à inferência indutiva também são articulados na discussão. Podemos inclusive adicionar pelo menos mais um importante conceito como o de corpos extensos esféricos terem a propriedade chamada de massa, como se esta estivesse concentrada em seu centro de massa; este ponto revela que o conceito newtoniano de massa, mesmo aquele na acepção de massa enquanto quantidade de matéria, por si só, já representa um gigantesco progresso com relação ao conceito cartesiano de corpo enquanto mera extensão. A trajetória de um corpo massivo extenso pode ser reduzida, com enorme vantagem, à trajetória de um ponto que nele concentra toda a sua massa, ou seja, trata-se de uma trajetória descrita pelo seu centro de massa.

A nossa abordagem ainda provê meios para ressaltar o seguinte: a física dos movimentos locais de Galileu tem uma constante característica que é a aceleração **g**; a astronomia de Kepler tem uma constante característica que é o **K** de Kepler. Ambas as constantes não são universais pois dependem do sistema particular que se examine: **g** será diferente a depender de qual corpo consideremos, se Terra, se Lua, se Júpiter, se Saturno, etc.; de maneira análoga os planetas que giram em torno do Sol terão um mesmo **K**, mas os satélites que giram em torno de um dado planeta terão o seu próprio **K** e assim por diante.

Por outro lado, o **G** de Newton é **universal** e esta característica é de fundamental importância a fim de que conectemos os vínculos entre a teoria da gravitação universal de Newton com as teorias particulares, respectivamente as teorias de Galileu e de Kepler.

Sem dúvida, trata-se de uma linearização de um processo histórico bem mais complexo, mas que em nenhum momento deixa de visar a **compreensão**, deixando a porta aberta para aprofundamentos segundo outros pontos de vista.

Concluimos que a abertura propiciada por uma abordagem do gênero bem como pela rica gama de significados que esta abordagem enseja constituem-se em elementos que nos fazem recomendar a adequação e a fertilidade de uma **reconstrução racional com viés epistemológico** para o ensino da unificação newtoniana. Ela se revela adequada e salutar ainda pela complementaridade que pode ser ensejada ao acolher várias outras abordagens, embora seja um acolhimento tenso, pois tensões são inevitáveis e portanto desafiadoras.

Aqui encerro o presente trabalho.

REFERÊNCIAS

BASTOS FILHO, J. B., 'A unificação de Newton da física de Galileu com a astronomia de Kepler à luz da crítica Popperiana à indução', *Rev. Bras. Ens. Fís.* vol. 17 n^o 3, setembro de 1995, p. 233-242. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol17a28.pdf>

BASTOS FILHO, J. B. 'A História da Ciência e a Filosofia da Ciência ajudam, atrapalham, ou são irrelevantes para o Ensino de Física?' *Norte Ciência*, v. 2, n. 2, p. 111-125, 2011. Disponível em: http://aparaciencias.org/vol-2.2/15_Jenner_p.111-125.pdf.

BASTOS FILHO, J. B. Qual História e qual Filosofia da Ciência são capazes de melhorar o Ensino de Física? In: **Temas de História e Filosofia da Ciência no Ensino**, Peduzzi, L. O. Q; Martins, A. F. P.; Hidalgo Ferreira, J. M. (Orgs.) , Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (EDUFRN), Natal, 2012, cap. 3, p. 65-83, disponível em <http://ppgect.ufsc.br/files/2012/11/Temas-de-Historia-e-Filosofia-da-Ciencia-no-Ensino1.pdf>

BASTOS FILHO, J. B. 'Reconstruções Racionais de Episódios da História da Ciência sob um viés epistemológico: Fundamentação'⁷ In: **Roberto, o Amigo: Roberto Moreira e a história e filosofia da ciência** Livro em homenagem ao Prof. Roberto Moreira Xavier de Araújo por ocasião de seus 80 anos, Org. Francisco Caruso, São Paulo: Livraria da Física, p. 75-115, 2017a

BASTOS FILHO, J. B. 'Reconstruções Racionais e Ensino de Física', trabalho apresentado por ocasião da realização da IV Escola Brasileira de Ensino de Física (IV EBEF⁸) realizada em Ilhéus de 25 a 29 de setembro de 2017 sob o patrocínio da Sociedade Brasileira de Física (SBF), 2017b

BORN, M. **Natural Philosophy of Cause and Chance**, Oxford at the Clarendon Press 1949

⁷ Trabalho apresentado no workshop coordenado pelo Prof. Francisco Caruso em homenagem aos 80 anos do Prof. Roberto Moreira Xavier de Araújo, Rio de Janeiro, UERJ, 14 de julho de 2017

⁸ Evento coordenado pelos Profs. Marco Antonio Moreira e Nelson Studart em colaboração com os colegas da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC).

BURTT, E. A., **As Bases Metafísicas da Ciência Moderna**, tradução de José Viegas Filho e Orlando Araújo Henriques, revisão de Paulo César de Moraes, Brasília: Editora da Universidade de Brasília UnB, 1991

COHEN, I. Bernard. 1987. **The Birth of a New Physics**. New York: Penguin Books

COPERNICO, N. **Commentariolos**, Pequeno Comentário de Nicolau Copérnico suas próprias Hipóteses acerca dos Movimentos Celestes, Introdução, tradução e notas de Roberto de Andrade Martins, São Pulo: Nova Stella; Rio de Janeiro: COPPE: MAST. 1990

COSTA DE LUCENA, M. P.; BASTOS FILHO, J. B. **Contribuição para a inserção da história da ciência e da filosofia da ciência no ensino de física no contexto da educação básica- parte-1**, Trabalho apresentado no IV Encontro Estadual de Ciências e Matemática de Ciências (IV EECM), Maceió, Alagoas, Brasil, 01 - 03 de fevereiro de 2017a. Trabalho publicado no GT3 08. Disponível em: <http://eventos.ufal.br/anais-do-iv-eccm/blog/anais-do-iv-eccm>

COSTA DE LUCENA, M. P.; BASTOS FILHO, J. B. **Contribuição para a inserção da história da ciência e da filosofia da ciência no ensino de física no contexto da educação básica- parte-2**, Trabalho apresentado no IV Encontro Estadual de Ciências e Matemática de Ciências (IV EECM), Maceió, Alagoas, Brasil, 01 - 03 de fevereiro de 2017b. Trabalho publicado no GT3 09. Disponível em: <http://eventos.ufal.br/anais-do-iv-eccm/blog/anais-do-iv-eccm>

EINSTEIN, A., Letters to Solovine (1906-1955), Citadel, Press Book, 1993

EULER, L. Carta a una princesa alemana sobre diversos tema de física y filosofía, In: **Reflexiones sobre el espacio, la fuerza y la materia**, Madrid: Alianza Editorial, 1885

KOYRÉ, Alexandre, **Études Galiléennes**, Paris: Hermann, 1966

NEWTON, I. **Mathematical Principles of Natural Philosophy**, In: The Great Books of the Western World, Vol. 34 Newton/Leibniz, Encyclopaedia Britannica Inc., Chicago, 22^a impressão, 1978

PEIRCE, C. S. Coleção 'Os Pensadores', fascículo Peirce/Frege, ver Estudos Coligidos, Conferências sobre o Pragmatismo, São Paulo: Nova Cultural, 1989

POPPER, K. R., **Conocimiento objetivo**, Madrid: Editorial Tecnos S. A., 1974a

POPPER, K. R., **A Lógica da Pesquisa Científica**, São Paulo: Editora Cultrix, 1974b

POPPER, K. R., **Conjecturas e Refutações**, Brasília: Editora da Universidade de Brasília, 2^a edição, 1982

RUSSELL, Bertrand. 1993. **Storia della Filosofia Occidentale**. Milano: Teadue, 3^a ed.