

ISAAC NEWTON E A GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Gilmar Praxedes Daniel

1. O CONTEXTO CIENTÍFICO-FILOSÓFICO ENCONTRADO PELO JOVEM NEWTON

Na primeira metade do século XVII, como resultado das lentas transformações científicas e culturais que ocorreram ao longo do século XVI, emergem os trabalhos seminais de Kepler (1571-1630), Galileu (1564-1642) e Descartes (1596-1650).

Na mecânica, Galileu havia dado uma nova vitalidade a antiga ciência do movimento, ao matematizar com sucesso a queda dos graves, além de tornar obsoleta a idéia de ímpeto ao aventar, ainda que de forma incompleta, a possibilidade do movimento inercial.

Na astronomia, os esforços de Kepler no sentido de construir uma dinâmica para o sistema heliocêntrico de Copérnico não foram bem sucedidos, mas o conduziram à obtenção de suas três leis do movimento planetário. Além disso, as observações telescópicas de Galileu descortinaram para os seus contemporâneos um universo inimaginável dentro dos quadros conceituais do aristotelismo escolástico, o que, sem dúvida, contribuiu para uma maior aceitação da teoria copernicana.

Esses progressos, no campo da mecânica e da astronomia, tornavam ainda mais evidente para a emergente comunidade dos filósofos naturais a necessidade de formulação de uma física capaz de responder adequadamente aos problemas suscitados pela teoria de Copérnico.

A hipótese de uma Terra planetária tornava sem sentido o cosmos aristotélico e a sua tradicional distinção entre o mundo sublunar e o mundo supralunar. A teoria de Copérnico, embora não explicitasse, sugeria a existência de um único mundo, sujeito a uma única física.

Descartes deu uma importante contribuição no sentido superar a dicotomia entre os dois mundos, construindo uma única física, de caráter qualitativo para os céus e a Terra. Esta física está intimamente vinculada a uma nova filosofia baseada no uso da razão e tem na matemática o seu principal instrumento para conhecer e dominar a natureza. A nova filosofia da natureza proposta por Descartes – o mecanicismo – procurava explicar os mecanismos causais da natureza, a partir das qualidades geométricas da matéria e do movimento.

O Universo cartesiano é indefinido em sua extensão, sendo totalmente preenchido pela matéria. O conceito de quantidade de movimento tem um papel central neste Universo regendo as colisões das diferentes partes da matéria, que se movimentam incessantemente.

Além do mecanicismo cartesiano, uma outra vertente da filosofia mecânica começa a ganhar expressão e a se articular as pesquisas dos filósofos naturais – o atomismo. Ao contrario de Descartes, os atomistas admitem a existência do vazio.

Na primeira metade do século XVII, o atomismo teve em Pierre Gassendi o seu principal divulgador. Contudo, influências atomistas podem ser encontradas nos trabalhos de Galileu e nos de seu discípulo Evangelista Torricelli, que desenvolveu o barômetro de Mercúrio (1608-1647). Ao lado do mecanicismo cartesiano, se bem que com um brilho menor, o atomismo exerceu uma considerável influência na filosofia natural do século XVII, aparecendo nos trabalhos de Robert Boyle (1627-1691) e em alguns trabalhos de Isaac Newton (1642-1727), que no início de sua trajetória é fortemente marcada pela filosofia cartesiana, e aos poucos vai se desvincilhando dessa concepção (DEBUS, 1996; KUHN, 1990).

Na segunda metade do século XVII, emerge uma nova geração de pensadores que encontra uma consistente base conceitual e metodológica para o prosseguimento dos trabalhos de investigação da natureza. Novas áreas da física começam a ganhar importância, mas o

problema de uma nova física para a teoria copernicana ainda não havia sido satisfatoriamente resolvido. Robert Hooke, Christian Huygens, Christopher Wren e Robert Boyle são alguns dos herdeiros da revolução científica. A esta geração pertence Isaac Newton cujos trabalhos serão de importância seminal tanto para o florescimento das novas áreas da física, quanto para o desfecho do processo de construção de única física para os céus e a Terra.

2. A INICIAÇÃO CIENTÍFICA E FILOSÓFICA DO JOVEM NEWTON

Em 1661, o jovem Newton iniciou os seus estudos no Trinity College da Universidade de Cambridge. Ainda estudante no College, Newton demonstra um grande interesse pelas questões científicas e filosóficas suscitadas pelos trabalhos dos pensadores ligados à emergente filosofia natural, ou filosofia experimental. Por conta própria, à margem do currículo oficial, então fortemente marcado pelas concepções escolásticas, entra em contato com o pensamento de Descartes, tendo estudado atentamente algumas de suas obras. Teve também acesso ao atomismo de Gassendi. Leu o Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo, de Galileu, e ainda, Robert Boyle, Thomas Hobbes, Kenelm Digby, Joseph Glanville, Henry More e muitos outros, ilustres representantes da filosofia mecânica (WESTFALL, 1995).

Estimulado pelas questões levantadas por esses pensadores o jovem Newton empreende um ambicioso programa de estudos que em poucos anos o põe na vanguarda das pesquisas científicas de seu tempo, nos campos da matemática, da mecânica, da óptica e da astronomia.

Na mecânica, ao estudar os Princípios da Filosofia de Descartes e os Diálogos de Galileu, Newton se depara com uma nova e radical concepção de movimento - o movimento inercial. Em Descartes, encontraria também dois problemas formulados e imperfeitamente respondidos: a mecânica do impacto, e mecânica do movimento circular. Esses dois problemas se tornariam o foco de sua investigação (WESTFALL, 1995, p. 46).

No âmbito da astronomia, Newton é introduzido à astronomia kepleriana através da obra *Astronomia Carolina*, de Thomas Street. Iniciam-se então as suas primeiras investigações relativas ao movimento celeste. Nessas primeiras incursões, ainda fortemente marcadas pela idéia dos vórtices cartesianos, articula as suas primeiras idéias sobre a dinâmica do movimento circular à investigação do movimento planetário e do movimento lunar (WESTFALL, 1995, p. 29; COHEN, 1983).

Em relação à astronomia kepleriana, é importante assinalar que na década de 1660 as leis de Kepler ainda não eram plenamente aceitas pela comunidade científica. Em verdade, apenas a terceira lei de Kepler possuía um bom grau de aceitação. A lei das órbitas elípticas, por exemplo, era enunciada corretamente nos livros de astronomia em 1670, mas nem sempre eram usadas em problemas práticos. A lei das áreas era, em larga medida, ignorada e substituída por esquemas geométricos alternativos como o equante, originalmente proposto por Kepler (COHEN, 1983, p. 248).

Contudo, apesar das dificuldades técnicas inerentes às leis de Kepler, que dificultavam tanto a sua aceitação quanto o seu efetivo uso prático, é inegável que elas estimulavam a busca de uma dinâmica para o movimento planetário, ao sugerirem o Sol como um centro de força que, de alguma forma, obrigava os planetas a executarem as suas órbitas. Nesta direção, o matemático Alfonso Borelli (1608-1679) defendia a existência de um equilíbrio de forças entre a força que, supostamente, emanava do Sol e a tendência centrífuga dos planetas (BUTTERFIELD, 1992, p.135).

3. AS PRIMEIRAS IDEIAS DE NEWTON SOBRE O MOVIMENTO ORBITAL E A TERCEIRA LEI DE KEPLER

A idéia de que os planetas, em seu movimento orbital, possuíam uma tendência a se afastar do centro de força - o *conatus* - havia sido apresentada por Descartes no “Princípios da Filosofia”. Huygens adota esta idéia e a utiliza em seus estudos do movimento circular, cunhando a expressão “força centrífuga”, para a qual obtém uma expressão matemática (COHEN, 1983; DESCARTES, 2007).

Quando Newton inicia os seus estudos sobre o movimento a sua compreensão da dinâmica do movimento circular era fortemente ligada à idéia de *conatus*, ou tendência a ser afastar do centro, compartilhada por Huygens e outros de seus contemporâneos. Assim, trabalhando de forma independente de Huygens, Newton obtém, por volta de 1665, uma expressão para esta “tendência a afastar-se do centro”, tendência, ou “força” centrífuga. Uma medida dessa força seria fornecida pela fórmula: $f \propto \frac{v^2}{r}$, onde o segundo termo $\frac{v^2}{r}$ refere-se à aceleração centrífuga.

Usando esta expressão, combinada com a lei dos períodos de Kepler (T^2/R^3 é constante para as diferentes órbitas planetárias) Newton faz as suas primeiras incursões no estudo do movimento planetário, demonstrando que para órbitas circulares, a tendência centrífuga era dada por: $f \propto \frac{v^2}{r}$. Dessa forma, se as órbitas fossem circulares a “tendência” dos planetas em se afastar do Sol, assim com a “tendência” da Lua em se afastar da Terra, seriam inversamente proporcional ao quadrado da distancia entre esses corpos.

Anos mais tarde, já em idade avançada e envolvido em disputas com Robert Hooke acerca da prioridade da lei de força $f \propto \frac{1}{r^2}$, Newton escreveria vários documentos em que afirma que nesses anos de juventude (na segunda metade da década de 1660), teria começado a pensar que gravidade terrestre deveria se estender até a órbita da Lua. Em documento desse tipo, produzido por volta de 1718, Newton escreve:

(...)& no mesmo ano, [1666] comecei a pensar na gravidade como se estendendo até a órbita da Lua & (depois de descobrir como calcular a força com que [um] globo girando dentro de uma esfera pressiona a superfície da esfera), a partir da regra de Kepler de que os períodos dos planetas estão numa proporção sesquiáltera com suas distâncias do centro de suas órbitas, deduzi que as forças que mantêm os planetas em suas órbitas devem [variar], reciprocamente, como o quadrado de sua distância do centro em torno do qual eles giram: & a partir disso, comparei a força necessária para manter a Lua em sua órbita com a força da gravidade na superfície da Terra, & descobri que elas se correspondem bem de perto (...) (NEWTON, *apud* WESTFALL, 1995, p. 39).

Documentos como esses, juntamente com o relato de pessoas próximas a Newton que o ouviram declarar que, começou a pensar que gravidade se estendia à órbita da Lua ao vir a queda de uma maçã, alimentaram a versão de que ele teria formulado, quase que por completo, a gravitação universal nesses anos, publicando-a apenas em 1687.

Analisando documentos como esses e confrontando-os com vários dos escritos produzidos por Newton, em sua juventude, o historiador Bernard Cohen, assinala que neste período:

(...) Newton ainda considerava o movimento dos planetas em órbita ou o de seus satélites (e nossa Lua) em termos de um conceito derivado de seus estudos de Descartes, um '*conatus recedendi* a centro', ou uma 'tendência a afastar-se do centro' (COHEN, 1983, p. 253).

É importante observar que, à época, Newton ainda não compreendia o movimento orbital como uma composição de um movimento acelerado para um corpo central e um movimento inercial tangencial à órbita. Newton só assimilaria esta compreensão, cerca de quinze anos mais tarde, quando trocava uma série de cartas com Robert Hooke. A idéia de uma força central a desviar continuamente o planeta de um movimento retilíneo, mantendo-o em sua órbita, sequer passava por sua mente. Em relação ao movimento curvilíneo, Newton acreditava na existência de uma força ou tendência centrífuga distinta da idéia de uma força centrípeta (COHEN, 1983, p.263).

Além disso, neste período, Newton era um filósofo mecanicista fortemente ligado à idéia cartesiana de vórtices ou turbilhões de matéria. Eram os vórtices de matéria que na física cartesiana explicavam a gravidade e o movimento planetário (DESCARTES, 2007; COHEN, 1983; WESTFALL, 1995; MARTINS, 1998).

Dessa forma, a versão dada à história da maçã é falsa e Newton não formulou a gravitação universal neste período, conhecido como *anni mirabili*. Nesses anos, não há dúvidas de que Newton fez importantes descobertas na matemática e na física, contudo não chegou à gravitação universal - as suas concepções teóricas não lhe permitiriam isso.

O historiador Robert Westfall, outro grande especialista em Newton, também é bastante crítico em relação às versões correntes sobre a da história da maçã, opondo-se também à idéia de que a gravitação universal foi concebida, basicamente, durante os *anii mirabili*. Em sua avaliação, a valorização excessiva desses anos, juntamente com a história da maçã, além de mitificar a genialidade de Newton, simplifica e empobrece o seu grande esforço intelectual, e o significado histórico, filosófico e científico de sua grande realização.

Lagrange não chamou Newton de o homem mais afortunado da história por ele ter tido um lampejo de discernimento. A gravitação universal não se curvou diante dele ao primeiro esforço. Newton hesitou, tropeçou, momentaneamente aturdido por complexidades esmagadoras, que já eram imensas na simples mecânica e que foram várias vezes multiplicadas pelo contexto global (WESTFALL, 1995, p.51).

5. A TROCA DE CARTAS COM HOOKE: UMA NOVA COMPREENSÃO PARA A DINÂMICA DO MOVIMENTO CURVILÍNEO E A DESCOBERTA DE UM NOVO SIGNIFICADO PARA A LEI DAS ÁREAS

O interesse de Newton pela astronomia e pela dinâmica do movimento celeste ganharia um importante estímulo intelectual e começaria a tomar um novo rumo, entre novembro de 1679 e dezembro de 1680. Neste período Robert Hooke (1635-1703) e Newton trocariam uma série de cartas, em que Hooke expunha algumas de suas idéias sobre o movimento planetário e a lei de força que poderia ser associada a este movimento. Este curto período de correspondência entre os dois será de grande importância para a evolução do pensamento newtoniano. É a partir desta interação que se deflagra no espírito de Newton um radical processo de revisão de suas concepções sobre a dinâmica do movimento celeste (COHEN, 1988; COHEN, 1983; WESTFALL, 1995).

Em 24 de novembro de 1679, logo após ser nomeado secretário da Royal Society, Hooke envia uma carta a Newton na qual, após convidar-lhe a retomar o intercâmbio científico com a Sociedade, lhe pede comentários acerca de uma hipótese e uma opinião sua “consistente em compor os movimentos celestes dos planetas [a base] de um movimento direto pela tangente & um movimento atrativo para um corpo central” (Hooke, *apud*, COHEN, 1983, p. 265).

Em linguagem atual o que Hooke propunha era a interpretação do movimento orbital como resultante da composição de dois movimentos: um inercial ao longo da tangente à curva e o outro sob a ação de uma força voltada para o seu centro. Esta interpretação era, então, muito original; pela primeira vez o movimento orbital tinha os seus elementos dinâmicos definidos corretamente (PEDUZZI, 2008; p.264; WESTFALL, 1995, p. 147).

Em sua resposta Newton se absteve de discutir a hipótese de Hooke. Em vez disso, apresentou uma discussão sobre os efeitos da rotação diurna da Terra sobre a trajetória de um corpo em queda livre. Propôs que o corpo cairia segundo uma espiral (Fig.1) que, hipoteticamente, se estenderia até o centro da Terra (COHEN, 1983, p. 265; WESTFALL, 1995, p. 149).

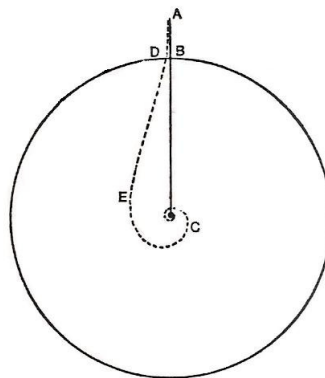


Figura 1 - Esquema de Newton para um corpo em queda na Terra em rotação (WESTFALL, 1995, p.149).

A espiral foi um erro. Hooke corrigiu a Newton mostrando-lhe que, contrariamente à sua concepção, a trajetória não poderia ser um tipo de espiral, sendo antes, semelhante a uma elipse.

Em 13 de dezembro de 1679, Newton escreveu a Hooke reconhecendo que o corpo não cairia no centro, mas que giraria em torno deste em um alternado movimento de ascensão e queda (Fig 2).

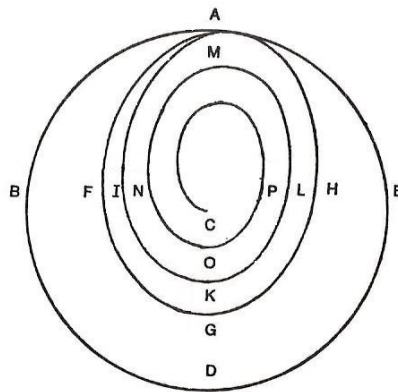


Figura 2 - AFGH é a trajetória elíptica de um corpo que não encontra resistência. A espiral interna, AIKLMNOPC, representa sua trajetória num meio que oferece resistência (WESTFALL, 1995, p. 150).

Com a sua “teoria” dos movimentos circulares, compostos de um movimento direto e um movimento de atração para um centro”, Hooke tratou o problema da queda livre em uma Terra móvel como o problema do movimento orbital, uma abordagem inusitada na época e que causou uma forte impressão em Newton (WESTFALL, 1995, p. 150).

Em outra carta, Hooke escreveu a Newton acerca de uma hipótese sua, de que a força de atração que mantém os planetas em órbita deveria variar com o quadrado do inverso da distância (COHEN, 1983, p. 265). Newton novamente se abstém de qualquer comentário.

Em 15 de janeiro de 1679/1680, Hooke escreve novamente reiterando a sua suposição concernente à existência de uma força atrativa, e argumentava que Newton conseguiria obter a forma da curva e sugerir uma razão física para a sua proporção:

Resta agora averiguar as propriedades de uma linha curva (nem circular nem concêntrica) realizada por uma potência atraente central que faça que as velocidades de descida desde a linha tangente ou igual movimento retilíneo, a todas as distâncias, estejam em uma proporção duplicada das distâncias recíprocas tomadas [i.e., inversamente como o quadrado das distâncias]. Não me cabe a menor dúvida de que com vosso excelente método podeis achar facilmente qual há de ser tal curva, assim como suas propriedades, sugerindo ademais uma razão física desta proporção (Newton apud COHEN, 1983, p. 266).

Mais uma vez Newton se esquivava de debater esses problemas com Hooke, mas se dedica a explorar matematicamente as suas hipóteses. Após sucessivas evasivas a correspondência com Hooke se encerra em fins de 1680.

A análise de Hooke do movimento curvilíneo foi a senha que Newton precisava para avançar rapidamente em seus estudos sobre o movimento celeste. Ao contrário de Hooke, Newton era um notável matemático e segundo o próprio Hooke, conseguiria chegar “facilmente” a uma causa física para o movimento celeste. Bem, sabe-se que o caminho não foi tão fácil assim. Antes de chegar a uma causa física para o movimento planetário, fazia-se necessário resolver intrincados problemas matemáticos inerentes à articulação da sugestão de Hooke às leis de Kepler.

A correspondência com Hooke em 1679/1680 foi extremamente profícua para a evolução das idéias newtonianas sobre o movimento celeste. A partir da interação com Hooke emergem das investigações de Newton três contribuições que, segundo Cohen, seriam fundamentais para a formulação da lei da gravitação universal: a transformação da força centrífuga em força centrípeta, a descoberta do caráter dinâmico da lei das áreas e a idéia de

uma força atrativa. Esses três avanços têm como ponto de partida a sugestão de Hooke de imaginar o movimento planetário como resultante de um movimento tangencial de caráter inercial e um movimento acelerado voltado para o centro, ou seja, sob a ação de uma força central (COHEN, 1983, p.272-275).

Norteador por essa sugestão de Hooke, Newton retoma os seus estudos sobre a dinâmica do movimento planetário. Nesta nova incursão abandona o enfoque, até então corrente entre os seus contemporâneos, de associar a um corpo em movimento curvilíneo a idéia cartesiana de “tendência a afastar-se do centro”, ou força centrífuga, como a designara Huygens. A antiga expressão da “força centrífuga” - $f \propto v^2/r$ - é articulada por Newton a um novo conceito - a força centrípeta.

O segundo avanço relacionado a esta mudança de enfoque no tratamento do movimento curvilíneo foi a descoberta do caráter dinâmico das leis das áreas. Convém salientar que à época de Newton muitos manuais e tratados astronômicos apresentavam a astronomia kepleriana sem a lei das áreas, utilizando em seu lugar um ou outro artifício geométrico. Ademais, antes da correspondência com Hooke a lei das áreas não estava entre os princípios astronômicos de Newton e não desempenhou em suas incursões na astronomia nenhum papel ativo, ao contrário do que ocorreu com a 3ª lei de Kepler, usada por ele auxiliou na obtenção da lei do inverso do quadrado para órbitas circulares (COHEN, 1983, p. 273).

A descoberta do caráter dinâmico da lei das áreas, ao que parece, foi o primeiro sucesso à luz do novo enfoque sugerido por Hooke. Este resultado é apresentado por Newton na proposição I, do livro I do *Principia*:

As áreas que os corpos que giram descrevem por meio de raios traçados até um centro de força imóvel situam-se nos mesmos planos imóveis, e são proporcionais aos tempos nos quais são descritas (NEWTON, 2002a, p. 83).

A demonstração que se segue a esta proposição é feita em três passos. No primeiro Newton mostra que, para um corpo em movimento inercial ligando-se as suas sucessivas posições, em intervalos de tempos iguais, a um ponto externo à sua trajetória, o segmento de reta que conecta o corpo ao ponto externo varre áreas iguais em intervalos de tempos iguais (COHEN, 1983, p. 196).

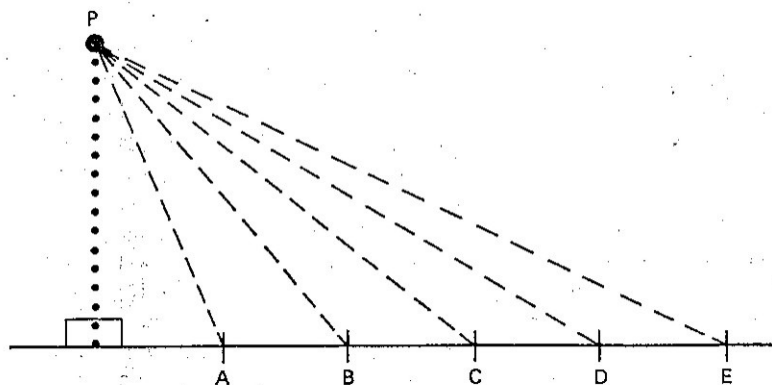


Figura 3 - Um corpo em movimento inercial satisfaz a lei das áreas em relação a um ponto p externo a sua trajetória (COHEN, 1983, p. 196).

Com essa demonstração simples, Newton estabeleceu pela primeira vez a íntima conexão entre a lei da inércia e a lei das áreas.

No segundo passo supõe que em intervalos de tempos regulares o corpo sofre a ação de uma força impulsiva, sempre direcionada para o ponto S. Em decorrência desses sucessivos impactos a trajetória retilínea se converte em uma linha poligonal, onde entre cada golpe da força tem-se um movimento inercial. Novamente se verifica que os triângulos formados pelos sucessivos segmentos que compõe a poligonal e os segmentos que ligam o corpo ao ponto S possuem áreas iguais, o que equivale a dizer que o segmento que conecta o ponto S às sucessivas posições no qual o corpo é desviado pela força f descreve áreas iguais em intervalos de tempos iguais (NEWTON, 2002, p. 84).

No terceiro passo, Newton lança mão de sua idéia de limite ao argumentar que, à medida que o intervalo tempo entre os sucessivos golpes torna-se indefinidamente pequeno, ou à medida que o número de triângulos torna-se indefinidamente grande, a linha poligonal tende a uma curva.

Portanto, a força centrípeta, pela qual o corpo é continuamente retirado da tangente dessa curva, atuará continuamente; e quaisquer áreas descritas SADS, SAFS, que são sempre proporcionais aos tempos em que são descritas, serão, também neste caso, proporcionais àqueles tempos. Q.E.D (NEWTON, 2002, p. 84).

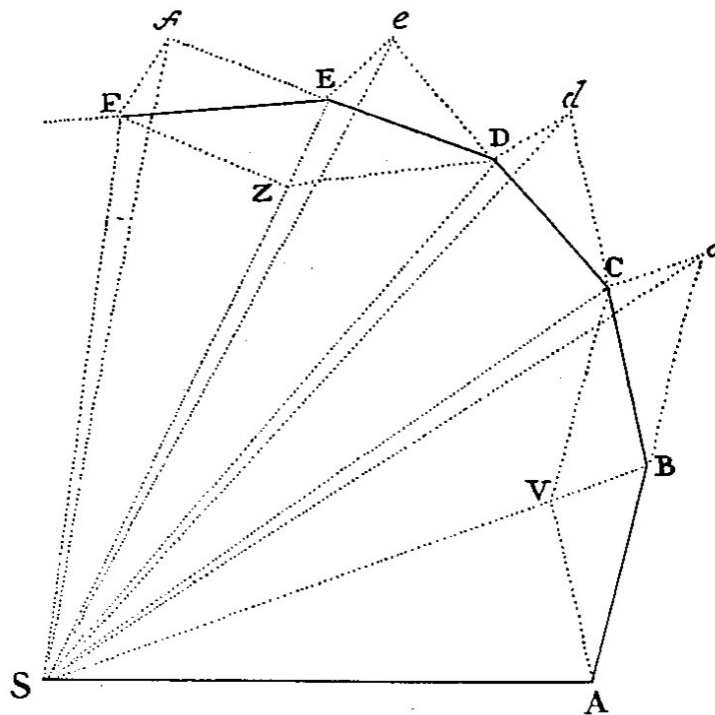


Figura 4 – Esquema demonstrativo de que um corpo sujeito a uma força centrípeta instantânea atuando em intervalos de tempos regulares satisfaz a lei das áreas em um ponto S (NEWTON, 2002a, p. 86).

Assim, Newton demonstrou que se um corpo em movimento inercial passa a sofrer a ação contínua de uma força centrípeta o movimento inercial se transformará no movimento ao longo de uma curva e obedecerá à lei das áreas.

Na proposição II do Principia Newton demonstrou que se um corpo em movimento curvilíneo obedece à lei das áreas isto implica em um movimento com um componente inercial alterada continuamente pela ação de uma força central. Dessa forma, com as proposições I e II, Newton estabelece a lei das áreas como condição necessária e suficiente para a existência de uma força centrípeta.

Assim, ao longo de outras proposições Newton explora as conseqüências dessas duas descobertas demonstrando que: para um corpo movimentando-se em trajetória elíptica a força varia com o inverso do quadrado da distância ao foco (Proposição XI) e para órbitas parabólicas ou hiperbólicas, a força centrípeta também varia na razão inversa do quadrado da distância a um dos focos (Proposição XII e XIII). Na proposição XVII, Newton demonstra que se um corpo se movimenta sob a ação de uma força central inversamente proporcional ao quadrado da distância, então a sua trajetória será uma cônica: uma elipse, uma parábola ou uma hipérbole (NEWTON, 2002, p. 101-102 e 110-112).

O terceiro fator apontado por Cohen (1983, p.275) como fundamental para o desenvolvimento da gravitação universal foi a idéia de uma força atrativa: “o desejo de Newton de considerar a ação de forças atrativas que podem produzir órbitas elípticas a milhões de milhas de distância”.

Em relação as forças atrativas, o historiador Richard Westfall chama a atenção para o fato que nos anos de 1679-1680, Newton empreendeu uma profunda reorientação de sua filosofia da natureza, indo além da filosofia mecânica cartesiana que procurava explicar todos os fenômenos em termos de partículas materiais em movimento. E ao que parece, a nova filosofia de Newton sugeria acrescentar as forças de atração e repulsão à ontologia tradicional da filosofia mecânica (ABRANTES, 1998, p.83; WESTFALL, 1995, p. 153).

Para Cohen (1983, p. 276) não há dúvidas de que “Newton chegou a considerar as forças centrípetas como se fossem entidades por direito próprio”, fixando a sua atenção na ação dessas forças para produzir aceleração. Isto exigia o abandono do conceito de “*conatus*”, ou “tendência” de um corpo e sua substituição pelo conceito de força externa, passando a admitir a possibilidade dos corpos exercerem forças sobre outros corpos a grandes distâncias.

Certamente foi um novo modo de abordar o problema das forças o que conferiu a Newton o poder de moldar a reconstrução da dinâmica e da formulação do sistema do mundo baseado na dinâmica celeste, permitindo também desenvolver o conceito de gravitação universal e examinar suas conseqüências, descobrindo a lei gravitacional (COHEN, 1983, p.276).

Todavia, segundo a interpretação de Cohen, “a chave do pensamento criador de Newton em mecânica celeste”, não consistiu em considerar as forças como propriedades reais dos corpos ou da matéria macroscópica, mas na capacidade de examinar as condições e propriedades de tais forças como se fossem reais. A forma engenhosa como Newton articula a sua sofisticada matemática à análise dos problemas da física do movimento é denominada por Cohen como estilo newtoniano. Este estilo permitiu a Newton abster-se, ao menos temporariamente, dos problemas inerentes ao conflito entre o conceito de força centrípeta ou atrativa e a filosofia mecânica tradicional, na qual as interações à distância eram inconcebíveis.

6. DA FORÇA CENTRÍPETA À GRAVITAÇÃO UNIVERSAL

Os avanços obtidos com a transformação da força centrífuga em força centrípeta, a descoberta do caráter dinâmico da lei das áreas e a idéia de uma força atrativa, sem dúvida, foram de grande importância para a formulação de uma nova mecânica celeste. Contudo, a idéia de uma força atrativa, para se ajustar à complexidade do mundo físico real precisaria de novas transformações. A força centrípeta que emerge da interação com Hooke ainda não é a força de gravitação universal.

Em agosto de 1684, Newton recebe a visita do astrônomo Edmond Halley (1656 - 1742) que lhe formula a seguinte questão: que trajetória seria seguida pelos planetas se eles fossem continuamente atraídos para o Sol por uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância do planeta ao Sol. Em essência tratava-se da mesma questão apresentada por Hooke a Newton no inverno de 1679-1680 (WESTFALL, 1995, p. 158).

Essa questão já havia sido discutida anteriormente, por uma reunião da Royal Society, em janeiro de 1684, Halley, Hooke e Christopher Wren (1632-1723) haviam discutido sobre a lei de força que poderia estar associada ao movimento planetário. Hooke e Halley, trabalhando de forma independente, usaram a regra da força centrífuga de Huygens e a terceira lei Kepler para concluir que a força centrífuga (centrípeta, segundo a interpretação Hooke) que atua sobre um planeta varia com o inverso do quadrado da distância do Planeta ao Sol, supondo-se que as órbitas são circulares. Ao que parece, Wren também havia chegado à lei do inverso do quadrado. Contudo nenhum desses três cientistas logrou demonstrar que uma força inversamente proporcional ao quadrado da distância determina órbitas elípticas e vice-versa (COHEN, 1988, p. 188).

Um relato quase contemporâneo da visita de Halley feito por Abraham DeMoivre, a partir de um depoimento de Newton, revela que Newton imediatamente respondeu que seria uma elipse. Halley então perguntou como é que ele sabia, e Newton respondeu: “ora, (...) eu a calculei”. Halley pediu o cálculo, mas Newton não o encontrou, prometendo refazer-lo e enviá-lo ao astrônomo, em Londres (DeMoivre, apud, WESTFALL, 1995, p. 159).

Newton não apenas refez a demonstração como reexaminou os seus trabalhos, colocando-os em ordem. Em novembro de 1684, enviou a Halley um pequeno tratado intitulado *De motu corporum in gyrum* (Do movimento dos corpos em órbita). Nesse texto, Newton expôs as suas recentes descobertas advindas da combinação do método de Hooke e das leis de Kepler ao estudo do movimento planetário. Em especial, Newton demonstrou que se um corpo em movimento elíptico satisfaz a lei das áreas, isto implica que ele está sujeito a ação de uma força centrípeta inversamente proporcional ao quadrado da distância do corpo ao ponto em relação ao qual as áreas iguais são calculadas (COHEN, 1988, p. 293).

Ao examinar o *De motu*, Halley logo percebeu que ele incorporava um importante avanço na mecânica celeste. Em função disso, procurou incentivar Newton a expor as suas descobertas uma obra de maior amplitude. Assim, Newton voltou a dedicar-se ao estudo da mecânica e da dinâmica do movimento planetário, passando a examinar e desenvolver com maior rigor e profundidade as suas idéias (WESTFALL, 1995, p. 160).

O *De motu* incorpora alguns importantes avanços no campo da mecânica celeste, o que logo foi reconhecido por Halley. Nele Newton introduz no vocabulário da mecânica o termo força centrípeta: “Chamo de força centrípeta àquilo que faz com que um corpo seja impelido ou atraído por um ponto considerado como centro” (WESTFALL, 1995, p. 164). Além disso, Newton faz uso de suas duas primeiras leis do movimento. A primeira lei aparece de forma explícita (ainda que sob um enunciado obscuro para o leitor moderno), enquanto que a segunda lei pode ser evidenciada na demonstração da relação da lei das áreas com uma força central. Contudo, este pequeno tratado apresenta uma grande lacuna conceitual, quando se pensa em um sistema de mundo regido por uma força de gravitação universal - a ausência da terceira lei do movimento.

Em dezembro de 1684, Newton conclui uma revisão do *De motu* na qual já sinaliza a necessidade de compreensão da dinâmica do movimento planetário em termos de um sistema interativo de muitos corpos. Neste novo contexto interpretativo Newton percebe que os planetas não se movimentam exatamente em órbitas elípticas nem descreve duas vezes a mesma órbita. A interação mútua entre os corpos celestes torna o sistema planetário extremamente complexo, o que leva Newton a declarar:

Há tantas órbitas para um planeta quantas as suas revoluções, tal como no movimento da Lua, e a órbita de qualquer planeta depende do movimento combinado de todos os planetas, para não mencionar a acção de todos estes uns sobre os outros. (...) Considerar simultaneamente todas estas causas do movimento e definir estes movimentos por leis exactas convenientes ao cálculo excede, a menos que eu esteja enganado, a capacidade de todo o intelecto humano (NEWTON, *apud* COHEN, 1988, p.295- 296).

Como consequência das interações gravitacionais mútuas tem-se que, no mundo físico as três leis de Kepler do movimento planetário não são estritamente verdadeiras. Essas leis são válidas tão somente em uma construção matemática idealizada na qual os pontos de massa, que não interagem entre si, descrevem órbitas em torno de um centro matemático de força, ou de um corpo atrativo central fixo (COHEN, 1983, p. 289).

A distinção que Newton traça entre o reino da matemática, na qual as leis de Kepler são verdadeiras, e o reino da física, no qual elas são apenas ‘hipóteses’ ou aproximações, é um dos aspectos revolucionários da dinâmica celeste newtoniana (COHEN, 1988, p.296).

Assim, no processo de revisão do *De motu*, Newton começa a amadurecer a idéia de uma ação mútua entre os corpos celestes. A percepção e o enfrentamento do problema das atrações mútuas entre os corpos celestes conduziu Newton a articular à dinâmica do movimento planetário à sua terceira lei do movimento.

Na primavera de 1685, alguns meses após a revisão do *De motu* Newton conclui um primeiro rascunho dos *Principia*. Neste tratado desenvolve as suas idéias sobre a lei de ação e reação, e utiliza esta lei no estudo dos movimentos celestes.

Na seção XI do livro I dos *Principia*, Newton desenvolve uma nova dinâmica para os corpos que se movimentam sob a ação de forças centrípetas. Neste novo enfoque articula a terceira lei do movimento, ao considerar o problema das interações mútuas. Logo na introdução ele assinala a limitação dos enfoques que não levam em conta essas interações:

Até agora tenho tratado das atrações de corpos na direção de um centro imóvel, embora seja muito provável que tal coisa não exista na natureza. Porque, pela Lei III, atrações são exercidas na direção dos corpos, e as ações dos corpos atraídos são sempre recíprocas e iguais, de forma que se há dois corpos, nem o corpo atraído nem o atrativo estão realmente em repouso, mas ambos (pelo Corolário IV das Leis do Movimento), considerando-se que sejam mutuamente atraídos, giram em torno de um centro comum de gravidade (NEWTON, 2002, p. 224).

No âmbito do movimento planetário, a importância da terceira lei do movimento, na análise das ações das forças centrípetas sobre os corpos atraídos, pode ser evidenciada nesta passagem de O Sistema do Mundo, um texto que na primeira edição dos *Principia* aparecia como o volume II e depois foi substituído pelo livro III.

Uma vez que a ação da força centrípeta sobre os corpos atraídos é, a distâncias iguais, proporcional às quantidades de matéria nesses corpos, a razão requer que ela também seja proporcional à quantidade de matéria no corpo atraente. Pois toda ação é mútua e (pela terceira Lei do Movimento) faz com que os corpos aproximem-se um do outro e, portanto, deve ser a mesma em ambos os corpos (NEWTON, 2008, p. 354). A atração reside, de fato, em cada corpo na direção do outro, sendo, portanto, do mesmo tipo em ambos (NEWTON, 2008, p. 354).

No livro III dos *Principia*, os fenômenos abordados em O Sistema do Mundo são tratados matematicamente. É especialmente, instrutivo observar nas proposições de I a III como Newton explica o movimento orbital dos planetas e satélites usando tão somente o conceito de força centrípeta e a variação dessa força com o inverso do quadrado da distância ao centro de atração.

A partir da proposição IV do livro III, a força centrípeta começa a se revelar de forma explícita para a comunidade científica com uma força de gravitação de caráter universal. Nesta proposição, Newton, através de uma experiência de pensamento (“o teste da Lua”), estende a gravidade terrestre até a órbita da Lua. Esta “experiência” o leva a concluir que a aceleração de queda da Lua em direção à Terra, tem o mesmo valor que a aceleração de um objeto terrestre colocado na órbita da Lua. Assim, Newton postula que a força centrípeta sobre a Lua é a força de gravidade terrestre.

Na proposição V, Newton postula que os planetas se movimentam em torno do sol devido a uma gravidade solar, e que da mesma forma os satélites se movimentam em torno dos planetas devido a uma gravidade que aponta para estes planetas. A questão das interações gravitacionais mútuas e o papel da terceira lei do movimento podem ser evidenciados na proposição V – corolários I e III. E no Escólio a esta proposição, Newton assume sem reservas o papel da força gravitacional na dinâmica dos corpos celestes:

A força que mantém os corpos celestes em suas órbitas tem sido chamada até aqui de força centrípeta, mas tendo ficado evidente que ela não pode ser outra que não uma força gravitacional, vamos chamá-la daqui por diante de gravidade. Pois a causa desta força centrípeta que mantém a lua em sua órbita estende-se a todos os planetas (...) (NEWTON, 2008, p. 200).

E finalmente, coroando todo o processo de sucessivas transformações da idéia de força centrípeta atrativa, emergiu um principio de gravitação universal, segundo o qual, quaisquer dois corpos, em qualquer parte do universo, agem gravitacionalmente um sobre o outro. Esta força varia na razão inversa do quadrado da distância entre esses corpos e é proporcional às suas massas gravitacionais.

REFERENCIAS

- ABRANTES, Paulo César Coelho. **Imagens de natureza, imagens de ciência.** Campinas, SP: Papyrus, 1998 (Coleção Papyrus ciência).
- BUTTERFIELD, Herbert. **As origens da ciência moderna.** Lisboa; Rio de Janeiro: Ed. 70, 1992 (Coleção perfil. História das idéias e do pensamento).
- COHEN, I. B. **La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas.** Madrid. Alianza Editorial, 1983.
- COHEN, I. B. **O nascimento de uma nova física.** Lisboa: Gradiva, 1988.
- DESCARTES, René. **Princípios da Filosofia.** 2. ed. São Paulo: Rideel, 2007. (Biblioteca Clássica).
- DIAS, Penha Maria Cardoso. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.28, n.2, p.205-234, setembro, 2006.
- DEBUS, Allen. G. **El hombre y la naturaleza en el Renacimiento.** 2ª. ed. México: Fondo de Cultura Económica, 1996.
- KUHN, Thomas S. **A revolução copernicana: a astronomia planetária no desenvolvimento do pensamento ocidental.** Lisboa: Ed. 70, 1990. 331 p.

MARTINS, Roberto de Andrade. Descartes e a impossibilidade de ação à distância. In. FUKS, Saul (ed.). **Descartes 400 anos de um legado científico e filosófico**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 1998. p.79-126.

NEWTON, Isaac. **Principia: princípios matemáticos da filosofia natural – Livro I**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

NEWTON, Isaac. **Principia: princípios matemáticos da filosofia natural - Livros II e III**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008.

PEDUZZI, Luiz O.Q. Da física e da cosmologia de Descartes à gravitação newtoniana. Florianópolis. UFSC. Departamento de Física (publicação interna).

WESTFALL, Richard S. **A vida de Isaac Newton**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.