

## **Uma nova ciência.**

Uma apresentação da ciência newtoniana.

Guarulhos – 2014.

**ESCOLA DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO PAULO**

**Uma nova ciência.**

Uma apresentação da ciência newtoniana.

Mohamad Nagashima de Oliveira.

Guarulhos – 2014.

Nagashima, Mohamad.

Uma nova ciência: Uma apresentação da ciência newtoniana. /  
Mohamad Nagashima. – Guarulhos, 2014.  
111 f.

Dissertação de mestrado – Universidade Federal de São Paulo, Escola  
de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em  
Filosofia, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Claudemir Roque Tossato.

Título em inglês: One new Science. – A show of newtonian's  
science.

1. Newton. 2. Ciência Moderna. 3. Mecânica. 4. Óptica. I.  
Tossato, Claudemir. II. Título.

# **MOHAMAD NAGASHIMA DE OLIVEIRA**

## **Uma nova ciência.**

Uma apresentação da ciência newtoniana.

Dissertação apresentada à Escola de Filosofia,  
Letras e Ciências Humanas da Universidade  
Federal de São Paulo, como parte das  
exigências do Programa de Pós-Graduação em  
Filosofia para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Claudemir Roque Tossato

Professor Orientador.

Guarulhos – 2014.

Dedico este trabalho aos meus três bons e velhos amigos, que tanto me ajudaram com este trabalho, de uma forma ou de outra.

## **Agradecimentos.**

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Claudemir, por ter me suportado por mais dois anos de pesquisa e por todo o seu trabalho junto a mim. Espero sinceramente que possamos continuar ainda por muitos anos com o nosso interesse sobre Filosofia e História da Ciência. Gostaria também de agradecer aos professores Plínio Smith e Eduardo Kickhofel, que me deram orientação crucial no meu exame de qualificação e que me ajudou a definir os rumos da minha dissertação. Muito além disso, gostaria também de agradecer a amizade e fraternidade destes três professores.

Agradeço também ao colega de pós-graduação, hoje doutor, Francisco Rômulo Monte Ferreira, pelas inúmeras orientações sobre Newton, física e Cálculo passadas nos nossos curtos encontros. Pela mesma razão, agradeço ao amigo Leandro Cardoso Bellato, Thiago do Vale e Djalma Oliveira Junior pelas orientações em assuntos matemáticos, físicos e dissertativos, eles certamente fizeram desse trabalho algo muito melhor. Agradeço também a Jacson Melo Neto por me promover muito mais lazer do que eu merecia e que colaborou imensamente para o desenvolvimento das partes finais desse trabalho.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer a Prof.<sup>a</sup> Lilian Santiago, ao Prof. Luciano Codato, Prof. Juvenal Savian Filho, aos colegas de mestrado Caio Sperandio e Luiz Hassanal, pelos alunos responsáveis pela organização do SOFIA, sobre tudo a Raphaela e o Bruno, pelas pequenas, mas valorosas, colaborações tanto ao meu trabalho como à própria condução do meu pensamento para tantas outras coisas. – Por fim, agradeço à secretaria de pós-graduação Daniela Gonçalves pela prontidão sempre atuante em todos os momentos (e foram muitos) em que precisei do seu auxílio para com todas as burocracias do programa.

Se fiz descobertas valiosas, foi mais por ter paciência do que por qualquer outro talento.

- Newton

## **Resumo.**

A presente dissertação versa sobre como podemos identificar os *Principia*, escrito por Newton na sua versão final em 1726, como uma obra estritamente matemática e como podemos identificar a *Óptica*, 1703, como um livro que parte de experimentos para que fosse formulado. Para tanto apresento primeiramente uma contextualização de época de Newton, para que se apresente as preocupações de Newton na divulgação de suas teorias e então uma leitura estruturada dos *Principia* que visa explicar como ele é um livro matematicamente estruturado. Após isso apresento a leitura de algumas questões da *Óptica* visando apresentar como que os experimentos ajudam a compor o livro. Ao final, apresento uma conclusão dividida em três partes, a primeira uma conclusão sobre o método científico de Newton, a segunda uma conclusão que visa dar os últimos argumentos para uma leitura puramente matemática dos *Principia* e uma terceira que trata por fim sobre os experimentos com a *Óptica*.

Palavras chave: Newton, método científico, *Principia*, *Óptica*, experimento.

## **Abstract.**

This text is about how We can identify the *Principia*, written by Newton in your final version in 1726, as a book strictly math and how We can identify the *Optics*, 1703, as a book which start from experiments to build on. To do it I show firstly a contextualization of Newton's time, to show the concerns of Newton about the disclosure of his theories and then a structural read of the *Principia* to explain how it is mathematically structured. After it, I show a read of few questions from *Optics* to show how the experiments help to compose the book. In the end, I show a conclusion divided in three parts, the first is a conclusion about scientific method, and the second is to give final arguments to a read of pure math of *Principia* and, at least, the third that show last arguments to experiments in *Optics*.

Key words: Newton, scientific method, *Principia*, *Optics*, experiment.

## Sumário.

<b>Introdução. ....</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 1 – Vida acadêmica e disputa de teorias. ....</b>	<b>20</b>
<b>1.1 – Introdução. - Newton e Hooke, primeira contenda. ....</b>	<b>20</b>
<b>1.2 – Prefácio de Cotes à segunda edição.....</b>	<b>22</b>
1.2.1 – Introdução. ....	22
1.2.2 – Notas do tradutor sobre o prefácio. ....	25
1.2.3 – Prefácio de Cotes à segunda edição. ....	28
1.2.4 – Como a gravidade atua nos céus. ....	35
1.2.5 – Há quem não goste dessa física celestial, porque contradiz as opiniões de Descartes. ....	43
<b>Capítulo 2 – Os <i>Principia</i> e sua importância matemática no modelo newtoniano. .....</b>	<b>48</b>
<b>2.1 – Introdução. – Revolução científica e o interesse pelo método. ....</b>	<b>48</b>
2.1.1 Um aspecto importante da Revolução Científica foi o intenso interesse pelo método. ....	50
2.1.2 – Hypothesis non fingo. ....	53
<b>2.2 – Principia. ....</b>	<b>53</b>
2.2.1 – Definições. ....	60
2.2.2 – Axiomas ou leis do movimento.....	73
2.2.3 Corolários.....	76
2.2.4 – Comentários de Cohen sobre o método teórico Newtoniano. ....	81
2.2.5 – Comentários de George Smith sobre o método Newtoniano. ....	85
<b>Capítulo 3. – A <i>Óptica</i> e sua importância experimental. ....</b>	<b>91</b>
<b>3.1 - Introdução. ....</b>	<b>91</b>
<b>3.2 - A <i>Óptica</i>. ....</b>	<b>97</b>
<b>3.3 - Das Cores. ....</b>	<b>99</b>
<b>3.4 – Conclusão de <i>Das Cores</i>. ....</b>	<b>103</b>
<b>3.5 - Carta de Newton a Oldenburg de 11 de junho de 1672. ....</b>	<b>104</b>
3.5.1 - Que o raio não é dividido nem dilatado de nenhum outro modo. ....	104
3.5.2 - Que o branco é uma mistura de todas as cores. ....	105

<b>Conclusão.....</b>	<b>108</b>
<b>Parte 1 – Newton e a conclusão da revolução científica. ..</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>Parte 2 – Exposição concluinte da aplicação matemática nos <i>Principia</i>. .</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>Parte 3 – Experiência e as descrições da luz. ....</b>	<b>108</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>111</b>

## Introdução.

Isaac Newton foi um filósofo natural inglês dos séculos XVII e XVIII. Sua lista de contribuições à ciência contém principalmente o desenvolvimento da mecânica, do Cálculo Diferencial e Integral, da óptica moderna e outras contribuições matemáticas e mecânicas, tal como os seus estudos sobre o binômio de Newton<sup>1</sup>. No que diz respeito ao método científico, as contribuições de Newton foram importantes, contudo, não se apresentaram de forma marcante quanto às suas colaborações para a física e matemática, pois Newton nunca escreveu um livro sobre o método, distintamente do que fizeram Bacon e Descartes. Seu método, apesar de não se mostrar de uma maneira clara, é tomado como modelo científico para as gerações posteriores de cientistas, sobre tudo sua maneira de pensar matemática e experimento e de sustentar uma certa indução para princípios científicos.

Sua contribuição para a ciência moderna traz traços do seu método, sobre tudo na maneira como ele utiliza a matemática e a experiência. Porém, como já dito, ele não escreveu sobre o uso desses métodos diretamente, ele apenas o utilizou em sua obra científica. Com a ausência de uma tal obra específica sobre o método, faz-se necessário, para a compreensão, mesmo que inicial do método newtoniano, estudar a sua obra científica. Sobre o método newtoniano, é possível salientar duas características que foram passadas de Newton para grande parte da ciência moderna.

A primeira dessas características pode ser resumida na sua famosa frase, *hypothesis non fingo*, “não faço hipóteses”. Newton refere-se, com esta frase, a não admissão em elaborar hipóteses metafísicas sobre o mundo. Ele dizia publicamente que só escrevia sobre aquilo que ele pudesse, de alguma forma, fazer experimentos, isentando-se de falar sobre qualquer assunto metafísico, mesmo sobre aqueles mais inerentes à física, tais como as causas para uma ideia de espaço e tempo absoluto<sup>2</sup>, ou sobre a condução de determinados

---

<sup>1</sup> O binômio de Newton, apesar do nome, não foi feito pelo próprio Newton. O que aconteceu, na verdade, é que foi utilizado o seu estudo sobre como calcular  $(a+b)^n$  quando  $n$  é fracionário ou negativo, que ocorre quando se geram séries infinitas.

<sup>2</sup> Este assunto é exaustivamente discutido nas cartas entre Leibniz e Clarke. Por esse intermédio Newton expõe alguns de seus pensamentos sobre porque devemos pensar em um espaço e tempo absolutos. Entretanto nos *Principia* este assunto não é abordado, ele é tomado como dado. Apesar de hoje nós aceitarmos com mais

fenômenos. Newton restringiu-se aos elementos experimentáveis em sua física. Esta característica não foi algo aceita passivamente pela comunidade científica da época de Newton. Excluir assuntos metafísicos no tratamento da física era abandonar importantes explicações sobre as causas dos fenômenos. Por exemplo, um dos maiores problemas de Newton, quando recusa a escrever sobre metafísica em sua obra física, foi a falta de descrição do éter. O éter, para a época, era uma substância presente em todo o universo; ele era responsável, principalmente, pela condução das forças entre os corpos.

Na época de Newton, a questão da *ação à distância* não era algo aceito, tal como hoje é inaceitável ligações de efeitos a causas sem conexões definidas. Pensar que um corpo, sem nenhum tipo de condutor, possa afetar outro corpo de qualquer maneira, nunca foi uma ideia bem vista. Logo, o éter era admitido pela comunidade científica da época como o condutor das forças presentes nos fenômenos físicos, como, por exemplo, na ação entre dois ímãs. A força de atração era explicada como sendo transmitida de um ímã para o outro por meio do éter.<sup>3</sup>

Entretanto, como Newton não fez nenhuma descrição sobre o éter em sua obra, abriram-se possibilidades para a crença em ações a distância, especialmente com relação à força de gravidade. Outro problema gerado pelo não tratamento adequado sobre o éter era o relativo à afirmação de que o universo poderia estar vazio nos espaços entre os astros. Boa parte da comunidade científica da época de Newton não aceitava que o vazio pudesse existir; para uma grande parte dos cientistas, o universo estava preenchido por corpos e, onde não havia corpos, havia o éter. Torricelli chegou a fazer um experimento com um recipiente de vidro evacuado, com a intenção de demonstrar que o vazio pode existir; contudo, Leibniz, em sua correspondência com Clarke, diz que o experimento não era válido, pois pelo recipiente passava luz e, desta maneira, ele não estava vazio. Ele teria não apenas a luz, bem como o éter que a conduziu até lá.

---

facilidade esse tipo de prerrogação, para a época apresentar justificativas para este tipo de ideia fazia do texto mais palatável, argumentável.

<sup>3</sup> Por conta de Newton não ter apresentado seu modelo gravitacional respeitando uma condução dessa força por um meio etéreo, ele sofreu a acusação de introduzir qualidades ocultas na matéria, algo que se imputava como um erro da tradição aristotélica.

Newton não tinha nenhuma explicação alternativa para o éter.<sup>4</sup> Mas, pessoalmente, ele acreditava na existência do éter, só não tratava disso em sua obra por não ter como fazer experimentos sobre o isto; desta maneira, não poderia comprovar suas características. Contudo, há descrições sobre o éter na correspondência newtoniana e em algumas questões da *Óptica*, onde, mais especificamente, ele supõe que possa existir um meio pelo qual os fenômenos são conduzidos, como veremos a seguir.

Apesar do esforço de Newton em não tratar de metafísica em sua obra científica, ele escreveu uma vasta obra religiosa e mística. Newton, assim como muitos cientistas em sua época, não era um ateu, nem tentou *excluir Deus do governo do mundo*,<sup>5</sup> como o acusa Leibniz. Algumas das obras religiosas de Newton são: *An Historical Account of Two Notable Corruption of Scriptures*, *Chronology of Ancient Kingdoms Attended e Observations upon the Prophecies*. Infelizmente, não trataremos de suas obras místicas e religiosas aqui. Sobre seus trabalhos místicos, sabemos que Newton devotou grande tempo de sua pesquisa sobre Alquimia. Recentemente duas pesquisadoras brasileiras<sup>6</sup> encontraram nos arquivos da *Royal Society* uma carta de Augustin Boutens endereçada a Henri Oldenburg, quando este ainda era secretário geral da *Royal Society*, que continha um pequeno envelope dobrado com um pó amarelo chamado de “Ludus”, que serviria para a composição do Alkahest, o solvente universal dos alquimistas.<sup>7</sup> O que demonstra o interesse da época sobre alquimia.

A primeira característica que podemos apontar é a experiência. Isto é, poder se utilizar da experiência não apenas como prova factual do que se diz, mas toma-la como procedimento metodológico para a elaboração de teorias. Sua validação como argumento toma necessariamente uma validade do processo de indução, que Newton acerta sua segurança com base, sobre tudo, na simplicidade da natureza. Em comparação com a tradição aristotélica anterior a Newton, essa é uma característica extremamente distintiva entre os dois modelos.

---

<sup>4</sup> Cabe lembrar que a noção de *campo* só é dada por Faraday no século XIV, o que ajudou a entender a força gravitacional como um *campo gravitacional*, tal como a então nova noção de *campo magnético*.

<sup>5</sup> Esta acusação está presente na correspondência Leibniz-Clarke que começa, mais precisamente, na segunda resposta de Clarke a Leibniz e continua até a quinta e última sessão das cartas. (LEIBNIZ, 1974, p. 410)

<sup>6</sup> Ana Maria Goldfarb e Márcia Ferraz <http://revistapesquisa.fapesp.br/2012/09/14/uma-incomoda-pitada-de-magia/>

<sup>7</sup> *ibid.*

Em comparação com a predominante física cartesiana da época de Newton, pensar dessa maneira era assegurar um caráter de realidade para as teorias científicas, coisa a qual os cartesianos não procuravam.

A segunda característica do método newtoniano é uso da matemática. Entretanto a posição de Newton quanto ao uso da matemática se diferenciava da maneira cartesiana. Descartes faz uma operação fundamental no campo da geometria, sobre tudo, e nos apresenta um modelo geométrico capaz de trabalhar com muito mais fenômenos do que antes apenas com as noções Euclidianas. Isso certamente deu a ele melhores ferramentas para pensar em sua teoria dos Vórtices, por exemplo. Já Newton, além de suas colaborações notórias para com a matemática, a traz para a descrição de fenômenos físicos utilizando-se da matemática com tamanha severidade como nunca antes havia ocorrido. Do ponto de vista do desenvolvimento da ciência como um todo, essa aplicação matemática sobre a física é um dos, senão a mais, importante colaboração de Newton para com a ciência. Ele pensava que, apesar da forte adequação que podemos fazer entre os fenômenos e a matemática, esta é apenas uma ferramenta para induzir princípios anteriormente descobertos e relacionar esses princípios com o fim de obter previsões. Com esse intuito, fora suas contribuições para com a matemática pura, sua maior contribuição foi o esforço de quantificar os fenômenos e os colocar em propriedades matemáticas. Essa ideia não é original de Newton. Galileu já tinha lançado a ideia de quantificar os fenômenos físicos. A grande conquista de Newton foi tomar todas essas propriedades e construir um sistema que pudesse explicar todos os tipos de movimentos.

Newton quantificou os fenômenos físicos de maneira universal, especialmente com a lei da inércia e conceitos tais como o de massa - que se refere à quantidade de matéria presente no corpo; de aceleração - que é a medida segundo a qual a velocidade cresce; e de força - que é o resultado da relação entre massa e aceleração. Toda força na mecânica newtoniana tem uma, e apenas uma, direção.<sup>8</sup> Não devemos confundir a *massa* com o *peso*, pois o peso é uma força, com direção para o centro de gravidade, que atua sobre a massa, e esta é a quantidade de matéria presente no corpo. Mediante estas definições físicas e

---

<sup>8</sup> Ao contrário da concepção de força de Kepler que pensava que a força poderia ser circular, e não que o movimento circular era dado por duas forças.

propriedades matemáticas, Newton consegue quantificar de maneira satisfatória os fenômenos físicos, sejam os terrestres ou astronômicos e, com a lei da gravitação universal, consegue desenvolver um modelo único para os cálculos das órbitas.

O objetivo desta dissertação é apresentar os dois principais componentes do método newtoniano, a matemática e o experimento, procurando definições nas suas duas principais obras, *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural (Principia)* e a *Óptica*.

A composição geral desse trabalho se destaca da seguinte maneira: primeiramente uma descrição geral da composição dos *Principia*. Em seguida, apresentarei um pouco sobre o que Cotes diz em seu prefácio visando contextualizar Newton em sua própria época, isto é, observar como as ideias dele eram apresentadas pelos seus próprios partidários para ver quais os tipos de cuidados que se tomava ao se falar sobre as teorias de Newton para com a comunidade acadêmica. No segundo capítulo, procuro fazer uma análise mais sistemática dos *Principia*, nos seus axiomas, definições e leis, para que se observe como os *Principia* podem ser caracterizados como uma obra de cunho matemático, e não experimental, e como Newton trabalha a construção dessa nova física a partir de seus conceitos. Após isso, no terceiro capítulo, descrevi os experimentos com a luz realizados por Newton com o intuito de demonstrar agora a importância do experimento para o trabalho newtoniano, mostrando que seu trabalho sobre a óptica partia quase sempre dos experimentos que fazia, partindo do pressuposto teórico de que a luz possuía uma natureza heterogênea.<sup>9</sup> Na conclusão, faço um balanço dos resultados obtidos.

Nossa análise levou a entender os *Principia* como um livro tão somente matemático, sem espaço para a experimentação na sua elaboração; por outro lado, as experiências entrariam após o estudo da obra, como uma confirmação, ou refutação, do que ela prediz. E a

---

<sup>9</sup> Há uma sempre uma discussão sobre o porquê determinados cientistas não descobriram outras coisas em seus programas de pesquisa se as outras coisas a serem descobertas estavam intimamente ligadas aos resultados que eles haviam chegado em suas pesquisas. Podemos pensar que os cientistas possuem sempre uma meta na resolução de seus problemas. De maneira que, para Kepler, por exemplo, a meta de solução era descobrir leis universais para o movimento das órbitas. E deste modo não podemos culpa-lo por não ter chegado a ideia de força gravitacional, pois pensar em leis para as órbitas já era um grande passo para ele. De mesma forma, no tocante aos problemas de Newton com a luz, sua meta de solução num primeiro momento era provar que a luz era heterogênea e de mesma forma não o podemos culpa-lo por não descobrir a *assinatura atômica de espectro*, por exemplo. Dado que para ter se chegado a assinatura do espectro, antes tivemos de entender a heterogeneidade da luz.

*Óptica* como uma obra majoritariamente experimental, que descobre propriedades e leis não através da elaboração matemática, mas pelos experimentos de Newton com os prismas e as lentes. Para tanto, primeiramente foi feito um estudo sobre as leis e definições dos *Principia*, onde está o mais conceituado trabalho de Newton, a mecânica. Depois dessa análise inicial, algumas questões foram levantadas, sobre tudo acerca do que era tomado como científico na época em que foi escrito e quais foram as dificuldades encontradas pela mecânica newtoniana para ser aceita pela comunidade acadêmica. Algumas das dificuldades são: o uso massivo da matemática nas proposições, que não era comum na época e dificultava a fluidez de entendimento do leitor, não por ser ignorante em matemática, mas para entender como ela foi aplicada por Newton, dado que o uso do recém descoberto *Cálculo das Fluxões* vem desde as definições;<sup>10</sup> ausência de explicações quanto à origem e transmissão da força de gravidade, assunto que foi negligenciado por Newton na elaboração dos *Principia*, o que fez seus contemporâneos pensarem que ele estava atribuindo "qualidades ocultas" na matéria; e problemas de ordem metafísica, como os conceitos de espaço e tempo absolutos, negação pública do éter e suas ideias de declínio da força,<sup>11</sup> melhores discutidas na correspondência Leibniz e Clarke.

Levantados esses problemas, o objetivo do texto passou a ser dissertar sobre as soluções apresentadas por Newton. Quanto ao seu uso da matemática, ele deixa claro que, para cumprir sua intenção de descobrir os "princípios ativos" do movimento no mundo pela

---

<sup>10</sup> Apesar de normalmente apresentarmos o confeito de forma Newtoniano como  $F=ma$ , isto é, *Força* é uma relação entre a *massa* e a *aceleração*, não é de fato esse conceito que está apresentado nas leis de Newton. Não é um conceito errado, é apenas um conceito incompleto. De fato, para a maioria dos casos, pensar que *Força* é igual a relação da *massa* com a *aceleração* ajuda se pensarmos, por exemplo, no conceito de *peso* Newtoniano, que é  $P=mG$ , isto é, *Peso* é uma relação da *massa* com a *aceleração da gravidade local*, no nosso caso a gravidade da própria Terra, sendo  $G=9,8m/s^2$ . Porém o conceito de *força* na sua forma completa é *Força* é igual a derivada da velocidade em relação a derivada do tempo.  $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ . E dado que o *Cálculo das Fluxões* (ou *Cálculo infinitesimal*), uma descoberta simultânea de Newton e Leibniz ainda era pouco conhecido pela época, dada a sua recente descoberta, isso deixaria o texto mais difícil de ser compreendido.

<sup>11</sup> Nestas correspondências, Clarke discute com Leibniz, entre outros assuntos, sobre a afirmação de Newton de que as forças no universo estão em declínio e, então, para que o mundo permanecesse como está, Deus teria de fazer a manutenção de todos os movimentos no mundo. O que para Leibniz soou como um absurdo. Assim como a afirmação de Newton de um espaço e tempo absoluto e a postulação da força de gravidade. Esses pressupostos que Newton declara são de fato necessários para o decorrer dos *Principia*. Bem como a afirmação dos declínios dos movimentos é uma consequência necessária da mesma obra. O ponto a se observar é que tanto aquilo que é pressuposto, como aquilo que foi resultado, são dados, ambos, por razões matemáticas, ou se preferirmos, por necessidades matemáticas e não por pressupostos metafísicos ou por experimentos, no caso do tempo e espaço absoluto.

decomposição das características envolvidas, e sua generalização pela indução, conforme está no prefácio de Cotes e primeiras páginas dos *Principia*, era necessário o uso da matemática como principal ferramenta, dado o seu poder de composição e decomposição de sistemas de movimento, e não só de movimento. Newton assegura esse poder de análise e síntese da matemática, sobre tudo, por ter desenvolvido o Cálculo das Fluxões. Este método deixa claro que podemos derivar e integrar dados de uma função regular e assim partir de princípios ativos para a composição do todo, bem como é possível decompor os fenômenos para seus princípios mais elementares. O que podemos observar aqui é a ideia de decompor e sintetizar fenômenos, não mais por análise de princípios físicos, como feito anteriormente, mas segundo ferramentas e princípios matemáticos para se fazer isso. O uso da indução por Newton, para ele, é um passo lógico possível já que nada o faz pensar que o modo de ação da natureza, sobre a questão das propriedades dos fenômenos, seja distinto em lugares distintos (COTES *in* NEWTON, 2008, p. 25). Presume-se aqui uma universalidade das propriedades. Sobre essa universalidade, como podemos ler nas cartas entre Leibniz e Clarke, ela é justificada pela governança de Deus sobre o mundo.

Pensando que a mecânica possui apenas características universais, o trabalho passa a ser descobrir quais são os "princípios ativos" da matéria através dos movimentos, apontar seu comportamento através da matemática, generalizá-los por indução e explicar os fenômenos a partir desses princípios. Ao analisarmos o método empregado nos *Principia*, percebemos que utilizando um método indutivo é possível evitar responder diversas questões metafísicas, que não estavam no intuito de Newton de serem respondidas. Seu recorte metodológico consistia apenas em apresentar um sistema capaz de calcular os movimentos e não discutir a sua causa. Dizer que há princípios na matéria e assumir que se faz é uma generalização por indução, é colocar os princípios ao teste a cada novo caso, como é o problema geral de qualquer pensamento indutivo, pois eles não têm a seguridade da dedução dada segundo o *modus tolens*. Assumindo princípios por indução, evita-se ter que justificar qual a origem da "força", por exemplo, ou ter de explicar porque ela seria derivada do movimento em relação ao tempo. Esse princípio é simplesmente dado e ele está disponível ao teste como todo princípio assumido por indução. Além disso, este é o ponto onde a matemática é não apenas a ferramenta, mas o meio pelo qual a mecânica newtoniana se salva de um instrumentalismo, pois ela ao mesmo tempo calcula os movimentos e dá justificativas para pensarmos que eles funcionam segundo as propriedades descritas, como veremos na conclusão. Assumir que

empregamos princípios por indução ao invés de discuti-los a partir de uma origem metafísica é um forte legado newtoniano a ciência. Essa ideia pode não ter se originado com ele, mas ele foi quem melhor fez a separação daquilo que é metafísico e daquilo que viria a ser o *objeto da ciência*. Além disso, assume que o que se diz é por indução, deixa a porta aberta para críticas e, até mesmo, para teorias melhores que possam aparecer. Enquanto que uma descrição que parte de pressupostos metafísicos carrega muito mais o peso canônico.

Sua recusa em se assumir características metafísicas vem de sua famosa frase "hypothesis non fungo" (não faço hipóteses), neste caso "hipóteses metafísicas", pois Newton, conforme assume nos *Principia* (NEWTON, 1726, p. 943), diz que as descrições de fenômenos que não são baseadas nas experiências devem ser chamadas de hipóteses e elas não possuem lugar na filosofia experimental. Isso, podemos identificar, como um esforço de proibir qualquer desenvolvimento peripatético que venha a ser chamado de ciência, ou seja, evitar que se faça novamente ciência como se fazia ao molde aristotélico e fazê-la mais ao molde apresentado por Galileu. Resumir o conhecimento científico aos experimentos é não dar espaço para qualquer elaboração que parta de elementos metafísicos, pois, por definição, não é possível fazer experiências com os elementos metafísicos. Isso também se encaixa como crítica ao modo cartesiano de se fazer ciência, que não se importava com a corroboração dos experimentos para a sua formulação, dada uma postura assumidamente mais instrumentalista.

Pensando desta maneira, ele acaba omitindo, em sua obra, qualquer explicação que envolva o éter, pois apesar do éter ser pensado na época como um condutor físico de alguns fenômenos, não tinha como se fazer experiências com o éter, para descobrir suas reais propriedades. Apesar de omitir em sua obra o uso do éter como via de explicação para a transmissão dos fenômenos, em algumas das cartas enviadas a Bentley e a Boyle, assim como em algumas questões da *Óptica*, como veremos a seguir, Newton faz apresentação das propriedades que ele julga pertencer ao éter. O problema de Newton com o éter não era sua total descrença, mas simplesmente não ter experiências para provar suas propriedades. Newton, de maneira particular, acreditava que o éter transmitia alguns dos fenômenos e descreve nas cartas, inclusive, quais seriam suas propriedades físicas, como elasticidade e tenuidade. Na *Óptica*, Newton, sem fazer afirmações categóricas e decisivas, apresenta ideias

de quais seriam as propriedades que um "meio elástico" teria de ter para fazer a transmissão e dar condições para as propriedades da Luz, bem como de outros fenômenos.

Apresentada de maneira resumida e conclusiva, podemos concordar que os comentadores em geral sobre a obra newtoniana colocam que os dois principais aspectos do trabalho científico de Newton é o uso da matemática, o uso dos experimentos e indução para a generalização de princípios. Isso fica mais acentuado quando fazemos a leitura dos *Principia* do que a leitura da *Óptica*. Nos *Principia*, Newton primeiramente apresenta suas oito definições sobre o movimento que dão o sentido necessário para os termos nessa nova física. Em resumo, podemos dizer que as oito definições tratam, respectivamente, das seguintes noções: o novo sentido para o termo *peso* e *massa*, em contraposição ao sentido aristotélico de *peso*; conceitos de transmissão de movimento; a noção de inércia; a noção de que o movimento é dado por causa de uma força imprimida, e não de qualquer outra forma (como a natural de Aristóteles); e as definições de cinco a oito tratam da noção do que é uma força centrípeta, necessária para que se possa entender sua lei da gravitação universal.

Dadas essas definições, Newton descreve suas leis, ou axiomas, do movimento. A primeira lei é a lei da inércia, necessária como lei para que não se pense em algum tipo de movimento natural, tal como na tradição aristotélica; a segunda lei versa que todo movimento é causado por uma força e toda força é vetorial; e a terceira lei diz que toda ação possui uma reação igual e oposta.

Dadas as definições e as leis, Newton utilizará os dois primeiros livros para fazer uma descrição geral do movimento mediante as proposições. Proporá casos de movimento e composições de movimento para explorar essas definições e leis ao seu limite, procurando apresentá-las nos casos para demonstrar seu poder explicativo e preditivo. E utilizará o terceiro livro para fazer uma descrição do sistema do mundo segundo essas definições, leis e desenvolvimento nas proposições. Sendo assim, os dois primeiros livros servem para explicar e apresentar a mecânica newtoniana, sobre tudo em seus principais conceitos, que são a inércia, a noção de força e, talvez, a noção mais importante, de que não existe uma distinção de fenômenos físicos entre os movimentos que acontecem na Terra e os movimentos que acontecem no cosmo. E o terceiro livro Newton completa o seu objetivo que é apresentar um sistema que possa calcular os movimentos de todas as órbitas sob as mesmas leis em todos os casos.

## Capítulo 1 – Vida acadêmica e disputa de teorias.

### 1.1 – Introdução. - Newton e Hooke, primeira contenda.

A carreira acadêmica de Newton foi marcada por algumas discussões com seus notáveis contemporâneos sobre suas principais teorias, a das cores (*Óptica*) e a da gravitação universal (*Principia*). Sua primeira grande discussão aconteceu com Robert Hooke em relação à sua obra de *Tratado sobre a Luz e as Cores*. Newton iniciou sua teoria das cores a partir de um experimento que se consistia em um furo numa veneziana e um prisma cristalino que causava a dispersão da luz que entrava pelo furo. Newton percebeu que a luz branca era decomposta pelo prisma nas sete cores do arco-íris, e que essa dispersão não possuía forma circular, como previa a lei de Snell-Descartes, mas possuía forma elíptica.

Na época de Newton, acreditava-se que as cores, que a luz decompunha no prisma, estavam presentes no próprio prisma e, sendo assim, a luz branca “carregava” consigo as cores presentes no prisma.<sup>12</sup> No entanto, Newton estava convicto de que a luz possuía uma natureza heterogênea, isto é, as cores decompostas no prisma já estavam na luz, e a sua composição é que faz a luz branca. E para provar sua ideia ele conseguiu, com um esquema de prismas, dispersar a luz branca nas suas cores e, depois, reagrupá-las novamente na luz branca. Mais duas experiências podiam comprovar a ideia de Newton: a primeira foi a de que uma cor decomposta pelo prisma mantinha-se ao passar por um segundo prisma, o que demonstra que não havia mais decomposições, ou o carregamento de outras cores; a segunda experiência foi o uso de um disco colorido, mais tarde conhecido como *Disco de Newton*, que continha as cores do arco-íris que, quando girado, parecia estar branco. Com essas experiências, Newton concluiu que a cor branca era, na realidade, uma composição das sete cores do arco-íris.

No experimento abaixo, a luz branca O, entra pelo orifício F e decompõem-se no prisma ABC, posto plano abc; a luz sofre convecção pela lente MN; em seguida, é realinhada pelo prisma FDG; passa pelo prisma IKH, onde é novamente decomposta na

---

<sup>12</sup> Há de se lembrar que nesta época as pessoas pensavam que a luz possuía uma natureza homogênea, e por isso podemos pensar que a luz “carregava” as cores do prisma. O que é incompatível se pensarmos em uma luz heterogênea.

parede LV. O interessante a se observar é que, na primeira decomposição (no prisma ABC) os raios de luz estão na ordem PQRST e, quando passam pela recomposição e convecção e, depois, novamente por decomposição no prisma FDG e no prisma KHI, a ordem das cores inverte-se para TSRQP.<sup>13</sup>

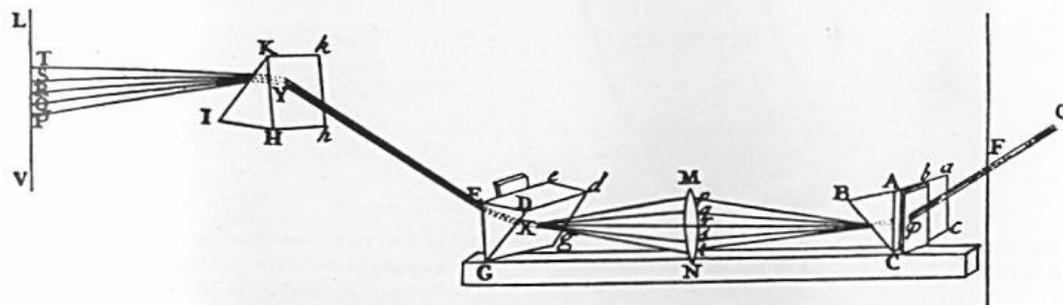


FIG. 16.

Hooke, na mesma época, também realizava estudos sobre a luz, publicados em seu livro *Micrographia*, no qual ele assumia a luz como uma vibração do éter em pequena amplitude, em forma de onda transversal. O problema da explicação de Hooke é que ela barra no seguinte experimento: ao colocar-se uma jarra com líquido vermelho e uma outra jarra com líquido azul, e ao bombardear com luz ambas as jarras, nota-se que a luz passa pelas jarras normalmente, porém, ao misturar ambos os líquidos, a luz era bloqueada. Hooke não sabia explicar porque a luz era bloqueada, dado que ela era uma onda que vibrava sobre o éter. A explicação desse fenômeno veio com Newton, em 1672. Utilizando sua teoria da luz e das cores, onde se presume que a luz era composta por raios, partículas, Newton conseguiu explicar o experimento de Hooke da seguinte maneira: no jarro com líquido azul, todas as demais seis cores da luz eram bloqueadas, deixando que apenas a cor azul passasse pelo jarro; o mesmo ocorrendo para o jarro com líquido vermelho que deixava passar apenas a cor vermelha. Quando misturados os dois líquidos, todas as cores da luz branca eram bloqueadas e, por isso, não se deixava passar cor alguma. - Hooke não aceitou a hipótese de Newton e a discussão entre os dois perdurou por correspondência de

<sup>13</sup> Origem da imagem: [http://www.princeton.edu/~his291/Experimentum\\_Crucis.html](http://www.princeton.edu/~his291/Experimentum_Crucis.html)

1672 a 1680; algumas das cartas dessa correspondência foram publicadas no *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.<sup>14</sup>

Mas a discussão mais grave entre Newton e Hooke é que este o acusava de ter copiado sua ideia de gravitação universal. De fato, Hooke havia pensado na gravitação universal tal como Newton, mas ele não tinha como dar todas as propriedades matemáticas que Newton deu para a força gravitacional. Ao ter desentendimentos com Hooke sobre a teoria das cores, Newton ficou relutante em publicar um livro tomando como princípio a gravitação, não por sua aceitação, mas por conta de que Hooke também alegava que este era um princípio que ele havia pensado primeiro. Newton só fez a publicação quando Halley o convenceu disso e pagou todo o trabalho de confecção do livro. Antes da publicação, Halley e Oldenburg se reuniram com Hooke para lhe pedir provas e argumentos que pudessem corroborar a ideia de gravitação universal. Porém Hooke não as tinha e assim a publicação do livro de Newton pode ocorrer sem esse tipo de conturbação. Tal como diz Cotes no seu prefácio da segunda edição dos *Principia*, outros já haviam pensado na gravitação, mas somente Newton foi capaz de demonstrá-la segundo princípios e propriedades matemáticas.

A leitura que apresento aqui é do prefácio de Cotes traduzida e publicada pela Edusp, como consta na bibliografia. Comento também as notas colocadas pelos tradutores. Como dito anteriormente, esta introdução é importante para contextualizarmos o recebimento das ideias de Newton.

## **1.2 – Prefácio de Cotes<sup>15</sup> à segunda edição.**

### **1.2.1 – Introdução.**

O prefácio de Cotes nos dá uma importante noção de qual era o ambiente acadêmico na *Royal Society* quando na publicação da segunda edição dos *Principia*. Podemos perceber no que a mecânica newtoniana pecava frente às exigências da época e

---

<sup>14</sup> O periódico científico da *Royal Society of London*.

<sup>15</sup> Roger Cotes (1682 - 1716) foi professor Plumiano e autor das *fórmulas de integração numérica*, também conhecidas como *fórmulas de Newton-Cotes*.

quais eram as soluções apontadas por Newton para os problemas que ela se dirigia.<sup>16</sup> Podemos perceber neste prefácio a importância que Cotes dá ao que se chama de *Filosofia Experimental* e como ela parece ser decisiva para a formação das teorias. Isto é posto claramente em contraposição ao método cartesiano e não é por acaso. A grande batalha para com a física de Newton é contra os cartesianos de sua época. Sendo assim, Cotes apontou os erros da teoria e da concepção de Descartes sobre como ele descreve as órbitas e acentuou o que há de mais importante na mecânica newtoniana.

Descartes descreve em sua teoria um sistema heliocêntrico onde os planetas e os cometas são levados em suas órbitas por vórtices que tem o Sol como centro. Tal como se todo o sistema solar estivesse em um grande redemoinho com os planetas e cometas sendo levados pela força desse redemoinho. Pensando dessa maneira, os vórtices teriam forças distintas para gerar os movimentos distintos nos planetas. Um dos problemas que Cotes identifica nessa teoria é a de que os cometas possuem órbitas muito mais elípticas do que os planetas, e por conta disso eles passam pelos vórtices dos planetas de maneira quase que perpendicular, o que certamente perturbaria a órbita do cometa tanto na direção quanto na velocidade da sua trajetória, e tanto uma coisa quando a outra não é observada no comportamento dos cometas. E, quando Cotes ataca as concepções de Descartes, quero dizer, os meios pelos quais Descartes se utilizou para construir sua teoria, ele utiliza argumentos para mostrar que a *Filosofia Experimental* é um método melhor do que a investigação do mundo tal como fez Descartes. Nesse sentido, *Filosofia Experimental* é investigar os fenômenos para extrair deles os princípios mais básicos e generalizar esses princípios por indução. E o método de Descartes, como Cotes descreve, se consiste em investigar o mundo segundo princípios que não passaram pelo crivo da experiência e por isso podem nos levar a raciocínios errados.

As leis e proposições que Newton expõe nos *Principia* possuem muito mais um caráter geométrico do que de fato experimental. Em uma conversa com Halley, ocorrida nos dois anos de peste negra em Londres, Newton expõe que parte das propriedades matemáticas da força de gravidade foram extraídas diretamente, ou por consequência, das

---

<sup>16</sup> Podemos centralizar o problema dos Principia como sendo o problema das órbitas e o da Óptica como o problema da natureza da Luz.

três leis do movimento planetário de Kepler. Essas três leis são de propriedades geométricas e foram, segundo Kepler, verificadas com os dados da órbita de Marte observadas e anotadas por Tycho Brahe, que foi o melhor observador astronômico antes da invenção do telescópio. Kepler pode assim verificar que 1) os planetas movem-se em elipse; 2) os planetas percorrem áreas iguais em tempos iguais; e 3) os quadrados dos períodos de revolução são proporcionais ao cubo das distâncias dos planetas em relação ao Sol. Partindo então dessas propriedades, geométricas, Newton desenvolve todo o seu sistema do mundo, sempre se referindo que as leis de Kepler refletem uma verdade sobre o mundo. Isso inclusive é utilizado para atacar a teoria de Descartes, a qual não respeita as três leis do movimento de Kepler.

Cotes e Newton acusam os cartesianos de não utilizarem princípios corroborados pela experiência, mas poderíamos pensar que os princípios de movimento apontados por Newton em sua mecânica, tal como massa, aceleração, força, sua noção de peso, a própria ideia de gravidade, sua ideia de inércia e tantas outras coisas poderiam ser de fato princípios observados de experimentos. Mas que tipo de experimento é possível para se provar, ou extrair, a ideia de inércia, por exemplo? – Como fazer um experimento que possa garantir a existência de massa ou força distintamente? – A ausência de respostas para essas perguntas nos sugere que os princípios, ao menos os utilizados nos *Principia*, não foram extraídos de experimentos. Ou, ao menos, não foram extraídos de experimentos por Newton, mas são noções necessárias, dadas como entendidas, para a composição de sua mecânica.

Há experimentos, de fato e historicamente sabidos, na composição da *Óptica*. Logo no começo deste texto, há o experimento com jarros coloridos de Hooke e do experimento com prismas de Newton para a decomposição e composição da luz. Porém a respeito da mecânica, podemos pensar que o que Newton fez foi um belo arranjo matemático com noções que já existiam, conquistada pelos seus antecessores, adicionando as conquistadas do Cálculo, como veremos na conclusão. Quando olhamos para o começo e trajetória da revolução científica até Newton, percebemos que a noção de *força*, por exemplo, nasceu com Kepler, na sua revisão do *Mysterium Cosmographicum* em 1621. As noções de *aceleração* e *inércia* nascem com Galileu com os experimentos que ele produz utilizando esferas e rampas. A noção de *queda livre em um segundo*, ou o que vamos chamar de

“aceleração da gravidade” mais a frente, foi descoberta por Huygens com os seus experimentos com pêndulos. O que Newton faz é a comunicação dessas noções para um modelo matemático que sustente previsões trabalhando com essas noções. Se pensarmos que ele se referia às experiências dos filósofos naturais, ao dizer que sua mecânica partia de uma *Filosofia Experimental*, então citar a *Filosofia Experimental* possui um certo grau metodológico. Mas, então, teríamos de investigar se essas noções foram de fato retiradas dos experimentos por cada um deles, ou se na verdade elas eram um pressuposto metodológico em cada um dos casos.

### 1.2.2 – Notas do tradutor sobre o prefácio.

O prefácio de Cotes, publicado na segunda edição dos *Principia*, dá uma boa ideia de como era a relação das teorias de Newton com as teorias vigentes de sua época. Em sua época, Newton não teve uma boa recepção. Em particular, como cita Westfall<sup>17</sup>, por dois motivos principais. O primeiro por conta da ausência de explicações metafísicas que justifiquem não só o éter, ou a ausência dele, mas também que justifique a existência de um espaço e tempo absolutos ou uma causa para a força de gravidade; o segundo, o fato de Newton usar a matemática de uma maneira que não era comum nas universidades da época. Sua teoria não era fácil de ser entendida, a tal ponto que sua real difusão aconteceu com o auxílio dos textos de Samuel Clarke que serviam como apoio aos textos de Newton.

Cotes escreveu a Newton no dia 18 de fevereiro de 1712-3 a respeito do prefácio para a segunda edição dos *Principia*:

Acho que será apropriado além da descrição do Livro e seus aperfeiçoamentos, acrescentar alguma coisa mais específica a respeito da maneira de filosofar utilizada, e onde ela difere da maneira de Descartes e outros, quero dizer, mostrando primeiro o princípio empregado. Isto eu não somente declararia, mas tornaria evidente por uma pequena dedução do próprio Princípio de Gravidade a partir do Fenômeno da Natureza de uma forma simples, que possa ser compreendida por leitores comuns e sirva, ao mesmo tempo, como exemplo a eles do Método do Livro inteiro (CAJORI<sup>18</sup> in NEWTON, cit. COTES, 2008, p. 301).

Sobre os aperfeiçoamentos do livro, em sua parte descritiva, o próprio Newton se encarregou de seu prefácio, deixando para Cotes a descrição da *maneira de filosofar* e um

---

<sup>17</sup> WESTFALL, R. S. – Never at rest.

<sup>18</sup> As notas de Cajori são uma importante explicação preservada na tradução brasileira dos *Principia*.

exame das objeções de Leibniz<sup>19</sup> (sem mencionar seu nome)<sup>20</sup> e do sistema dos vórtices<sup>21</sup> de Descartes, que era forte na Europa em sua época. Leibniz escreve uma carta em nove de abril de 1716 e chama o prefácio de “pleine d'aigreur” (cheio de amargura).

Combater a teoria dos vórtices de Descartes era o principal objetivo do prefácio de Cotes. Muitos cientistas importantes da época, tais como Henry More<sup>22</sup>, Joseph Glanvill<sup>23</sup> e até mesmo Robert Boyle<sup>24</sup> escreveram apreciando muito Descartes, que foi até mesmo chamado por Boyle como *o mais agudo filósofo moderno*<sup>25</sup>. A Inglaterra teve acesso à teoria cartesiana por meio de um livro-texto escrito por Rohault<sup>26</sup> e traduzido para o Latim

---

<sup>19</sup> Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 - 1716) filósofo alemão que foi o primeiro membro estrangeiro da *Royal Society* por ter desenvolvido uma calculadora mecânica para o cálculo de raiz quadrada. Por conta disso ele teve contato direto com Newton e com todos os seus contemporâneos.

<sup>20</sup> As objeções de Leibniz aparecem em correspondências. A mais evidente delas é a correspondência de Leibniz e Clarke onde ele deixa claro todas as suas objeções contra o modelo newtoniano. Cotes se refere neste ponto ao fato que Leibniz negava a existência da força de gravidade por achar que ela só poderia ser um milagre perpétuo. Pois, no seu entendimento, todo movimento circular dado por uma força tenderia a escapar pela tangente do movimento e sair do movimento circular. As demais objeções na correspondência com Clarke dizem a respeito de concepções metafísicas sobre a obra de Newton, sobre tudo a respeito da concepção de espaço e tempo absoluto de Newton e sobre sua concepção de universo finito.

<sup>21</sup> O sistema de vórtices de Descartes tratava de explicar como os planetas eram levados em órbita ao redor do Sol. No caso da explicação de Descartes, temos de prestar atenção nesse detalhe de que para ele os planetas eram levados em suas órbitas por vórtices, redemoinhos, e não possuíam de fato um movimento próprio. Assim, Descartes está, de certa maneira, isento de explicar como poderiam os planetas, a Terra principalmente, ter movimento próprio e mecânico. Essa explicação cosmológica foi rapidamente e facilmente aceita por toda a Europa, tornando-se de fato um grande desafio para Newton sobrepor. Explica o tradutor que o motivo da difícil sobrepuja do sistema solar cartesiano deve-se ao fato de sua explicação ser simples de ser entendida, algo que não acontece com a explicação newtoniana. De fato, a física de Newton só alcançou o status que a conhecemos depois de uma tradução de Clarke de um texto sobre o sistema cartesiano, onde ele acrescentava notas sobre o sistema de Newton.

<sup>22</sup> Henry More (1614 - 1687) foi professor no *Cambridge Platonist School*.

<sup>23</sup> Joseph Glanvill (1636 - 1680) foi um escritor, filósofo e clérigo anglicano muito próximo de todos os filósofos naturais do século XVII.

<sup>24</sup> Robert Boyle (1627 - 1691) foi um filósofo natural, químico e inventor. Entre suas principais descobertas está a noção moderna de *elemento químico*, a invenção da bomba a vácuo, a descoberta de que o ar é na realidade composto por diversos elementos e a descoberta do oxigênio. Há também seus escritos sobre o éter que serviram de base para a noção de éter do próprio Newton.

<sup>25</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. - CAJORI, F. Apêndice histórico e explicativo, nota 5 p. 302.

<sup>26</sup> Jacques Rohault (1618 - 1672) foi um filósofo francês seguidor do cartesianismo.

por Théophile Bonet<sup>27</sup> em 1674 e essa tradução foi levada para Londres em 1682, cinco anos antes da publicação da primeira edição dos *Principia*. A segunda edição dos *Principia* foi feita vinte e seis anos depois da primeira edição e, ainda assim, era necessário escrever contra a teoria dos vórtices de Descartes, tamanha era sua força.

Segundo Cajori<sup>28</sup>, uma das razões do argumento cartesiano ser tão forte era por conta da simplicidade de suas argumentações: ao contrário do livro de Newton, um leigo em matemática poderia ler a teoria de Descartes e entender seu conteúdo. Já os *Principia*, somente aqueles acostumados com a linguagem matemática poderiam entender, mediante atenta leitura. *Qualquer um já havia visto lascas de madeira rodopiar em redemoinhos nos rios*<sup>e</sup> os planetas seriam como essas lascas de madeira nesses vórtices dos redemoinhos. As demonstrações de Rohault eram simples, baseavam-se em coisas que qualquer um já tinha visto, e ele usava essa familiaridade com os fenômenos para tornar a teoria bem mais clara. O livro original de Descartes sobre os vórtices também possui descrições geométricas, mas estas são muito mais simples do que as do livro de Newton.

Quando Samuel Clarke<sup>29</sup>, que é descrito por Whewell<sup>30</sup> como *amigo e discípulo de Newton*, estava fazendo uma tradução do livro-texto de Rohault, Whiston<sup>31</sup>, escreveu-lhe o seguinte sobre essa tradução:

Uma vez que os jovens da universidade devem ter, no momento, algum Sistema de Filosofia Natural para seus estudos e exercícios; e uma vez que o sistema verdadeiro de Sir Isaac Newton ainda não foi suficientemente facilitado para este propósito, não é impróprio, para benefício deles, traduzir e usar ainda o sistema de Rohault. Mas, logo que a filosofia de Isaac Newton vier a ser melhor conhecida, somente esta deverá ser ensinada, e as outras abandonadas. (CAJORI in NEWTON cit., WHISTON, 2008, p. 303).

O tratado de Rohault era considerado na época como o melhor tratado de física geral<sup>32</sup>. A tradução de Clarke, feita em latim, desempenhou um papel importante tanto nas

---

<sup>27</sup> Théophile Bonet (1620 - 1689), médico francês.

<sup>28</sup> Ainda em suas notas sobre os *Principia*.

<sup>29</sup> Samuel Clarke (1675 - 1729) filósofo inglês, clérigo anglicano e grande amigo de Newton.

<sup>30</sup> William Whewell (1794 - 1866) foi clérigo anglicano, teólogo, filósofo e historiador da ciência. Professor do *Trinity College*.

<sup>31</sup> William Whiston (1667 - 1752) foi teólogo, historiador e matemático inglês. Sua obra mais conhecida é a tradução do livro *Antiquitates Judaicae*.

faculdades inglesas quanto nas americanas. Na segunda e terceira edição da tradução de Clarke, ele adiciona notas que explicavam concepções newtonianas, mas sem serem aparentemente refutações do texto traduzido, e sim reflexões dele, de maneira imparcial.

A tradução de Clarke conseguia apresentar ambas as teorias, cartesiana e newtoniana, como se fossem duas teorias verdadeiras sobre o mundo, sem colocar de fato uma concorrência entre elas. Durante um certo período, ambas foram sendo ensinadas nas universidades inglesas. Sobre essa falta de aceitação de Newton, Voltaire chega a dizer que *apesar de Newton ter vivido por mais de quarenta anos após a publicação dos Principia, mesmo na época de sua morte ele não tinha mais do que vinte seguidores*. É importante notar que a não aceitabilidade da teoria de Newton nesse período não se deu por uma questão de incoerência de suas ideias, ou por ter escrito coisas erradas, mas por conta de sua obra não ser clara nem mesmo para os acadêmicos de sua época. Não porque ele escrevia mal, mas por conta da presença iminente de conceitos provindos do desenvolvimento do Cálculo em sua obra. Não é possível ler os *Principia* sem a devida compreensão de tais conceitos geométricos e do Cálculo que Newton utiliza.

O sistema newtoniano só terá plena superioridade em relação ao cartesiano em meados do século XVIII, quando se deixa de ensinar o sistema de Descartes e passa-se a ensinar o sistema newtoniano. Primeiro no *Trinity College*, na Inglaterra, colégio onde Newton trabalhava e sucessivamente e rapidamente por toda a Europa.

### **1.2.3 – Prefácio de Cotes à segunda edição.**

Cotes inicia seu prefácio afirmando que há três tendências de estudo da filosofia da natureza e destacando as principais características de cada uma delas.<sup>33</sup>

O primeiro tipo seria o das escolas derivadas de Aristóteles, ou dos peripatéticos<sup>34</sup>, que atribuíram aos fenômenos qualidades específicas e ocultas, *de maneira que se supõe*

---

<sup>32</sup> Falar de física geral neste contexto é dar as descrições mais básicas sobre como ocorre o movimento, seja terrestre ou supralunar, e não a ideia de dar fórmulas ao movimento. Este intento de matematizar os fenômenos físicos quem primeiro pensou foi Galileu, mas quem por fim conseguiu foi Newton.

<sup>33</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. Prefácio de Cotes a segunda edição p. 19.

<sup>34</sup> Peripatéticos são os seguidores, ou as escolas fundadas, a partir dos livros de Aristóteles.

que os fenômenos de corpos particulares aconteçam de forma desconhecida<sup>35</sup>, sob a justificativa de que os efeitos dos corpos são de natureza particular ao corpo em questão e não de caráter universal a todos os corpos. Mas eles não dizem de onde os corpos derivam tais propriedades e, assim, eles não dizem nada sobre os fenômenos.

E totalmente ocupados em dar nomes às coisas e não em investigá-las, inventaram, podemos dizer, uma maneira filosófica de falar, mas não nos deram a conhecer a verdadeira filosofia.<sup>36,37</sup>

O segundo tipo, o de *filósofos naturais*, é uma descrição que bate somente com a forma cartesiana de filosofar e, claro, aqueles que pensam dessa maneira. São aqueles que supõem que toda matéria é homogênea, e que sua forma é uma variação de relações simples e claras das particularidades dos componentes. Segundo Cotes<sup>38</sup>, eles procedem corretamente quando constroem relações de coisas simples para coisas complexas, mas quando se dão a liberdade de imaginar coisas grandes, de movimentos e situações desconhecidas, como o Sistema Solar,

imaginam fluídos ocultos, penetrando livremente os poros dos corpos, imbuídos de uma sutileza capaz de tudo desempenhar e agitados com movimentos ocultos, incorrem em sonhos e quimeras e descuidam da verdadeira constituição das coisas, que certamente não deverá ser derivada de conjecturas falaciosas, quando mal a alcançamos pelas mais seguras observações (COTES in NEWTON, 2008, p. 20).

O terceiro tipo, por fim, é o tipo que adota a *Filosofia Experimental*, que derivam as causas dos fenômenos a partir dos princípios mais simples possíveis, e não aceitando como princípio nada que não tenha sido provado pelas experiências. Vemos aqui uma importante distinção entre o método racionalista de Descartes e o método empirista de Newton. No *Discurso do Método*, Descartes diz que não assume como princípio nada que não tenha

---

<sup>35</sup> Ibid.

<sup>36</sup> Ibid.

<sup>37</sup> Até pouco tempo antes da publicação dos *Principia* ainda havia na Europa um resquício aristotélico com o uso do *Organon*. Aristóteles já não era mais ensinado em diversas universidades na Europa, graças às *Revoluções dos Orbes Celestes* de Copérnico e os esforços teóricos e práticos de Galileu e Kepler para sustentar o copernicanismo; não era mais possível sustentar as obras de Aristóteles como verdade sobre o mundo. Primeiro, na cosmologia e astronomia e, depois, paulatinamente nas demais ciências, Aristóteles foi perdendo espaço. Já na época de Newton o que havia de “mais verdadeiro” sobre cosmologia eram as teorias de Descartes, fazendo com que a época de Newton não é um embate entre ele e a tradição aristotélica, mas entre ele e a nova tradição cartesiana que floresceu em toda a Europa.

<sup>38</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. Prefácio de Cotes a segunda edição p. 20.

sido completamente esmiuçado pela razão. Já Newton nos *Principia* diz que não toma nenhum preceito como verdadeiro até que ele tenha sido provado por fenômenos, no caso experimentos. Esse terceiro tipo de filósofo deduz por análise as forças e as leis da natureza e a partir daí, por síntese, demonstram a constituição de todo o resto. Dizer que o processo é composto por análise e síntese é uma forma também de mostrar como ele é completo. Cotes diz que essa foi a forma que Newton preferiu em detrimento das outras formas e que um exemplo ilustre do seu método, e da funcionalidade dele, está na dedução do movimento dos planetas pela teoria da gravitação universal, que prediz que o atributo da gravitação é encontrado em todos os corpos, e sobre isto,

outros suspeitaram antes dele, ou imaginaram, mas ele foi o único e primeiro filósofo que pode demonstrá-lo a partir das aparências e torná-lo uma base sólida para as especulações mais nobres.<sup>39</sup>

Os *Principia* é uma demonstração dos movimentos por análise, o ponto alto da lei da gravitação universal e a demonstração do sistema solar por meio dessa lei. Cabe apenas lembrar que Newton não dá a causa dessa força de gravidade nem a origem dela, o que nos basta são as propriedades segundo as quais ela opera.

Newton consegue de fato fazer uma demonstração consistente da lei de gravitação demonstrando que ela pode ser encontrada em todos os corpos por intermédio da precisão dos cálculos e poder de explicação dos fenômenos se pensarmos que há força de gravidade. Mas ele não foi capaz de apresentar provas concretas sobre a origem dessa força, que exige um esforço para além do matemático. Ou seja, não foi capaz de dizer porque, qual a origem, dessa força. Responder a pergunta: - Por que razão os corpos se atraíam mutuamente? – Por esta falta de resposta que se acusava Newton de pensar em *qualidades ocultas* na matéria tal como os aristotélicos.

#### **1.2.2.1 – Notas de Cajori sobre a gravidade como atributo.<sup>40</sup>**

Cotes escreve sobre o que podemos ou não atribuir a Newton sobre a natureza da gravidade. Cotes começa expondo algumas frases que poderiam indicar um esforço para explicar a origem da força de gravidade, *que o atributo da gravidade é encontrado em*

---

<sup>39</sup> Ibid.

<sup>40</sup> Este trecho se refere ao apêndice de Cajori na tradução do livro de Newton, como já citado.

*todos os corpos. [...] a gravidade deve ter um lugar entre as qualidades primárias de todos os corpos.*<sup>41</sup>

Por estas frases, poderíamos dizer que a gravidade é algo inerente à matéria. E isso é reforçado se analisarmos as seguintes frases de Newton:

as forças absolutas dos corpos atrativos (Livro I, Proposição LXXVII) e a atração de um corpúsculo em direção às diversas partículas de uma esfera (Livro I, Proposição LXXV). Nestas expressões, os “corpos” ou “corpúsculos” são descritos como ativos, como atrativos. Eles não são passivos como um pedaço de madeira levado por um redemoinho (CAJORI *in* NEWTON, *cit.* Newton, 2008, p. 305).

O problema de se dizer que a gravidade é inerente a matéria, como já dito, é que por não se explicar o porquê dos corpos se atraírem mutuamente, ela se torna uma *qualidade oculta* tanto quanto dizer que “é da natureza dos corpos tender ao repouso”. Quando Huygens<sup>42</sup> leu a descrição de Newton sobre o movimento no sistema solar, logo aderiu às suas ideias e abandonou a explicação cartesiana. Porém, quando viu a suspeita de que Newton atribuía à gravidade uma propriedade inerente à matéria, ele voltou-se à concepção cartesiana de mundo.

No entanto, atribuir a Newton a tese de que a gravidade é algo inerente à matéria é um erro, pois Newton não acreditava nisso, no decorrer do que está nos *Principia*. Newton não escreveu acerca disso diretamente em seus livros, muito pelo contrário, escrevia, em cartas, contra essa concepção e, também, a de *ação a distância*, justamente porque nas cartas havia a concepção de éter. Em uma carta a Boyle<sup>43</sup>, Newton especula sobre a origem da gravidade como sendo o resultado da compressão e dilatação de *espíritos livres* no *corpo fleumático do éter*. A ação da gravidade também seria garantida por conta do éter agindo como uma espécie de condutor dessa força. Newton não publicou suas cogitações sobre o éter, pois não se sentia seguro sobre seus escritos sobre tal tema, como já dito, já que ele não tinha experimentos que os confirmasse. Mas como esses escritos eram apenas particulares de Newton para alguns de seus contemporâneos, para o leitor dos *Principia*

---

<sup>41</sup> Ibid.

<sup>42</sup> Christiaan Huygens (1629 - 1695) foi um matemático, astrônomo e físico holandês. Uma de suas maiores descobertas foram os anéis de Saturno e a lua Titã do mesmo planeta, a maior de todas as luas de Saturno.

<sup>43</sup> Carta de Newton a Boyle de 1679 disponível no site: <http://www.orgonelab.org/newtonletter.htm> – Nesta carta Newton explica a Boyle diversas das suas concepções sobre o éter.

ficava mais claro que Newton pressupunha qualidades ocultas na matéria do que qualquer outra coisa.

Na época, era recorrente a adesão à concepção de que o éter poderia ser um condutor dos fenômenos físicos. Boyle também havia escrito sobre essas propriedades novas da matéria atribuídas ao éter. Era comum para os acadêmicos da época pensar que o condutor dos fenômenos eletromagnéticos, coesão, gravidade (no caso de Newton) e demais fenômenos<sup>44</sup> que pareciam ter ação à distância, eram na realidade conduzidos pelo éter.

Nas cartas à Bentley de c.1692-3, Newton se opõe enfaticamente à ideia tanto de que a gravidade é uma propriedade da matéria como a de *ações à distância*.

O problema é que a correspondência de Newton foi organizada e impressa muitos anos depois da publicação de seus livros. O público não teve acesso à correspondência newtoniana; por isso, quando da publicação da primeira edição dos *Principia*, pensava-se que Newton entendia a gravidade como uma propriedade inerente à matéria.

Por conta da falta da publicação das cartas, os professores cartesianos, maioria na época, acusavam Newton de oferecer espaço para o vácuo em sua teoria do movimento. Nesta época, era inconcebível que houvesse algum espaço vazio no universo, todo o espaço estaria preenchido, senão por matéria, por éter. Os argumentos contra a existência do vácuo são tanto físicos como metafísicos. Na correspondência entre Leibniz e Clarke, Leibniz dá os argumentos metafísicos contra o vácuo, que se baseiam na aceitação de que o vácuo não pertence à sabedoria de Deus, pois isso limitaria a sua ação no mundo, na medida que limitaria a quantidade de matéria no mundo. Neste caso, podemos pensar que a não existência do éter é uma razão física, pois era comum admitir que ele era um condutor de fenômenos físicos; então, pensar na sua não existência implicaria em um problema físico para a época.<sup>45</sup>

---

<sup>44</sup> Nesta época até mesmo a sensação dos animais era explicada por uma conexão com o éter. Pois na época não se tinha noção de que os animais tenham sentidos de alcance diferente dos seres humanos, então algumas das coisas que os animais percebiam, mas o ser humano não, era explicado por uma conexão com o éter.

<sup>45</sup> Poderíamos dividir a opinião de Newton grossamente em duas partes, uma opinião mais jovem, que pode ser encontrada nestas cartas e que tenta se esquivar de se pensar que a gravidade é uma propriedade da

Newton admite, em livros e cartas, que não é sua intenção descobrir as propriedades da gravidade, mas apenas descrever sobre as propriedades matemáticas da maneira como ela opera. Para reforçar este ponto cito um trecho da carta de Newton a Bentley de 17 de janeiro de 1692-3, Newton escreve,

É inconcebível que a matéria bruta e inanimada devesse, sem a mediação de alguma outra coisa não-material, atuar sobre e afetar outra matéria, sem haver contato mútuo, como deveria ser se a gravitação fosse essencial e inerente a ela, no sentido de Epicuro. E esta é uma razão pela qual desejaria que você não atribuísse a gravidade inata a mim. Que a gravidade seja inata, inerente e essencial à matéria, de forma que um corpo possa atuar sobre o outro a uma distância através do vácuo, sem a mediação de qualquer outra coisa, por e através da qual a sua ação e força possa ser transportada de um para outro, é para mim um absurdo tão grande que acredito que nenhum homem dotado de uma faculdade competente em assuntos filosóficos possa nele recair. A gravidade deve ser causada por um agente que atue constantemente de acordo com certas leis; mas, se este agente é material ou imaterial, deixo para a consideração dos meus leitores (CAJORI *in* NEWTON, *cit.* Newton, 2008, p. 307).

Na segunda edição dos *Principia* (1713), Newton acrescenta dois trechos ao livro que demonstram sua posição imparcial sobre a origem da gravidade:

Uso aqui a palavra atração de forma geral, para qualquer esforço que seja feito pelos corpos para aproximarem-se, se aquele esforço surge da ação dos corpos entre si, na medida em que tendem um para o outro ou perturbam-se por influências ("Spirits") emitidas; ou se surge da ação do éter ou do ar, ou de qualquer meio que seja, corpóreo ou incorpóreo, impelindo corpos de qualquer maneira lá colocados, uns em direção aos outros (Escolio da proposição LXIX do Livro I).

Todos os corpos, quaisquer que sejam, são dotados de um princípio de gravitação mútua [...] Não que eu afirme ser a gravidade essencial aos corpos; sua *vis insita* não significa nada mais que sua inércia (Livro III, Regras de Raciocínio em Filosofia) (CAJORI *in* NEWTON, *cit.* Newton, 2008, p.307).

Segundo Cajori, o erro em se atribuir a Newton o pensamento de que a gravidade é inerente à matéria não é por conta de Cotes<sup>46</sup>, apesar das partes citadas de seu prefácio, pois Cotes também não acreditava nisso. Antes da publicação do seu prefácio, ele o enviou

---

matéria e esse esforço em procurar propriedades do éter, e uma opinião mais madura, que pode ser identificada nas cartas de Leibniz e Clarke dada que é uma das últimas correspondências de Newton. Nessas cartas a Leibniz já há uma assunção do vácuo, da gravidade como propriedade da matéria, do espaço e tempo absoluto e uma série de outras coisas. – Podemos pensar que pelo fato de Newton não ter encontrado propriedades sobre o éter ou qualquer outra que o impedisse de tratar a gravidade como propriedade da matéria, que por evidências negativas ele tenha assumido essas ideias por fim.

<sup>46</sup> Cabe lembrar que essas noções são colocadas no prefácio de Cotes para que protegesse Newton de cobranças sobre a natureza da força de gravidade e sua origem. Bem sabemos, como trataremos mais adiante, que Newton não era tão cético quanto ao éter e que possuía hipóteses sobre a transmissão da força de gravidade e que ele a pensava como ao próprio da matéria.

à Clarke que fez apontamentos, entre eles um que aparece em uma carta de agradecimento de Cotes à Clarke está declarado que:

Agradeço-lhe por suas correções ao Prefácio e, particularmente, por sua sugestão em relação àquela passagem em que eu parecia afirmar que a gravidade fosse essencial aos corpos. Estou completamente de acordo com seu pensamento de que ela fornecia assunto para objeções capciosas, e, portanto, eu a suprimi imediatamente devido à menção feita pelo Dr. Cannon de sua objeção a mim, e assim ela jamais foi impressa [...] Meu intento com aquela passagem não era afirmar que a gravidade fosse essencial à matéria, mas sim que somos tão ignorantes das propriedades essenciais da matéria e que, com relação ao nosso conhecimento, a gravidade poderia ter direito àquele título [de propriedade essencial], como as outras propriedades que mencionei. Pois entendo por propriedades essenciais aquelas sem as quais nenhuma outra pertencente à mesma substância pode existir: eu não pretenderia provar que fosse impossível para qualquer das outras propriedades dos corpos existir até mesmo sem extensão (CAJORI *in* NEWTON, 2008, p. 307-8).

Cotes afirma que sua intenção não é a de depreciar a reputação dos que já são aceitos [Descartes], mas de apresentar as considerações para fazer um julgamento justo da teoria newtoniana<sup>47</sup>. Começa então de fato o prefácio fazendo algumas considerações.

Suas primeiras considerações são acerca de Aristóteles. Ele define que não há corpo sem peso, que era o que Aristóteles dizia sobre os astros, e que a *levidade* não existe como qualidade nos corpos, mas sim que ela é um valor relativo à quantidade de massa presente no corpo. Diz isso em função dos peripatéticos atribuírem a qualidade de *leveza* aos elementos, como o ar e o fogo; contrário a isso estaria o *peso* como qualidade da terra e da água.<sup>48</sup> E os corpos constituídos da quinta-essência, que são os corpos supralunares, não possuiriam nem a qualidade do *peso* nem da *leveza*. Para Aristóteles, mesmo a qualidade da *leveza* tinha algum peso, por assim dizer, mas os corpos feitos de quinta-essência não possuíam qualquer peso. De maneira geral, os elementos da Terra seriam elementos pesados e o elemento que constitui o cosmo, a quinta-essência, seria um elemento, entre outras coisas, sem peso.

---

<sup>47</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. Prefácio de Cotes a segunda edição p. 21.

<sup>48</sup> Esta lógica se constrói em Aristóteles da seguinte maneira: se atiramos um punhado de terra no ar, ele volta para o repouso no chão, então o lugar natural da terra é ao chão. Se atiramos um punhado de terra na água, esta se assenta no fundo da água, então a posição natural da terra é ao fundo da água. Se atiramos água no ar, esta também irá para o chão, demonstrando que o lugar natural da água também é no chão, mas acima da terra. Quando acendemos uma tocha a chama sempre aponta para o alto, mesmo se virarmos a tocha de ponta cabeça, o que demonstra que o lugar natural do fogo é acima da terra, da água e do ar. Sendo assim, as esferas que compõem a Terra são dadas segundo a seguinte ordem: primeiro uma esfera de terra, depois uma esfera de água, uma esfera de ar e por fim uma esfera de fogo.

Dado isso, Cotes passa a tratar das características da matéria que possuem influência na gravidade. Primeiramente, ele diz que a gravidade atua em todos os corpos em direção contrária. Ou seja, ao invés de ser uma força propulsora dos corpos, é uma força atrativa dos corpos. O peso dos corpos, ao contrário de uma qualidade, refere-se na verdade à quantidade de matéria que eles contêm. A força gravitacional de um corpo é dada proporcionalmente a sua quantidade de matéria - quanto maior o corpo, maior será a sua força gravitacional. A força atrativa entre os corpos é composta da força atrativa de cada envolvido - A Lua gravita a Terra ao mesmo tempo que a Terra gravita a Lua. E o peso, por fim, é dado pela quantidade de matéria relacionada a quantidade de aceleração da força de gravidade sobre o corpo. Isto é, o peso é uma força com vetor para o centro de gravidade.

#### **1.2.4 - Como a gravidade atua nos céus.**

Cotes considera a lei da inércia como uma *lei da natureza universalmente aceita por todos os filósofos*<sup>49</sup> (COTES in NEWTON, 2008, p. 22). A lei da inércia consiste que um corpo permanece em repouso até que uma força o propulsione em linha reta, ou que um corpo permanece em movimento retilíneo até que alguma força o faça parar ou mudar de direção. Os movimentos curvilíneos, que é o caso das órbitas planetárias, indica que há sobre o corpo uma força que continuamente o retira de seu movimento retilíneo, isto é, há a composição de duas forças.

Para tratar sobre o movimento curvilíneo, necessário para se entender as órbitas, Cotes o apresenta começando pela propriedade de que se o movimento curvilíneo é dado por algo que continuamente desvia o corpo da sua tangente, essa força que os desvia só pode estar no centro de suas órbitas, por isso essa força que o mantém circular pode ser chamada de centrípeta, ou de atrativa se a referência for o corpo do centro.<sup>50</sup>

---

<sup>49</sup> Por *todos os filósofos* de sua época.

<sup>50</sup> O que podemos observar dessa explicação de Cotes é que primeiramente ele passa a dar argumentos geométricos para a existência de uma força centrípeta que mantém as órbitas dos planetas. Mas para compreender esta prova nós precisamos necessariamente aceitar algumas propriedades dadas por Newton. A primeira delas é de que toda força possui um único vetor, isto é, toda força é em linha reta. Entretanto os planetas não estão em um movimento em linha reta, eles possuem um movimento circular. Sendo assim, se aceitamos que toda força é vetorial, temos necessariamente de pensar que há a composição de duas forças sobre o movimento dos planetas. Uma delas é o próprio movimento em linha reta, que seria, para Newton,

Se vários planetas movem-se em órbitas com um mesmo centro e os quadrados do tempo ( $t^2$ ) periódico é igual ao cubo da distância ( $d^3$ ), a força centrípeta será inversamente igual ao quadrado da distância.<sup>51</sup>

Newton escreve em um *memorandum* de 1714<sup>52</sup>, um ano depois da publicação da segunda edição dos *Principia*, que no ano de 1666 ele estava procurando um modo de estimar a força de gravidade na qual um corpo é envolvido, e diz ele que conseguiu esta estimativa graças às leis do movimento planetário de Kepler<sup>53</sup>:

E no mesmo ano [1666] eu comecei a pensar na extensão da gravidade até o orbe da Lua, e, encontrei como estimar a força com a qual [um] globo [é] envolvido na superfície de outra esfera, da lei de Kepler dos tempos periódicos dos planetas [...] começando numa proporção sesquialtera das suas distâncias do centro de seus orbes eu deduzi que as forças que mantêm os planetas nas suas órbitas precisam ser reciprocas com o quadrado das distâncias dos centros [até o orbe]: e então comparei o requisito de força para manter a Lua no seu orbe com a força da gravidade da superfície terrestre, e encontrei [uma] resposta “muito próxima”. Tudo isso [aconteceu] nos dois anos de praga de 1665 e 1666<sup>54</sup>, naqueles dias eu estava no primor da minha idade para invenções, e concentrado em matemática e filosofia muito mais do que em qualquer época. (CHANDRASEKHAR, 1995)

As forças centrípetas de todos os planetas são inversamente proporcionais aos quadrados das distâncias a partir dos centros das órbitas.<sup>55</sup> Dado que as apsides<sup>56</sup> estão sempre no mesmo lugar.<sup>57</sup>

---

um impulso inicial dado por Deus, e a outra delas é a força que continuamente retira o planeta deste movimento em linha reta e o coloca em um movimento elíptico. – Até este momento do texto, Cotes está argumentando para a existência dessa segunda força.

<sup>51</sup> Exposição de propriedades da terceira lei de Kepler.

<sup>52</sup> CHANDRASEKHAR, S. (1995) *Newton's Principia for the Common Reader*. Clarendon Press.

<sup>53</sup> As três leis de Kepler sobre o movimento planetário podem ser resumidas em: 1) Os planetas descrevem órbitas elípticas em torno do Sol, tendo o Sol em um dos seus focos; 2) Uma linha que liga um planeta ao Sol descreve áreas iguais em tempos iguais; e 3) Os quadrados dos períodos de revolução (T) são proporcionais aos cubos das distâncias médias (a) do Sol aos planetas,  $T^2=ka^3$  onde K é uma constante de proporcionalidade.

<sup>54</sup> Foram dois anos de forte epidemia de peste bubônica (peste negra) que afligiu a Inglaterra.

<sup>55</sup> Aqui está, por fim, outro argumento matemático para a força de gravidade. O primeiro apresentado foi de que ela é uma força centrípeta e o segundo, dado agora por intermédio da terceira lei de Kepler, é o de que elas são inversamente proporcionais ao quadrado da distância que estão do Sol. Isto é, a força cai pela metade a cada quadrado de distância. Até o momento Cotes disse apenas que há esses argumentos para sustentar que há essa força, a partir de agora ele argumentará que esta é uma força de gravidade.

Cotes reconhece que as apsides podem não estar sempre no mesmo lugar, mas afirma que elas são uma imperfeição da força centrípeta e que ainda estão previsíveis ao cálculo<sup>58</sup>; e mesmo que postas em consideração no cálculo, suas diferenças são tão pequenas que podem ser desprezadas. Esse ponto do prefácio apresenta a defesa da teoria newtoniana de possíveis críticas envolvendo imprecisão nos cálculos sobre as órbitas. Quando há um movimento que muda as apsides das órbitas, os resultados obtidos são maiores do que o quadrado da distância, praticamente mais da metade do resultado no caso da Lua, mas Cotes explica o porquê dessa variação para que não se pense que é um erro na teoria:

Mas podemos dar uma resposta mais verdadeira dizendo que esta progressão das apsides não deriva de um desvio da lei do inverso dos quadrados da distância, mas de uma causa bem diferente, como é admiravelmente mostrado neste trabalho. É certo, então, que as forças centrípetas com as quais os planetas tendem para o Sol, e os planetas secundários<sup>59</sup> para os primários, são rigorosamente iguais ao inverso dos quadrados das distâncias (COTES *in* NEWTON, 2008, p. 23).

Para provar que a força centrípeta das órbitas e a força da gravidade<sup>60</sup> são na realidade uma só força, Cotes utilizará o caso da Lua como exemplo. A prova é necessária, pois facilmente pode se pensar que existem na realidade três tipos de força: uma força que mantém as coisas no chão, uma que propulsiona os planetas numa tangente e uma terceira força que os retira dessa tangente e os coloca em órbita com o Sol. O que Cotes quer demonstrar, na realidade, é o fato de que a força da qual se originam esses três fenômenos é a mesma.

---

<sup>56</sup> Apsides: - Ponto da órbita de um planeta, satélite ou veículo especial, no qual estes se encontram mais afastados, ou menos afastados, de seu centro de atração. Nome comum de apoastro e periastro. (MOURÃO, 1995, 46)

<sup>57</sup> Como sabemos hoje, as apsides dos planetas também estão em uma espécie de movimento circular, elas variam pouca coisa por ano.

<sup>58</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. Prefácio de Cotes a segunda edição p. 23.

<sup>59</sup> Quando Kepler utilizava o termo *planetas secundários*, ele se referia aos planetas que ficam depois da Terra, ou seja, Marte, Júpiter e Saturno. Aqui Cotes usa o termo para representar a Lua, ou as luas de outros planetas. Na época de Cotes e Newton, já se tinha o conhecimento das quatro luas de Júpiter, descobertas por Galileu, e de Titã, lua de Saturno.

<sup>60</sup> A distinção aqui entre força centrípeta e a força de gravidade é que a primeira seria a que mantém os planetas em órbita, a segunda seria a responsável pela atração dos corpos na Terra. O cuidado aqui está em tomar concepções de época, que eram distintas, e demonstrar, aos poucos, que na realidade essas forças são na realidade uma única força.

O percurso descrito por um corpo é proporcional à força impelida. Sendo assim, a força centrípeta da Lua é proporcional à força da gravidade da Terra, pois a força de gravidade da superfície da Terra é a causa do movimento centrípeta lunar. Da mesma maneira, a distância que a Lua está da Terra, está para o espaço que um corpo pesado descreveria ao cair por causa da gravidade da Terra.

A força centrípeta da Lua girando em sua órbita está para a força da gravidade da Terra, assim como o quadrado do semidiâmetro da Terra está para o quadrado do semidiâmetro da órbita (COTES *in* NEWTON, 2008, p. 24).

O que Cotes faz aqui é, na verdade, um processo de associação, ele relaciona as distâncias como uma justificativa para que a força centrípeta da Lua tenha relação com a gravidade da superfície da Terra, em uma tentativa de demonstrar que há de fato uma relação entre a força exercida sobre a Lua e a sua distância para com a Terra. Comprovando assim, a propriedade do quadrado da distância atribuída a força de gravidade.

No movimento orbital, é possível derivar dois tipos de força, um que retira o planeta de sua tangente, para que o planeta não siga em linha reta, e outro que mantém o planeta em órbita, para que ele não siga ao centro da órbita. Apesar de serem as forças movimentos aparentemente inversos, a causa que mantém o movimento orbital, nessas supostas duas direções contrárias, é a gravidade. Isso se prova pelo fato de ser a mesma força a responsável pela órbita e a responsável pela queda das coisas na Terra.<sup>61</sup>

E é razoável supor que esta força deve se estender a imensas distâncias, uma vez que mesmo nos topos das montanhas mais altas não percebemos nenhuma diminuição sensível dela (COTES *in* NEWTON, 2008, p. 24).<sup>62</sup>

Nas cartas de Newton a Boyle, onde Newton descreve sobre a ação do éter e a gravidade<sup>63</sup>, ele deixa claro que não existem ações à distância, e sim que a ação da gravidade tem um conectivo, que seria o éter. Ao descrever o *espírito livre* da gravidade no

---

<sup>61</sup> É relativamente fácil compreendermos isso hoje por termos a noção de *campo gravitacional*. Entretanto a noção de *campo* foi introduzida por Faraday apenas no século XIX. Uma das principais dificuldades de Cotes nesta parte é a de explicar a ação da gravidade sem possuir a ideia de *campo gravitacional*.

<sup>62</sup> Sabemos hoje que a força de gravidade possui alcance infinito, diminuindo infinitamente quanto mais longe se está. Mas dada a concepção de gravidade da época, era cabível pensar que ela era uma força com um limite no alcance.

<sup>63</sup> Carta de Newton a Boyle de 1679.

*corpo fleumático do éter*, ele diz, entre outras coisas, que o éter penetra nos corpos pelos poros; logo, ele penetraria cada vez menos nos sólidos justamente por conta da porosidade dos sólidos estarem na superfície dos mesmos. Sendo assim, a única parte da gravidade que estaria em ação nos corpos é a da superfície dos corpos, pois não haveria a conectividade do éter para utilizar toda a gravidade de um corpo. É como se houvesse um conjunto de baterias, mas somente as das pontas estivessem ligadas por fios. Portanto, é cabível pensar que no topo das montanhas, onde há menos superfície, haveria menos gravidade. Cotes pensa exatamente isso, mas acredita que a força de gravidade é grande o suficiente para que não seja sentida nenhuma diferença na sua intensidade no alto das montanhas.<sup>64</sup> Apesar dos escritos de Newton sobre o éter não estarem presente em suas obras principais, eles são, em alguns momentos, a base para seus livros e passam a ser a base para entender o funcionamento mais particular de sua mecânica.

Tendo descrito o orbe da Lua e como a gravidade atua nele, Cotes explicará como é possível atrelar a mesma explicação às órbitas dos planetas primários em relação ao Sol e aos secundários em relação aos planetas que orbitam.<sup>65</sup>

Dado que a força gravitacional da Terra sobre a Lua tem proporção inversa com os quadrados das distâncias a partir dos centros, *deveremos, é lógico, concluir que a natureza de todas é a mesma* (COTES in NEWTON, 2008, p. 25). Dado que as características dos movimentos não são particulares a cada um e que podemos por meio dessa investigação dos fenômenos descobrir suas características mais simples e dar por indução essas propriedades aos demais corpos, podemos então atribuir a força gravitacional a todos os corpos, e não a cada um características diferentes, mas todos com as mesmas características. Podemos dizer que a Lua gravita a Terra bem como a Terra gravita a Lua e, assim, também os planetas secundários gravitam os primários e vice-versa e por fim os planetas primários gravitam o Sol e vice-versa. O que Cotes expõe aqui é que ele está

---

<sup>64</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. Prefácio de Cotes a segunda edição p. 23.

<sup>65</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. Prefácio de Cotes a segunda edição p. 25.

inferindo características aos planetas por indução, se um deles se comporta de determinada maneira, não há porque duvidar de que todos repetirão tal comportamento.<sup>66</sup>

Como provas adicionais a força de gravidade, podemos dizer que os planetas secundários sofrem interferência do Sol e isso é evidente por conta das irregularidades dos movimentos da Lua, como está presente no terceiro livro dos *Principia*. E é evidente, pelo movimento dos cometas, que a força do Sol se propaga para todos os lados a longuíssimas distâncias.

(...) mostrado pelo movimento dos cometas que vindos de lugares imensamente distantes do Sol, aproximam-se bastante dele, às vezes tanto que seus periélios quase tocam seu corpo. A teoria destes corpos era completamente desconhecida para os astrônomos, até que, em nossa época, nosso admirável autor, com sucesso, descobriu-a e demonstrou sua verdade pelas observações mais seguras (COTES in NEWTON, 2008, p. 25).

Por essa demonstração, podemos dizer que os corpos gravitantes exercem suas forças a todas as distâncias. E de fato a gravidade dos corpos atinge qualquer distância, mas sempre em proporção inversa ao quadrado da distância.

Para justificar o caráter universal da lei da gravitação, Cotes primeiramente apresenta quais propriedades da gravidade teriam esse caráter universal, isto é, por quais propriedades da gravidade podemos dizer que ela é uma força universal: a quantidade de força da gravidade é proporcional à quantidade de matéria; e a ação da força é proporcional ao inverso do quadrado da distância. Para Cotes, a lei de gravitação precisa ser universal para que se chegue a alguma verdade com ela, pois, se algum corpo no universo divergir da lei de gravidade ou, pior ainda, divergir da lei da inércia, então teremos de analisar as propriedades desse objeto para sabermos se ele é apenas uma raridade, um milagre, ou se temos de fato de descobrir propriedades nos corpos particularmente. O pensamento de Cotes reflete o consenso de que para se produzir alguma ciência, sobre qualquer coisa, é

---

<sup>66</sup> Algo que devemos notar aqui é que talvez a indução para a descrição dos movimentos talvez só seja possível quando pensamos que estes movimentos são dados por *forças* e não por *ânimas*. Quando pensamos em movimentos dados por *ânimas*, aproximamos seu comportamento com o comportamento humano, isto é, pensamos que ele pode ser diverso, ainda que se mantenha um caráter de eternidade sobre o movimento, digo, por cada planeta ter uma *ânima* de movimento, eles podem ter comportamentos distintos entre eles, apesar de sempre apresentarem o mesmo comportamento. Porém quando pensamos que os movimentos são dados por *forças* nós retiramos esse caráter mais psicológico do movimento e o entendemos como puramente mecânico e, desta maneira, sem qualquer caráter humano ao movimento, podemos confiar que o movimento seguirá sempre princípios mecânicos e de força, possibilitando assim que utilizemos de coisas induzidas sobre o movimento, dado que sua natureza não se modificará de um caso para o outro.

necessário se assumir alguns pressupostos como universais sobre os fenômenos, para que seja possível criar um saber uniforme sobre eles, para que possamos, minimamente, saber descrevê-los e prever seus comportamentos.

Não considerando mais o peso como uma qualidade, podemos dizer por fim que todos os corpos possuem massa e conseqüentemente todos os corpos possuem gravidade, pois agora percebemos, mais claramente, que isso é uma qualidade, um atributo, da matéria. Assim como em todos os corpos observados, percebe-se que são extensos, moveis e impenetráveis e daí conclui-se, mesmo sobre os corpos que não temos nenhuma observação, que são todos extensos, moveis e impenetráveis. Da mesma forma, pode-se operar em relação à gravidade, ao observar determinados corpos e inferir que outros corpos também a possuem, garantindo isso como uma propriedade da matéria.

É possível perguntar sobre a causa da força de gravidade, isto é, por qual razão um corpo atrairia o outro, já que ela pertence a todos os corpos, tal como as suas extensões ou penetrabilidades. Newton de fato não dá a causa da força de gravidade, nem sabe como manipulá-la, como é possível fazer com as demais forças, como a magnética, por exemplo, apenas trata das propriedades matemáticas pelas quais ela opera. Chega a admitir isso em sua correspondência, de que não sabe qual é a natureza da força de gravidade<sup>67</sup>, mas o que o interessava no decorrer de seu livro era o modo pela qual ela opera. Por conta dessa falta de explicações acerca da causa da gravidade, Newton sofreu acusações de descrever a gravidade como se fosse uma propriedade oculta da matéria, tal como os aristotélicos faziam com outras características atribuídas à matéria.<sup>68</sup> Como defesa a essas acusações, Cotes diz que a gravidade, de fato, não é algo que pode ser descrito ou manipulado unicamente, mas suas manifestações podem ser observadas em todos os fenômenos e, por

---

<sup>67</sup> Nas cartas a Bentley c.1692-3 e na carta a Boyle de 1679.

<sup>68</sup> Percebemos que neste ponto, atribuindo a gravidade como propriedade da matéria sem se justificar uma razão para isso, se toma o mesmo teor que dizer, como se dizia, que “os corpos tendem naturalmente ao repouso”, do ponto de vista epistemológico. Reservadas as peculiaridades de cada afirmação, ambas, no limite, são afirmações que salvam os fenômenos, mas não são devidamente justificadas para que pensemos assim.

este, motivo podemos pensar com segurança de que ela é de fato um princípio da matéria, ainda que não possamos identificar a causa disso.<sup>69</sup>

A explicação que Cotes dá para justificar o uso da gravidade ainda que não se apresente causa para ela é dizer que toda causa última de qualquer coisa é uma causa sem explicação, pois se tivesse não seria a causa de tal coisa, e nem por isso banimos todas essas causas simples que explicam os fenômenos mais complexos. Se baníssemos todas as causas sem fundamento, abandonaríamos todas as causas da filosofia, segundo Cotes.

Há quem diga que a força da gravidade é sobrenatural<sup>70</sup>, um milagre perpétuo<sup>71</sup>. Mas ao dizerem isso acabam por negar a força da gravidade, já que a física não admite elementos sobrenaturais.<sup>72</sup> Mas Cotes admite que não adianta dar argumentações a esse tipo de opinião<sup>73</sup>, pois ou se negará que a gravidade existe, ou se dirá que ela é sobrenatural por não ocorrer em decorrência das outras propriedades da matéria, que não são produzidas por causas mecânicas.

---

<sup>69</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. Prefácio de Cotes a segunda edição p. 26.

<sup>70</sup> Esta é a parte do prefácio tocante a Leibniz.

<sup>71</sup> *Milagre perpétuo*, isto aqui é dito no sentido de que Deus atua sempre e diretamente sobre o movimento dos corpos para que se possa manter a força de gravidade ali permanente. Ou seja, a força de gravidade não seria algo natural, mas uma certa suspensão das leis universais que Deus mesmo criou para manter a gravidade dos corpos. Segundo Leibniz, a gravidade seria um milagre perpétuo, pois se colocamos um corpo para se mover em uma curva, ou em completa órbita em torno de um corpo, sua tendência é que ele escape pela tangente dessa curva, mas como isso não acontece nas órbitas planetárias, só pode ser mediante um milagre perpétuo, isto é, mediante a direta ação de Deus sobre os corpos em órbita.

<sup>72</sup> A intenção de Leibniz quando diz isso, de maneira mais clara na correspondência com Clarke, não é justificar que a gravidade seja de fato um milagre perpétuo, mas tentar ridicularizar a ideia de força de gravidade dizendo que se ela existe, ela só pode ser um milagre perpétuo. Isso é tomado como ridículo por ser absurda a ideia de que Deus manteria um milagre perpétuo em algo no mundo. No caso de Leibniz, a própria ideia de que Deus poderia fazer um milagre é algo absurdo.

<sup>73</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. Prefácio de Cotes a segunda edição p. 28.

### 1.2.5 – Há quem não goste dessa física celestial, porque contradiz as opiniões de Descartes.<sup>74</sup>

O tema da verdadeira filosofia é derivar as naturezas das coisas a partir das causas verdadeiramente existentes, e indagar depois pelas leis que o Grande Criador realmente escolheu para assentar as bases desta maravilhosa Estrutura do Mundo, e não por aquelas com as quais Ele teria feito o mesmo, se assim o deseja-se (COTES *in* NEWTON, 2008, p. 28).

Sua acusação sobre o método de Descartes é de que ele não investigava os fenômenos para deles extrair alguma propriedade, tal como faz Newton, mas investiga o mundo através de um raciocínio que o explora de maneira lógica, construindo um raciocínio próprio que visa uma maneira de salvar os fenômenos, caindo assim numa confusão de cogitar diversas causas possíveis para um mesmo fenômeno, justamente por se estar no campo da especulação. A explicação dos vórtices, por exemplo, é muito concisa do ponto de vista lógico, tanto que só se consegue inferir seus erros quando se têm dados observacionais, no caso, dos cometas.<sup>75</sup> Já Newton, como investiga de fato a natureza, através dos experimentos, e, a partir dessa investigação, passa a analisar suas propriedades para então aplicar aos demais fenômenos as características mais simples descobertas, descobre as causas reais dos fenômenos e não as fictícias como faz Descartes, segundo observa Cotes.

Os vórtices podem até explicar determinados fenômenos, mas não são a verdadeira causa do movimento celeste, pois isso não pode ser demonstrado, isto é, não há como pensar a existência dos vórtices. Já a gravidade, se for tomada como propriedade de todos os corpos, pode ser demonstrada por meio de diversos experimentos.

Se os cometas e os planetas fossem arrastados por vórtices, eles teriam velocidade regular por todo o seu percurso, o que não acontece. Como demonstrado por Kepler, os planetas possuem movimento acelerado quando estão mais próximos do Sol e movimento retardado quando estão mais longe do Sol. O movimento pelos vórtices também deveria

---

<sup>74</sup> COTES *in* NEWTON, 2008, p. 28.

<sup>75</sup> A teoria dos vórtices de Descartes visa explicar o movimento dos planetas como dados por redemoinhos em um modelo hidrostático. Dessa maneira, explica Cotes, se assim fosse, os cometas sofreriam desvios em seus trajetos e estariam hora mais rápidos e hora mais lentos por conta da passagem de vórtices mais fortes para mais fracos e vice-versa. Planetas maiores teriam de ser suportados por vórtices mais fortes e isso causaria distúrbio nas trajetórias dos cometas.

manter uma uniformidade no que diz respeito às apsides<sup>76</sup>, no entanto, essa uniformidade também é falsa. Em resumo, se os planetas fossem levados por vórtices, eles teriam uma descrição elíptica perfeita, sem irregularidades, o que não se demonstra nas observações.

Para salvar a teoria dos vórtices dos movimentos irregulares, poder-se-ia dizer que, na realidade, vários vórtices compõe um mesmo movimento. Porém, se pensarmos em vários vórtices, penetrando um no outro, perguntaríamos com razão como esses vórtices se mantiveram inalterados durante tanto tempo. *Toda causa deve ser mais simples que seu efeito* (COTES in NEWTON, 2008, p. 29). Imaginar diversos vórtices compondo um único movimento, para deixá-lo com uma aparência uniforme, é conceber uma causa muito mais complexa que seu efeito.<sup>77</sup>

Desde Aristóteles, concebemos que o funcionamento da natureza é simples, ou seja, todos os seus movimentos são absolutamente necessários e a natureza não faz nada sem finalidades determinadas ou de maneira que não lhe seja a mais efetiva. Sendo assim, uma teoria que descreve de maneira mais simples os fenômenos mais complexos é tida como mais próxima da verdade do que uma teoria mais complexa que explica as mesmas coisas, por se pensar que a natureza sempre atua da maneira mais simples. O que Cotes quer demonstrar com isso é que conceber o movimento dos planetas e dos cometas por meio da força gravitacional é, além de tudo, uma maneira mais simples de se descrever tais movimentos do que com o uso dos vórtices. Já que pelos vórtices precisaríamos de vários e um arranjo ardiloso para explicar todos os movimentos dos planetas e dos cometas, enquanto que explicando pela lei da força da gravidade, a força envolvida é apenas uma em um esquema simples de ser desenvolvido.

---

<sup>76</sup> As apsides deveriam estar sempre no mesmo lugar, em relação às constelações, e não em pontos diferentes como se apresenta.

<sup>77</sup> O peso do argumento da simplicidade da causa favorece a Newton e, por isso, Cotes o descreve. Pois é mais simples pensar que todos os movimentos orbitais podem ser dados por uma única força em questão do que pensar que eles são dados por uma complexa trama de vórtices. O argumento da simplicidade da causa é melhor aceito não só por uma questão prática, de facilidade na compreensão e, no caso de Newton, facilidade para os cálculos, bem como se aproxima da ideia de que a natureza, e Deus, possuem os princípios mais simples possíveis.

Cotes argumenta que pensar que os planetas e cometas são levados por vórtices, é como pensar que eles são levados em suas órbitas por atmosferas.<sup>78</sup> O que é absurdo, pois as atmosferas teriam de ter, no mínimo, a mesma densidade do planeta para suportá-los.

Construindo então um argumento final contra os vórtices, Cotes faz um pequeno resumo e, então, apresenta seu argumento<sup>79</sup>: os cometas são inúmeros, o que implicaria em inúmeros vórtices. Seus movimentos são regulares e seguem as mesmas leis dos planetas; as órbitas dos cometas são *seções cônicas*<sup>80</sup> muito excêntricas; suas órbitas transpassam as órbitas dos planetas. Por conta disso, os vórtices dos planetas são inconciliáveis com os vórtices dos cometas pelos seguintes motivos: para poder carregar um planeta, o vórtice tem de ter no mínimo a mesma densidade que o planeta para que ele pudesse se sustentar no vórtice. Quando juntamos dois líquidos de diferentes densidades em um mesmo vasilhame, o líquido de maior densidade se assenta no fundo do recipiente<sup>81</sup> e, por esse motivo, devemos pensar que no sistema solar os vórtices de maior densidade ficam mais próximos do centro e os de menor densidade na exterioridade.<sup>82</sup> Temos de imaginar que o fundo do vasilhame é como o centro da órbita. Pensando na velocidade desses vórtices, dado que a potência de velocidade dos planetas varia  $3/2$ , ou seja, que as forças centrífugas dos planetas variam com o inverso do quadrado da distância, os vórtices têm de manter a mesma proporção. Por conta dessas variações de densidade e de velocidade nos vórtices dos planetas, aconteceria a grande irregularidade nas órbitas dos cometas, que transpassam de maneira quase que perpendicular as órbitas dos planetas. No entanto, não é isso que

---

<sup>78</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. Prefácio de Cotes a segunda edição p. 29.

<sup>79</sup> *ibid.*

<sup>80</sup> Elipses.

<sup>81</sup> Imagine que pegamos um vasilhame com água e colocamos nele uma gota de mercúrio, que também é líquido e mais denso do que a água. Essa gota de mercúrio se assentará no fundo do recipiente e não irá dissolver-se na água. O mesmo com os vórtices, devemos pensar que o centro do sistema solar é como o fundo do vasilhame, os vórtices mais densos se concentram no centro tal como se concentrariam no fundo do vasilhame.

<sup>82</sup> Se na época de Newton fosse conhecido o tamanho dos planetas, a teoria dos vórtices seria falseada só com esses dois dados, pois os maiores planetas teriam que ficar necessariamente mais próximos do Sol, pois lá a densidade dos vórtices é maior, e os planetas menores ficariam mais distantes do Sol, pelo mesmo motivo.

ocorre, muito pelo contrário, observa-se uma órbita regular nos cometas e nenhum tipo de variação ao passarem pelas órbitas dos planetas.<sup>83</sup>

A continuação do argumento de Cotes serve para adiantar uma possível resposta à pergunta em relação ao argumento acima: e se os vórtices estiverem lá, mas não interferissem no movimento dos planetas? - Cotes diz que quando um corpo passa de um meio fluído para outro, este lhe *comunica movimento*, ou seja, o movimento sofre retardo ou aumento da velocidade ao passar de um meio para outro. E essa resistência é proporcional ao próprio fluído. A inércia do vórtice bem como de qualquer outra coisa não pode ser retirada da coisa, ou seja, necessariamente um fluído terá uma determinada resistência a qualquer corpo que o penetre. Dizer que o vórtice não oferece modificações ao movimento dos cometas, é dizer que ele não possui inércia, por não ter força existente e, se assim for, essa teoria não é capaz de explicar a natureza das coisas.

Aqueles que concebem os céus preenchidos com uma matéria fluída, mas a supõem destituída de qualquer inércia, negam o vácuo em palavras, mas o admitem de fato. Pois uma vez que uma matéria fluída desta espécie não pode ser diferenciada de forma alguma do espaço vazio, a disputa é agora sobre nomes e não sobre a natureza das coisas (COTES *in* NEWTON, 2008, p. 32).

Tendo esses problemas em vista, assumiram os cartesianos, sobre a regularidade dos cometas, que os vórtices se comportam da maneira como o são ou pela vontade de Deus ou por uma necessidade da natureza. Se os vórtices existem e atuam dessa maneira por uma necessidade da natureza, devemos pensar que essa matéria é infinita, eterna e imóvel, pois do contrário ela assumiria dois movimentos em direções contrárias e, ou, em velocidades diferentes, o que é absurdo. A diversidade do movimento só pode ser algo advindo da manifestação do livre-arbítrio de Deus.

Aquele que for suficientemente presunçoso para pensar que pode encontrar os verdadeiros princípios da física e as leis das coisas naturais apenas pela força de sua própria mente e pela luz interna de sua razão, deve supor ou que o mundo existe por necessidade e, pela mesma necessidade, segue as leis propostas; ou se a ordem da natureza foi estabelecida pela vontade de Deus, que ele, um miserável réptil, possa dizer o que era mais adequado de ter sido feito (COTES *in* NEWTON, 2008, p. 33).

---

<sup>83</sup> O termo utilizado por Cotes para a órbita terrestre era *orbis magnus* [a grande órbita], e era dado esse nome por conta da importância do astrônomo conhecer essa órbita por conta dela ser a responsável pela explicação dos movimentos aparentes do sol e dos demais planetas. O termo foi utilizado pela primeira vez com Copérnico e depois por Rheticus, Kepler e vários outros, também usado por Newton para a descrição da órbita terrestre.

Estas últimas partes escritas por Cotes fazem um ataque, por fim, ao próprio método cartesiano de investigação do mundo. Primeiro ele tratou de atacar o sistema de vórtices descrito por Descartes, apresentando suas falhas e como a mecânica newtoniana não caía no mesmo tipo de erro. Por fim há um ataque ao modo de investigação de Descartes para mostrar uma superioridade do modo newtoniano de investigação. A concentração do argumento está em dizer que a simples investigação do mundo segundo alguns princípios e a mercê da orientação da própria razão não é suficiente para se trazer teorias verdadeiras sobre os fenômenos, mas completando isso, é necessária uma investigação pela experiência dos princípios para que se possa demonstrar a verdade contida neles.

## **Capítulo 2 – Os *Principia* e sua importância matemática no modelo newtoniano.**

### **2.1 – Introdução. – Revolução científica e o interesse pelo método.**

Para entendermos o método de Newton, tal como ele é exposto nos *Principia*, como um método matemático, é importante apresentar inicialmente as definições e leis gerais contidas nesta obra. Isto é necessário, pois a estrutura das demonstrações newtoniana segue a maneira tradicional da axiomática euclidiana nos *Elementos*, comum no século XVII. Isto é, Newton, primeiramente, apresenta as definições e axiomas, a respeito das propriedades das forças e, em seguida, desenvolve as proposições, a extração de propriedades do movimento aplicadas aos casos, a partir dessas definições. Tal como se procede à maneira matemática de descrição de propriedade. A proposta de Newton, sobre tudo, assim como desde o título já nos indica, é dar os *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, ou seja, expor os princípios matemáticos para a física.

Desta maneira, a proposta do livro pode ser dada da seguinte maneira: primeiramente precisamos aceitar as oito definições dadas por Newton, pois elas são responsáveis por introduzir os conceitos que serão utilizados no livro. Estes conceitos são aqueles mais básicos que compõem toda a física a seguir apresentada. Também temos de aceitar os axiomas, ou leis, do movimento, mas agora de maneira justificada: se aceitarmos as oito definições, podemos entender com mais clareza o desenvolvimento das três leis do movimento. Essa base dada por Newton que precisamos aceitar pode ser resumida nas noções de *massa*, *densidade*, e *inércia* e com isso ele presume que o leitor já tenha minimamente clara a noção de força de aceleração. Para nós, hoje, é-nos comum pensar no movimento e da matéria segundo estes termos, porém, na época de Newton, era necessária uma certa aceitação, em alguns casos até uma conversão, para que se pense na matéria e no movimento segundo esses princípios.

Já por essas características, podemos notar que os *Principia* se constituem em uma obra majoritariamente matemática, de axiomas a proposições, sem espaço para a experimentação na sua elaboração, tal como podemos averiguar melhor na conclusão. Neste caso, a experimentação entra como uma comprovação da teoria e não como parte da sua elaboração.

Perceba que em nossa lista inicial de axiomas a serem aceitos não está a ideia de gravidade. Fora todo o problema de aceitação na lei da gravitação universal, para o estudo do movimento em geral a descrição dessa lei não é relevante neste momento. A lei da gravidade é necessária para se explicar o movimento das órbitas, mas para os movimentos em geral não. A lei de gravidade é a descrição de uma força, não diferente de todas as demais forças que podemos descrever por este modelo, ela se apresenta como uma conclusão no terceiro livro dos *Principia*, substituindo os termos como *força centrípeta* ou *força centrífuga* utilizados no percurso do livro.

Uma vez aceitos esses princípios Newton passa para a descrição das Leis do Movimento que são a forma segundo a qual podemos fazer uma base para a descrição do movimento segundo as definições sobre os termos que pensamos. E as leis do movimento podem ser resumidas em leis que garantem, sobre tudo, o princípio de inércia. A primeira lei, por exemplo, versa que *todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, a menos que seja forçado a mudar aquele estado por forças aplicadas sobre ele*. Aqui temos tanto a noção de inércia, que é o que garante que o movimento continue, como também a noção de força, que já era comumente aceita pela comunidade científica da época. A segunda lei ajuda a definir que o movimento é sempre dado por uma força e que essa força é sempre vetorial, isto é, possui sempre uma, e apenas uma, direção. Por fim, a terceira lei, diz que há em toda ação uma reação em igual proporção. Essa lei nos ajuda a entender, por exemplo, porque um trem anda sobre os trilhos, dada que a ação das rodas, em tentar empurrar os trilhos para trás causa a reação do trem ser empurrado para a frente, bem como outras mecânicas da balística, como outro exemplo.

Depois de dadas as definições e as três leis, apresentam-se as proposições que podem ser retiradas dessas leis e definições. Isto é, as proposições é o campo de aplicação das leis e também o exercício de reconhecer os princípios dados nas leis e definições sobre os fenômenos, fazendo a indução destes princípios para os fenômenos que se deseja estudar. Tal como nos *Elementos* as proposições são as inferências que fazemos a partir dos axiomas.

### **2.1.1 Um aspecto importante da Revolução Científica foi o intenso interesse pelo método.<sup>84</sup>**

Podemos observar este interesse pelo método mais nos precursores da Revolução Científica do que originalmente em Copérnico. No *Mysterium Cosmographicum*, por exemplo, Kepler dedica a introdução do livro para narrar suas tentativas frustradas em encontrar a harmonia do Sistema Solar, o que o levou a pensar essa harmonia pelos *Sólidos Platônicos*<sup>85</sup>. A questão do método, para os filósofos naturais da época da Revolução Científica, passa a ser algo que dá validade às descobertas feitas. Para Descartes, por exemplo, o método se torna a peça chave para a descoberta da verdade. Na tradição medieval, antes do período de revolução, havia método, mas este não era discutido sobre sua capacidade de resolver problemas; a concentração dos esforços da ciência da época estava a descrição característica dos fenômenos e elementos segundo uma base aristotélica.

A passagem da tradição Aristotélica para a filosofia mecanicista foi, sobre tudo, uma mudança radical no método e na importância que ele passa a adquirir por conta dos filósofos naturais da Revolução Científica pensarem que há um método universal para se descobrir as verdades da natureza. E que, descobrindo esse método, nós automaticamente saberíamos, a seu tempo, sobre as coisas no mundo; ao invés de uma busca pela verdade, passa-se a ter uma busca pelo método para a verdade. Podemos dizer que enquanto houve o período aristotélico, houve certeza sobre o método, ou que ele não era nem ao mínimo questionado. O ponto era o de que se tinha segurança do conhecimento conseguido. Essa segurança é de fato quebrada quando Copérnico consegue desenvolver um argumento convincente para a mobilidade da Terra. O que os levou, conseqüentemente, a ter dúvidas sobre o método vigente.

Partindo-se de uma concepção mecanicista, a existência deste “método universal” passa a ser evidente por conta da noção de que todas as coisas estão envolvidas em um

---

<sup>84</sup> COHEN, 2010, p.145.

<sup>85</sup> Segundo esta primeira e jovem obra de Kepler, as razões das distâncias entre as órbitas poderiam ser explicadas pela razão de que Deus as teria disposto as órbitas utilizando como razão os círculos que podemos descrever dentro e fora de cada um dos Sólidos Platônicos. Isto é, imagine que tomemos um cubo e traçamos um círculo fora dele, tangenciando as quatro arestas do cubo. Agora traçamos um segundo círculo dentro do cubo que tangencia as quatro faces internas do cubo. Quando removemos o cubo temos dois círculos de tamanhos distintos. E dessa forma, segundo Kepler, poderíamos descrever as seis órbitas segundo os cinco Sólidos Platônicos, a saber: Saturno – Cubo – Júpiter – Tetraedro – Marte – Icosaedro – Terra – Dodecaedro – Vênus – Octaedro – Mercúrio.

processo. E esta noção é necessária para que se livre do pensamento de que existem vontades por trás dos fenômenos. É como imaginarmos que estamos olhando para uma peça de máquina se movendo, ela não se move sozinha, logo há todo um maquinário por detrás daquela peça que observamos e, se esse maquinário funciona tal como vemos esta peça funcionar, logo poderemos elaborar um método para descobrirmos como funciona toda essa máquina. Neste raciocínio, vemos não só a base do pensamento mecanicista como também a necessidade do pensamento indutivo para a elaboração conclusiva deste método. A questão passa a ser como chegar a este método: se pela racionalidade estrita ou se pela empiria. Na concepção cartesiana, o método universal se baseava numa transmissão de verdade muito semelhante a transmissão de verdade que ocorre na matemática, digo, pensar em propriedades básicas e, a partir delas, fazer as deduções mais imediatas e assim seguidamente: o mundo dá suas propriedades e constrói-se por elas, com a mesma concretude e certeza que as propriedades matemáticas. O que de certa maneira não podemos dizer que está totalmente errado, mas, para Descartes, a simples investigação lógico-racional dos problemas nos levaria às suas propriedades, o que não podemos dizer que seja verdade. Na descrição que Newton faz do seu processo investigativo, a base para o conhecimento é empírica, e a matemática lhe serve como ferramenta para encontrar a uniformidade dos fenômenos e fazer suas previsões. Sobre o uso da matemática, a diferença entre um e outro é que, para Descartes, o modelo de conhecimento matemático é o modelo de conhecimento do mundo, enquanto que, para Newton, a matemática é uma linguagem para o mundo, ela não reflete suas verdades, mas suas propriedades podem ser traduzidas por ela.<sup>86</sup>

Cohen, na sua análise dos filósofos naturais, faz uma distinção entre *filósofos* e *cientistas praticantes*. E chama de *filósofos* Descartes e Bacon e de *cientistas praticantes* Galileu, Harvey, Hooke, Huygens, Leibniz (tomado apenas pelo viés científico), Boyle e Newton. A distinção básica entre os dois grupos é que no grupo dos *filósofos* há uma teorização da ciência sem sua devida prática por parte deles, enquanto que o segundo grupo, dos *cientistas praticantes*, não há uma teorização da ciência tão forte quanto o dos *filósofos*, mas há uma forte prática científica por parte deles. Ambos, *filósofos* e *cientistas praticantes*, tinham a pretensão de chegar à verdade sobre os fenômenos, mas os *cientistas* é que possuem

---

<sup>86</sup> Esta é uma distinção que Newton faz do seu próprio método, o que não quer dizer necessariamente que se proceda desta maneira.

um método mais ligado a um exercício da ciência, a uma ciência que responde a questões práticas, enquanto que aqueles que Cohen chama de *filósofos* tinham a preocupação de responder questões sobre as propriedades do conhecimento científico.

De fato Newton não investigou filosoficamente nas suas obras principais sobre a possibilidade do conhecimento, ou um método verdadeiro para o conhecimento ou como Deus se encaixa no governo do mundo, tal como Descartes procurou fazer, por exemplo. Newton não se preocupa com essas questões nem com as que seriam mais próximas do seu método, como todas as questões do conhecimento que passam pela matemática, se a matemática é de fato um conhecimento que reflete as propriedades do mundo ou não. As *Regras para o Raciocínio em Filosofia* escritos por Newton são muito mais sucintas do que as escritas por Descartes, o texto possui apenas duas páginas e serve mais como uma introdução leve para o terceiro livro dos *Principia* do que de fato uma discussão filosófica sobre as Regras de Raciocínio.

Na tradição aristotélica, o mundo podia ser tomado como descoberto, digo, as explicações para os fenômenos estavam nos livros aristotélicos (ou na tradição seguida dele) e não se percebia nada de novo para se confrontar a esse conhecimento. Na verdade, os peripatéticos tinham como dever principal passar a diante os ensinamentos dos antigos como uma espécie de cânone. Cabe lembrar que a própria astronomia ptolomaica foi passada de geração em geração por mais de quinze séculos sem modificações. Além dos argumentos de Copérnico, duas evidências empíricas ajudaram a confrontar a tradição aristotélica: graças a Tycho Brahe e as suas observações da estrela nova de 1572 e do cometa de 1577, pode-se então questionar com evidências os ensinamentos de Aristóteles, ao menos na área cosmológica.

Derrubando, paulatinamente, a tradição aristotélica também se derrubam os métodos presentes nessa tradição e, assim, surge a necessidade de um estudo sobre qual seria o verdadeiro método. Há uma polifonia e transições de método durante a Revolução Científica, que dura até se ter formulado o que chamamos de método newtoniano. Desta maneira, nos filósofos naturais do período de Revolução, há um interesse geral sobre o método, por ele não estar mais definido como estava antes.

O método passa a carregar um caráter mais investigativo do mundo desde Copérnico. O grande momento de Copérnico foi ter descoberto um argumento para a mobilidade da Terra. Outros haviam pensado antes nessa mobilidade, como o grego Aristarco de Samos, mas Copérnico foi o primeiro a descobrir um argumento para a mobilidade da Terra. A consequência mais importante da obra de Copérnico foi abrir a possibilidade de investigação dos movimentos dos astros levando agora muito mais em conta as observações do que quaisquer outros valores cosmológicos. O argumento que Copérnico usa para atribuir movimento a Terra é calcado justamente no ponto de que percebemos os movimentos dos astros da perspectiva da Terra e que por ela estar em movimento percebemos estes movimentos aparente dos planetas no céu. Dado isso, levar em consideração uma mecânica celeste passa a ter uma correspondência maior com a verdade das órbitas do que com preceitos cosmológicos. Se antes nós dizíamos que os movimentos do cosmo tinham de ser circulares por conta do mundo supralunar ser perfeito e o movimento circular ser perfeito, agora, antes de mais nada, há uma preocupação na investigação e na apresentação de provas empíricas das propriedades estudadas nas órbitas, sobre tudo. Kepler mantém essa característica ao dar mais e melhores argumentos ao copernicanismo no *Mysterium Cosmographicum* e ao desenvolver suas três leis com base nos dados orbitais de Marte anotados por Brahe.

### **2.1.2 - Hypothesis non fingo.**

Começa a existir um interesse especial no método de Newton por conta do volume e do impacto de suas descobertas. Seu método parecia funcionar extraordinariamente por conta de seus resultados, comparados por experimentos. Newton dedica uma parte em suas duas principais obras, Principia e Óptica, para falar sobre o método. Mas como nos adverte Burt (BURTT, 2003, p. 168), suas descrições sobre seu próprio método são vagas, de maneira que suas teorias dizem muito mais sobre seus métodos do que suas próprias descrições. Newton não é considerado um filósofo a tal medida como Descartes, mas seus métodos, ainda que não estivessem claros, conseguiu teorias muito mais aceitáveis, praticamente, do que as de Descartes.

O contexto científico no qual se encontra Newton é o contexto cartesiano. Uma das fortes características desta postura metodológica é a aceitação de hipóteses como explicações científicas, isto é, aceitava-se como explicação científica uma ideia que partisse de pontos

simples e que seu resultado final fosse condizente com aquilo que é observado na experiência, sem se preocupar se a hipótese gerada corroborava ou não com o que de fato acontecia no mundo. A preocupação principal na elaboração da hipótese era tornar inteligível o fenômeno tomado, colocá-lo em algum tipo de esquema que permitisse a explicação, ou algum entendimento sobre ele. A obra cartesiana que apresenta essa postura metodológica e dá os argumentos para sustenta-la é o *Principia Philosophiae* (Princípios de Filosofia) (1644) em que na terceira parte, "Sobre o mundo visível", Descartes faz a descrição de como estariam dispostos a Terra, planetas, cometas, Sol e estrelas fixas.<sup>87</sup> Ele constrói sua teoria dos Vórtices a partir da ideia de que todo o espaço está preenchido por corpúsculos infinitamente pequenos (compondo o fluído de seu modelo hidrostático), que girariam em torno das estrelas causando os vórtices que carregariam os planetas e os cometas nas suas órbitas. Sobre este seu modelo do sistema solar, Descartes comenta ao final *Ainda que julguemos essas hipóteses como sendo falsas, acreditarei que terei feito o bastante se tudo aquilo que for deduzido delas estiver de acordo com as experiências: pois assim percebemos nelas tanta utilidade para a vida quanto na reflexão da própria verdade.* (BARRA cit. DESCARTES, 1995, p. 226). Podemos resumir o raciocínio de Descartes para esta conclusão da seguinte maneira: no artigo 46 da terceira parte dos *Princípios de Filosofia*, Descartes argumenta que a maneira pela qual Deus dispôs os movimentos e magnitudes do mundo são diversas de um conjunto imenso de opções. Sendo assim, tudo que nos cabe é pensar em teorias que se adequam com as experiências que temos dos fenômenos, pois descobrir suas verdadeiras propriedades se torna impossível dada as múltiplas formas pelas quais Ele dispôs (ou poderia dispor) o mundo.

Por aquilo que foi afirmado antes, está assegurado que todos os corpos do mundo são constituídos de uma única e mesma matéria, divisível em toda sorte de partes, que se encontra agora dividida em muitas partes que são movidas diversamente e têm um movimento de algum modo circular, e que sempre a mesma quantidade de movimento é conservada no universo. Mas, quais as magnitudes das partes dessa matéria, qual a velocidade em que são movidas e quais os círculos que descrevem, não podemos determinar apenas pela razão: porque essas coisas poderão ser combinadas de diferentes modos por Deus, e qual desses modos ele escolheu deve ser ensinado pela experiência. E por isso nós somos livres para supor seja o que for a respeito daquelas coisas, contanto que aquilo que se segue do que nós supomos esteja de acordo com a experiência. (BARRA cit. DESCARTES, 1995, 227)

---

<sup>87</sup> Segundo Descartes, nós podemos dividir o conhecimento científico, numa primeira divisão, entre aquilo que podemos conhecer de fato pela razão, onde estaria a matemática, e um sentido tipo de conhecimento que dependeria da experiência para se firmar, que é onde estaria o conhecimento físico. Por depender da experiência, a ciência física não teria o mesmo grau de exatidão que a matemática e por isso uma postura mais instrumentalizada poderia ser aceita.

O procedimento cartesiano pode ser resumido em se partir das afirmações sobre a Substância do mundo, que está atrelada a extensão e vontade de Deus, e que por conta da incapacidade do intelecto humano em conceber a criação, nós estamos impossibilitados de conhecer a verdadeira disposição dos movimentos no mundo. Sendo assim, tudo o que nos cabe fazer é assumir hipóteses que não partam de absurdos e que corroborem com a experiência de maneira que salvem os fenômenos.

Já Newton se posiciona metodologicamente diferente da postura cartesiana ao pensar em suas teorias. Newton faz justamente a inversão daquilo que seria possível conhecer, isto é, ele mantém uma postura cética quanto ao conhecimento da Substância, mas favorável ao que se pode conhecer sobre as propriedades da matéria. Para acentuar isso, Barra faz uma citação de um rascunho do Escólio Geral do terceiro livro dos *Principia*:

A partir dos fenômenos, conhecemos as propriedades das coisas e, a partir das propriedades, concluímos que as coisas existem e as chamamos de substâncias; mas não temos quaisquer ideias das substâncias. Vemos apenas as figuras e as cores dos corpos, ouvimos apenas os sons, tocamos apenas as superfícies externas, cheiramos os odores e degustamos os sabores: as substâncias ou as essências mesmas não conhecemos através de nenhum sentido nem de nenhuma ação reflexiva e, por isso, não temos mais ideia delas do que um cego tem das cores. E, quando se diz que temos uma ideia de Deus ou uma ideia de corpo, nada deve ser entendido exceto que temos uma ideia das propriedades ou atributos de Deus ou uma ideia das propriedades pelas quais os corpos se distinguem de Deus ou uns dos outros. Por isso que em nenhum lugar discutimos sobre as ideias das substâncias abstraídas das propriedades, nem deduzimos nenhuma conclusão a partir delas. (BARRA cit. Hall e Hall, 1995, p. 228)

Newton nos deixa claro que temos senso da Substância justamente por podermos ter contato com os seus atributos, isso nos permite falar sobre os atributos, mas de maneira alguma sobre a Substância. Bem como nosso conhecimento de Deus se limita a distingui-lo dos objetos e não que conheçamos algo para além dos seus atributos. Não sendo possível esse conhecimento a priori da Substância, ela em nada ajuda a conhecer os fenômenos físicos.

Segundo o que o professor Barra aponta, Descartes ainda afirma que a vontade imutável de Deus constitui uma base segura para o conhecimento das leis do movimento. Afirmação a qual Newton também é opositor. Para Newton, dado que a criação não é uma necessidade para Deus, Ele poderia dispor o mundo segundo uma infinidade de outras leis do que a atual, ou ainda, dispor outras partes do universo com leis diferentes nas quais nos encontramos. Para Newton o que permite pensar em leis universais da natureza, mas que não lhe é garantia alguma, é a crença de que a natureza *costuma ser simples e consoante consigo mesma*. (Descrição da Regra III das Regras para o Raciocínio em Filosofia do terceiro livro dos *Principia*)

De maneira então que agora nos fica um pouco mais claro que sentido Newton quis dar a sua frase "hypotheses non fingo" colocada no Escólio Geral do terceiro livro dos Principia:

Até aqui expliquei os fenômenos dos céus e dos mares através da força da gravidade, mas ainda não atribuí uma causa à gravidade. Em todo caso, essa força origina-se de alguma causa que penetra até o centro do Sol e dos planetas, sem diminuição de poder, e que age (...) segundo a quantidade de matéria *sólida*, e cuja ação se estende por todos os lados a imensas distâncias, decrescendo sempre na razão duplicada das distâncias. (...) Porém ainda não pude deduzir a razão dessas propriedades da gravidade a partir dos fenômenos e não invento hipóteses. Pois tudo aquilo que não é deduzido a partir dos fenômenos deve ser chamado de *hipótese*, e hipóteses, quer metafísicas, quer físicas, quer de qualidades ocultas, quer mecânicas, não têm lugar na *filosofia experimental*. Nessa filosofia, as proposições são deduzidas a partir dos fenômenos, tornadas gerais pela indução. Assim a impenetrabilidade, a mobilidade e a força impulsiva dos corpos e as leis dos movimentos e da gravidade tornaram-se conhecidas. E é suficiente que a gravidade realmente exista, atue segundo as leis por nós expostas e seja capaz de sustentar todos os movimentos dos corpos celestes e do nosso mar. (NEWTON, 2010, p. 119)

O que Newton quis se referir com essa sua frase é que seu método científico não é o método hipotético cartesiano, ou seja, suas explicações científicas não são apenas para dar alguma inteligibilidade ao mundo físico, mas são de fato empreitadas para se encontrar as verdadeiras leis do movimento. Essa distinção da postura de Descartes para com a de Newton não é meramente semântica, mas é de fato uma distinção metodológica. De um lado Descartes possui uma postura instrumentalista com a ciência, que ele vê como inevitável; e de outro Newton pensa que de fato podemos conhecer a verdade sobre os movimentos do mundo se seguirmos aquilo que foi predito no seu método.

Entender a forma pela qual Newton pensava ser o método da ciência e como esse método era diferente do modelo cartesiano vigente é de fundamental importância para entendermos os críticos da obra newtoniana de sua própria época. O método cartesiano era muito bem difundido entre os acadêmicos do século XVII e XVIII e a não aceitação do princípio de gravitação universal, que foi o principal desacordo entre Newton e seus contemporâneos, se deu justamente por Newton não o tê-lo assumido como hipótese, mas como de fato uma propriedade da matéria. Porém sem demonstrar uma razão para que a força de gravidade existisse, este princípio, que foi o principal resultado de Newton na mecânica, passava-se muito mais por uma qualidade oculta da matéria, o que nos remete a mesma crítica feita aos aristotélicos, do que de fato como algo que se pudesse assumir com segurança.

O professor Barra em nota (BARRA, 1995, p. 232) expõe um comentário feito por Huygens em uma carta a Leibniz em 8 de novembro de 1690: “Não estou de modo algum

satisfeito com aquilo que o Sr. Newton oferece como sendo Causa das Marés, nem com todas as teorias que ele construiu a partir do seu Princípio de atração, que me parece absurdo.”

No que diz respeito a gravidade, poderíamos pensar que, justamente por ela se apresentar sem uma causa que a justifique na matéria, que ela poderia ser uma hipótese que fundamenta o movimento, tal como quando Descartes pensava que o universo estava totalmente preenchido por corpúsculos infinitamente pequenos. Em uma carta a Bentley de 25 de fevereiro de 1692/3 Newton confessa ao seu interlocutor o seguinte:

É inconcebível que a matéria bruta inanimada devesse (sem a mediação de alguma outra coisa que não fosse material) operar sobre e afetar outra matéria sem contato mútuo; como se a gravitação, no sentido de Epicuro, lhe fosse essencial e inerente. E esta é uma das razões por que eu desejo que você não atribua gravidade inata a mim. Que a gravidade devesse ser inata, inerente e essencial à matéria, de modo que um corpo possa agir sobre outro a distância através de um vácuo, sem a mediação de qualquer outra coisa pela ou através da qual suas ações ou forças possam ser transmitidas de um para o outro, é para mim um absurdo tão grande que acredito que nenhum homem com uma faculdade competente para pensar as questões filosóficas possa jamais incorrer. A gravidade deve ser causada por um agente que atua constantemente de acordo com certas leis, mas se esse agente é material ou imaterial é uma questão que tenho deixado à consideração de meus leitores. (CAJORI cit. NEWTON, 2008, p. 307)

Dada essa confissão de Newton, poderíamos pensar que assumir a gravidade seria sido uma hipótese para que se encaixasse na sua mecânica. A primeira resenha publicada na França sobre os *Principia* apareceu em 8 de agosto de 1688 e provavelmente foi escrita por Pierre-Sylvain Régis (BARRA, 1995, p. 230). Nela o comentarista tenta mostrar que a obra de Newton é na verdade apenas uma bela mecânica, mas não a verdade Física sobre o mundo.<sup>88</sup> Os dois principais argumentos do comentador são: 1) no começo dos *Principia*, Newton escreve que está apresentando sua mecânica segundo propriedades geométricas. Até este ponto Newton também concordaria. 2) No terceiro livro o comentador diz que quando Newton vai tratar do fluxo e refluxo do mar, ele assume que *os planetas pesam reciprocamente uns sobre os outros* (BARRA, 1995, p. 230) e como isso não foi demonstrado, isso é uma suposição arbitrária que só faz sentido se trabalhado somente dentro de uma mecânica, mas não se trata dos movimentos verdadeiros.<sup>89</sup>

---

<sup>88</sup> Neste caso o termo “mecânica” está com um sentido próximo de “hipótese”. Digo, uma cinemática que serve para descrever os fenômenos, tal como dizemos “cinemática Ptolomaica”.

<sup>89</sup> Na teoria cartesiana os fluxos e refluxos do mar eram explicados por uma pressão sucessiva que começava dos vórtices, que pressionava a atmosfera do planeta e por fim pressionava a água do mar e por isso o mar avança mais de dia e recua a noite. Na teoria newtoniana este mesmo fenômeno é explicado segundo a gravidade do Sol e da Lua que exerce força sobre a água. O Sol, tal como a Lua em menor escala, atrai o enorme volume de água constantemente, fazendo assim com que a água avance mais sobre a terra quando de dia e recue durante a noite.

Dada a carta de Newton a Bentley e esta crítica de Régis, poderíamos pensar que de fato Newton assumiu o princípio de gravidade, e consequentemente, a ação delas sobre o fluxo e o refluxo do mar, apenas como uma hipótese que se encaixa muito bem sobre os fenômenos estudados, mas que isso não indica em momento algum a verdade sobre esses movimentos. Entretanto temos de nos atentar que os critérios pelos quais Newton pensou que a força de gravidade era absurda são diferentes dos critérios utilizados pelos seus críticos cartesianos. Os cartesianos tinham como requerimento para se aceitar uma hipótese não se assumir ideias absurdas. Sendo assim, os cartesianos não aceitavam o princípio de gravitação por ele não parecer inteligível, e ele não era inteligível por não ser explicado segundo princípios cartesianos da matéria. Já Newton,

na medida em que não considera seu princípio de gravitação universal como sendo uma “hipótese” para a qual se esperaria deduzir consequências empiricamente verificadas como único meio de corroborá-la, Newton não está obrigado a seguir a metodologia que sustenta a avaliação apriorística da inteligibilidade e da probabilidade dos princípios admitidos na construção da teoria. (BARRA, 1995, p. 233)

Esta conclusão do professor Barra está, como ele descreve, implícito na quarta Regra de Raciocínio em Filosofia, a saber:

Na filosofia experimental, as proposições obtidas a partir dos fenômenos por indução, não obstante as hipóteses contrárias, devem ser tidas como verdadeiras, ou exata ou muito aproximadamente, até que ocorram outros fenômenos, pelos quais tornem-se ou mais exatas ou sujeitas a exceções. (NEWTON, 2010, p. 12)

Desta maneira podemos concluir que a crítica de Huygens, Leibniz e os cartesianos ao princípio de gravitação de Newton vem muito mais por um viés metafísico do que por qualquer outro tipo de contra argumentação. Esses pontos metafísicos contra Newton, não apenas a gravitação, mas também a ideia de espaço e tempo absolutos, não foram resolvidos por Newton de maneira decisiva até o final da sua vida, nem pelos newtonianos após ele. Esses problemas foram paulatinamente deixados de lado por conta da força do argumento matemático, preditivo e explicativo que a teoria possuía. – A teoria newtoniana funciona, é capaz de explicações sem postulados ad-hoc e é, também, capaz de previsões. Essa funcionalidade de modo geral é o que fez a força da teoria maior do que a força das críticas metafísicas.

---

Pela mesma razão podemos explicar porque para nós, do lado leste do Atlântico, o mar é mais agitado e avança mais a terra no final da tarde do que de manhã.

## 2.2 – Principia.

Para que possamos ter uma noção de como funciona o método de Newton, resolvi expor as definições e leis gerais que Newton descreve nos *Principia* para que possamos analisar por uma aplicação, como seu método opera. Como foi dito, Newton pretende fazer uma apresentação das teorias de seu livro da mesma maneira que Euclides fez as demonstrações em *Os Elementos*. Isto é, primeiramente ele apresenta os axiomas a respeito das forças e de suas propriedades e, depois, ele faz o desenvolvimento a partir dessas definições.

Em toda a composição dos *Principia*, Newton se utilizará de definições e propriedades estritamente matemáticas para descrever as propriedades físicas das coisas. Enquanto que Aristóteles, por exemplo, começa sua descrição cosmológica no livro *Do Céu* descrevendo e justificando porque no mundo sublunar haviam apenas dois movimentos contrários e porquê esses dois movimentos eram imperfeitos, para depois explicar que o movimento perfeito é o movimento circular e é o movimento do mundo supralunar, Newton não tratará em nenhum ponto do seu livro sobre qualidades de movimento ou se um movimento é mais nobre do que o outro, mas apresentará meios matemáticos para se tratar da quantidade de matéria e do movimento que essa matéria pode assumir.

A principal ideia a ser apresentada nesta dissertação é a de que os *Principia* e o *Óptica* possuem, separadamente, dois traços fundamentais do método Newtoniano: matemática e experimento. O ponto central do argumento [é procurar demonstrar que o *Principia* é um livro elaborado por uma fundamentação matemática, onde a experiência participa apenas como corroboração à teoria. Já a *Óptica* parte das experiências para dar provas e explicações sobre os fenômenos com a luz. Dito isso, procurarei apresentar os *Principia* segundo sua estrutura matemática, com notas e explicações sobre como reconhecemos estes elementos em casos de fato.

Faremos a leitura das oito definições apresentadas e comentaremos sobre o que Newton quis definir em cada uma delas, bem como a interpretação contemporânea que temos de cada definição e lei.

### 2.2.1 – Definições.

Definição I: A quantidade de matéria é a medida da mesma, obtida conjuntamente a partir de sua densidade e volume.<sup>90</sup>

O que se quer dizer com essa definição é que, dado o volume (V) e a densidade (d)<sup>91</sup> de um objeto, pode-se, então, calcular sua massa (m) mediante a fórmula  $m = d.V$ . Aqui pode-se observar que as propriedades matemáticas aplicam-se a esta fórmula, ou seja, assim como  $m = d.V$ ;  $d = \frac{m}{v}$  - densidade é uma proporção entre massa e volume; e  $V = \frac{d}{m}$  - volume é uma proporção entre densidade e massa. Newton deixa explícito no livro que não é sua intenção saber o local de atuação nos corpos dessas forças, ou propriedades, na matéria, mas apenas fornecer os princípios matemáticos sobre os quais elas operam e, por isso, seu livro é dado à maneira dos geômetras, que partilham das mesmas propriedades ao designar uma fórmula para um dado objeto. Além disso, percebemos desde já que além de uma distinção entre o que seja *peso* e o que seja *massa*, o conceito de massa perde qualquer relação com o de peso. Dado que o primeiro é resultado de uma relação entre a densidade e o volume e o segundo uma relação entre a massa e a aceleração da gravidade. Tratando ambas matematicamente, podemos estabelecer em que medida um influencia o outro, mas de maneira alguma confundimos seus significados, ou pensamos que o peso é uma qualidade oculta da matéria.

Segundo comentário de Cajori, Mach<sup>92</sup>, em seu livro *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*<sup>93</sup>, diz que a definição  $m=d.V$  de Newton é insuficiente, por conta dela necessitar da própria definição de densidade, que é dada em relação à massa ( $d = \frac{m}{v}$ ). Por isso, segundo Mach, forma-se um círculo vicioso em que os termos massa e volume dependem um da definição do outro (MACH, 1921, p. 188). Crew<sup>94</sup>, em seu livro *The Rise of Modern*

---

<sup>90</sup> NEWTON, 2008, p. 39

<sup>91</sup> O *volume* é a quantidade de uma substância que pode ser dada em *Litros*, por exemplo. A densidade é a concentração da substância sobre o volume. Um litro de água possui menos densidade que um litro de chumbo, logo, um litro de chumbo pesa mais que um litro de água, pois sua concentração é maior.

<sup>92</sup> Ernst Mach (1838 - 1916), físico e filósofo austríaco.

<sup>93</sup> A mecânica em seu desenvolvimento.

<sup>94</sup> Henry Crew (1859 – 1953).

*Physics*<sup>95</sup>, defende Newton dizendo que, na época de Newton, *densidade* era sinônimo de *gravidade específica*. A *gravidade específica* opõe-se à *gravidade absoluta*, que é o valor base para a determinação da densidade. Esse valor base é o de  $1\text{g/cm}^3$ , que é dado como a densidade da água e, a partir desse valor, as densidades das demais coisas são calculadas. Sendo assim, a *densidade absoluta* é a densidade da água e a *densidade relativa* (ou *gravidade relativa*) é a densidade dos demais objetos. Crew Completa o comentário dizendo que as três unidades utilizadas para a medição dos objetos empregadas na época eram a densidade, o comprimento (abrangendo o comprimento propriamente dito, largura e profundidade) e o tempo. E sendo a densidade uma unidade fundamental da matéria, era perfeitamente possível definir a quantidade de massa através da densidade (CREW, 1928, p.24).

O uso do conceito de *massa* como diferente do conceito de *peso*<sup>96</sup>, Crew encontra a sua origem em uma discussão de Newton com Huygens, em 1673, sobre a força centrípeta. Huygens diz que, quando dois corpos se movem com velocidades iguais ao longo de círculos iguais, as forças centrípetas estarão uma para a outra de acordo com suas *quantidades sólidas* (massa)<sup>97</sup>. Ou seja, *peso*<sup>98</sup> seria uma função dada em relação a massa e a velocidade<sup>99</sup>. No caso do exemplo dado por Huygens, seria dado em relação à massa com a tensão do movimento circular (CAJORI *in* NEWTON, 2008, p. 311).

---

<sup>95</sup> A ascensão da física moderna.

<sup>96</sup> Para entendermos o conceito de massa como diferente do de peso, podemos pensar em alguns exemplos: a começar pela própria gravidade: se estamos em um lugar de maior gravidade, teremos maior peso, mas não que nossa massa tenha se modificado em sua quantidade, mas sim a força exercida sobre ela é que foi aumentada. Um soco, por exemplo, ou qualquer outro tipo de pancada, tem sua força medida ou em Kgf ou em N (Newtons) onde a força do soco é equiparada com um peso caindo sobre o objeto socado, um soco de 15Kgf é como se, por um instante, 15Kg caísse sobre o objeto batido.

<sup>97</sup> H. CREW - The rise of the Modern Physics, Baltimore, 1928. p. 24)

<sup>98</sup> Nossa concepção moderna de peso é que peso é uma força vetorial que aponta para o centro do corpo responsável pela atração gravitacional. Sendo assim, ele é expresso pela segunda lei de Newton,  $F = m.g$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade que é de aproximadamente  $9,82\text{ m/s}^2$ .

<sup>99</sup> Claro que não é diretamente em relação à velocidade, mas sim em relação a aceleração da gravidade sobre a massa dos corpos. Mas esse exemplo ajudou Huygens e Newton a fazer distinção entre o peso e a massa pensando na velocidade dos pesos. Pois quando um peso está em movimento, seu peso é maior (choque) do que o de um corpo que está em repouso, mas não é a massa do objeto que muda, mas sim a sua velocidade (força) que se soma a massa e dá seu “peso”. – É como pular sobre uma balança, você não está aumentando de peso, mas aplicando mais velocidade (força) sobre a balança.

Na explicação de sua primeira definição, Newton descreve que, se o ar tiver o dobro de espaço ocupado ( $d.V$ ) ele terá, então, o quádruplo da quantidade; num espaço ocupado triplicado ele terá o sêxtuplo da quantidade. O que Newton quer dizer é que, se o ar estiver na condição  $2d$  e  $2V$ , então ele terá  $4m$ . Isto é, dado que  $m=d.V$  e a densidade está dobrada ( $\times 2$ ) e o volume dobrado ( $\times 2$ ), então teremos  $2d$  e  $2V$  como sendo igual a 4 *unidades de massa*. O mesmo para o segundo caso, onde  $3d$  e  $3V$  será igual a 6 *unidades de massa*.

Definição II: A quantidade de movimento<sup>100</sup> é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria.<sup>101</sup>

Inicialmente, para entender o que quer dizer “quantidade de movimento”, pode-se imaginar dois casos onde ela torna-se evidente. O primeiro quando movimentamos uma bola em direção a uma outra bola em uma mesa de bilhar: a primeira bola transmitirá uma certa “quantidade de movimento” para a segunda bola, a transmissão fará que a segunda bola movimente-se. Imagine agora que temos duas bolas de mesmo tamanho, mas uma é feita de aço e a outra é feita de vidro oco. Ainda que o tamanho das duas bolas seja o mesmo, o peso e volume de cada uma não é o mesmo, fazendo com que a bola de aço seja mais pesada do que a bola de vidro.<sup>102</sup> Se atirmos a bola de vidro na bola de aço, a bola de aço avançará um pouco e a bola de vidro terá grande recuo. Mas, se atirmos, com a mesma velocidade, a bola de aço na bola de vidro, a bola de vidro avançará adiante e a bola de aço continuará um pouco de seu movimento, isto é, não sofrerá recuo. Isto acontece por conta das massas de cada uma das bolas serem diferentes e por conta de que quanto maior a massa, mais “quantidade de movimento” ela conserva. Isto é, maior é o seu momento linear.

Um outro exemplo, imagine um carro a uma determinada velocidade e um muro a sua frente. Quando o carro choca-se com muro, seu movimento termina. Mas imagine agora que

---

<sup>100</sup> Segundo a décima segunda nota do tradutor, podemos entender quantidade de movimento por momento.

<sup>101</sup> NEWTON, 2008, p. 40.

<sup>102</sup> Por este motivo medimos o volume das coisas em litros, e por esta definição se mostra porque um litro de chumbo é mais pesado do que um litro de vidro. Mas é um erro pensar que há diferença no peso dos corpos: um quilo de chumbo pesa a mesma quantidade que um quilo de vidro. A diferença é que no caso do peso se considera somente a sua massa e a aceleração da gravidade, mas a própria massa na verdade é constituída de densidade e volume e o volume é próprio de cada elemento. Quando o volume é igual, podemos, então, saber a distinção dos pesos e quando os pesos são iguais podemos fazer a distinção dos volumes.

esse mesmo carro está tão rápido que, ao se chocar com o muro, ele ainda continua a se movimentar, mesmo com pouca velocidade. Pode-se perceber desses dois casos duas situações: a primeira, na qual a velocidade não é suficiente para atravessar o muro e, segunda, na qual a velocidade é suficiente para atravessar o muro. Explica-se, assim, que a velocidade, junto com a massa, é uma variável a ser considerada no cálculo da *quantidade de movimento*<sup>103</sup>.

Tomando a *quantidade de movimento* por *momento*, temos, primeiro, que descobrir qual a definição de momento propriamente dita. Segundo Newton, *momento* (Q) é dado em função da *massa* (m) e da *velocidade* (v),  $Q = m.v$ . Com essa noção, é possível conceber o *momento* da seguinte maneira: imagine um carro correndo a 100km/h numa estrada reta; imagine na mesma estrada um ônibus correndo a 90km/h. A princípio, se perguntarmos qual o veículo mais rápido, diríamos que o carro é mais rápido pois ele está 10km/h mais rápido do que o ônibus. Porém, o ônibus é muitíssimo mais pesado do que o carro; assim, a quantidade de energia para mover o ônibus a 90km/h é muitíssimo maior do que para mover o carro a 100km/h, logo o *momento linear* do ônibus é maior que o *momento linear* do carro. Supondo que nosso carro pese 100kg e o ônibus 1000Kg, então o momento do carro seria  $Q=10.000\text{kg.m/s}^2$  e o do ônibus  $Q=900.000\text{kg.m/s}^2$ .<sup>104</sup>

Não se pode confundir a noção de *momento* com a noção de *força* ou de *energia*, apesar de estarem de certa maneira relacionadas. A força é medida em  $\text{Kg.s}^2$ , a energia é medida em Joules (J) e o momento é dado por  $\text{Kg.m/s}^2$ , ou seja, uma determinada massa (Kg) percorrendo uma distância (m) com sua relação em segundos ( $/\text{s}^2$ ), que é uma anotação que nos mostra que é uma relação de aceleração.

---

<sup>103</sup> A *quantidade de movimento* (momento) é uma grandeza física vetorial, isto é, para ser caracterizada precisa de intensidade, direção e sentido; e é um sistema onde há conservação de energia, ou seja, onde a força do agente é distribuída de maneira proporcional entre todas as partes envolvidas no sistema.

<sup>104</sup> O que nos faz pensar que um ônibus se chocando contra um muro será muito mais violento do que um carro, ainda que a velocidade de ambos seja igual.

Definição III: A *vis insista*, ou força inata da matéria, é um poder de resistir, através do qual todo corpo, no que depende dele, mantém seu estado presente, seja ele de repouso ou de movimento uniforme em linha reta.<sup>105</sup>

Newton completa dizendo que *vis insista* ou *vis inertiae* é a mesma coisa, e nos dá as seguintes propriedades dessa força:

- É diretamente proporcional ao tamanho do corpo;
- A força inercial só se manifesta quando uma outra força é impressa no corpo em questão, seja para o repouso ou para o impulso; e
- A força inercial pode ser tanto de resistência quanto de impulso.<sup>106</sup>

Essa definição de Newton é muito importante para a formação da noção moderna de movimento. Quando ainda se pensava na descrição aristotélica dos movimentos, os movimentos sublunares eram entendidos como movimentos imperfeitos, pois Aristóteles diz que no mundo sublunar existem apenas dois tipos de movimento, para cima e para baixo, e eles são opostos entre si e, por causa disso, existe a corrupção do movimento no mundo (ARISTOTELES, 269a10-15). Em contraposição ao movimento sublunar, imperfeito, há o movimento supralunar que é perfeito por não possuir o seu contrário. Aristóteles atribui o movimento circular aos astros e diz ainda que o contrário deste movimento não existe ainda que pensemos num movimento circular contrário ao que existe, pois não deixa de ser movimento circular. Além do mais, o movimento circular é eterno por definição, enquanto que o movimento sublunar é imperfeito por definição, pois, explica Aristóteles, para que tenhamos um movimento reto ele necessariamente tem já de ter terminado, enquanto que o movimento circular é eterno. Sobre os movimentos sublunares, ainda podemos dividi-los em dois grupos: ou o movimento é natural, gerado por uma *ânima* (vontade/inteligência), ou o movimento é *violento*, dado por uma força externa. O tipo de movimento classificado como

---

<sup>105</sup> NEWTON, 2008, p.40.

<sup>106</sup> Podemos pensar que a força inercial nada mais é do que a perpetuação a última força imprimida ao corpo. Se a última força impressa o colocou em movimento, a propriedade da inercia o manterá em movimento. Se a última força impressa o deixou em repouso, então essa mesma inercia o manterá em repouso. Isso nos serve para duas coisas: primeiro para que não se pense que existe uma naturalidade no movimento ou no repouso dos corpos; e, sendo assim, os corpos possuem resistência no movimento e no repouso e isso deve ser levado em consideração.

*natural* é, por exemplo, o crescimento de uma planta, ou de uma pessoa, o movimento do vento etc., e o movimento violento é aquele gerado, basicamente, pelos seres vivos, como atirar alguma coisa ou qualquer outro tipo de movimento produzido por um corpo em choque com outro. O fundamental é que movimento para Aristóteles, justamente pela sua divisão entre mundo sublunar e supralunar, envolve a noção *ânima*, para o movimento celeste. Essa noção indica uma espécie de *inteligência* que faz os astros se movimentarem. A *ânima*, noção mantida até o jovem Kepler, seria o espírito/vontade que Deus dotou os astros para que eles fizessem seus movimentos circulares em torno da Terra, no caso. Para que fique mais claro, podemos trazer uma citação de Fédon.

Todo corpo cujo movimento é imprimido de fora é inanimado, todo corpo que se move por si mesmo, a partir de dentro, é animado; e essa é, precisamente, a natureza da alma. (Platão, *Fédon*, 245 d)

Sendo assim, temos de pensar que os planetas e o Sol têm seus movimentos de dentro para fora, isto é, nada os colocou em movimento, mas eles são animados, isto é, possuem alma e é esta a responsável pelo seu movimento em volta da Terra, no caso.

Pensar em força inercial é pensar em um substituto mecânico para a *ânima*, isto é, o movimento não pode ser concebido como dado por uma inteligência, mas é realizado conforme princípios mecânicos. Kepler, na segunda edição do *Mysterium Cosmographicum* (1621), orienta o leitor de que, apesar de ter usado o termo *ânima* na primeira edição de seu livro, acredita ser melhor utilizar o termo *vis* (força) por entender agora que os planetas não se movem em suas órbitas não segundo uma vontade, mas segundo uma ordem mecânica de composição de forças, ainda que essas forças não fossem ainda claras.

A força inercial é um dos axiomas, e não uma das proposições do livro, justamente por possuir o caráter de ser pressuposto sobre qualquer corpo em qualquer condição, e não apenas em condições específicas; por ter o caráter de não ser algo experimental, isto é, não se pode colocar a força inercial à prova, ela é algo que se tem de aceitar para a teoria; e não é uma força derivada de outra noção, mas ela mesmo é a noção a ser apreendida. A inércia é pressuposta em todos os corpos do universo. Contudo, não se pode averiguar a existência da força inercial<sup>107</sup>; ela tem de ser o pressuposto do estudo sobre o movimento, do contrário

---

<sup>107</sup> Nós não podemos colocar a força inercial ao teste pela seguinte razão: teríamos de ter um experimento capaz de mostrar que ela de fato continua indeterminadamente quando um objeto está em movimento retilíneo

retomar-se-ia ao conceito de *ânima* de Aristóteles para explicar os movimentos. Desta forma, conceito de inércia tem um papel principal na descrição do movimento, pois é com a inércia que se explicam características dos fenômenos de maneira mecânica e permite o cálculo, e não segundo “vontades” que agem sobre os corpos.

Definição IV: Uma força imprimida é uma ação exercida sobre um corpo a fim de alterar seu estado, seja de repouso, seja de movimento uniforme em linha reta.<sup>108</sup>

Força é um conceito chave na mecânica newtoniana. Mas apesar disso, e além dos esforços de Newton de dar uma descrição matemática dos termos envolvidos, não existe uma definição matemática do conceito de *força*, tal como houve com o conceito de *massa* nas primeiras definições. O que há é com o este conceito deve ser interpretado dentro da mecânica e o que Newton explica nesta definição é que são forças as responsáveis tanto pelo impulso quanto pela resistência que os corpos sofrem.

Definição V: Uma força centrípeta é aquela pela qual os corpos são dirigidos ou impelidos, ou tendem, de qualquer maneira para um ponto ou centro.<sup>109</sup>

Sobre essa definição, segundo Abbagnano:

O segundo princípio da dinâmica newtoniana, ou seja, a proporcionalidade entre força e aceleração imprimida ( $F=ma$ ), faz da força uma relação entre duas grandezas, sem nenhuma referência às essências ou qualidades ocultas, cuja inutilidade para a física era declarada pelo próprio Newton: “Pretendo dar somente uma noção matemática das forças, sem considerar suas causas ou suas sedes físicas” (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, 1760, p. 5). A generalização newtoniana permitia falar de força da gravidade, força elétrica ou força magnética, de tal modo que, na segunda metade do século XVIII, o conceito de força tornou-se um dos mais populares e difundidos (Nicola Abbagnano, *Dicionário de filosofia*, p. 541).

Antes de nomear a força de gravidade por este nome, Newton procurou utilizar no decorrer do livro o termo força centrípeta, mas sempre descrevendo as propriedades que virão a ser da força de gravidade. Esta quinta definição é uma descrição nuclear da força de gravidade, ela apresenta que há uma força centrípeta que é capaz de dirigir, impelir ou tender

---

uniforme e outro para identificar, de maneira categórica, que ela permanece nos objetos indefinidamente quando estão parados. Porém, é impossível fazer um experimento que garanta isso, podemos assumir a lei da inércia apenas pela indução. Por esta razão, a força da inércia é muito mais conceitual do que de fato verificável.

<sup>108</sup> NEWTON, 2008, p. 41.

<sup>109</sup> Ibid.

os corpos a um ponto central, neste caso ao próprio corpo grave. Como descrição, Newton diz:

e aquela força, seja qual for, pela qual os planetas são continuamente desviados dos movimentos retilíneos. [...] uma pedra, girada numa funda, tente a escapar da mão que gira, e, por este esforço, distende a funda, e o faz com força maior à medida que é girada com velocidade maior, e assim que é liberada, voa para longe. À força que se opõe a este esforço, e pela qual a funda puxa continuamente a pedra de volta para a mão e a mantém em sua órbita, por ser dirigida para a mão como o centro da órbita chamo de força centrípeta.<sup>110</sup> (NEWTON, 2008, p.41).

Aqui Newton não apenas dá um exemplo do que seja a força centrípeta, mas também demonstra que ela pode ser também uma força de gravidade que mantém as órbitas planetárias e não qualquer outra força: se pensarmos como Kepler um dia pensou, que o que há é uma força que emana do Sol que empurra os planetas em suas órbitas, somos obrigados a pensar que há ou trilhos, entendidos como vias de éter, por onde os planetas são empurrados, ou que há outras forças atuando junto com essa força motriz provinda do Sol que mantêm os planetas em suas órbitas. Sem essas outras forças, os planetas seriam atirados das suas órbitas. Mas a força de gravidade tem propriedades o suficiente para garantir por si só o movimento orbital dos planetas e sua garantia para que não saiam de órbita. Pois a força de gravidade, por ser atrativa, é a única que pode representar, por exemplo, o elástico da funda que segura a pedra na mão do lançador (centro de órbita); da mesma forma a força de gravidade atua como um “elástico” que mantém a regularidade de distância do planeta para com o Sol.

E não distinguindo as causas para os mesmos fenômenos, Newton atribui tais propriedades para qualquer coisa em órbita, sejam os planetas, ou a Lua da Terra ou as Luas de Júpiter ou de Saturno. Pois a quantidade de força gravitacional está atrelada à quantidade de matéria presente no centro de órbita, o que produz o mesmo efeito com coisas menores para com os centros de órbitas menores. A razão pela qual os planetas orbitam o Sol não é diferente da razão pela qual os *planetas inferiores*<sup>111</sup> orbitam os *superiores*<sup>112</sup>.

---

<sup>110</sup> Pensemos nesse exemplo da seguinte maneira: imagine que amarramos um cordão em uma bolinha de aço e começamos a girá-lo em volta de nós. Nós somos o centro de órbita dessa bolinha, a nossa “força de gravidade” é representada pela força que colocamos quando tencionando o fio que, por sua vez, conduz a bolinha. O fio representa justamente o “inverso da força”, pois, nesse nosso exemplo, a força parte de nós e vai até a bolinha por meio do cordão, mas a força de gravidade atua de onde está a bolinha para o centro de gravidade. Neste caso, o fio é o que não permite que a bolinha escape da nossa força, ou seja, faz que a nossa força seja não só a que dá o impulso, mas também a que permite o desvio da linha reta que a bolinha percorreria se fosse arremessada.

<sup>111</sup> Satélites.

Admitindo que quanto maior a força, menos o objeto arremessado se desviará do curso retilíneo, Newton dá o seguinte exemplo:

Se uma bola de chumbo arremessada do topo de uma montanha pelo uso da pólvora, com uma dada velocidade em uma direção paralela ao horizonte, é levada a uma distância de duas milhas em uma linha curva, antes de cair ao chão; a mesma bola, se a resistência do ar fosse removida, lançada com o dobro ou o décuplo da velocidade, voaria duas ou dez vezes mais longe. Aumentando a velocidade, podemos aumentar arbitrariamente a distância à qual ela poderia ser arremessada, e diminuir a curvatura da linha que ela descreveria, até que finalmente ela cairia a uma distância de 10, 30 ou 90 graus, ou mesmo poderia dar a volta ao redor da Terra antes de cair; ou finalmente, poderia nunca mais cair na Terra, mas iria em frente, penetrando nos espaços celestes e continuaria com seu movimento *in infinitum*. (NEWTON, 2008, p. 41-2)

No final da explicação da definição, Newton classifica a força centrípeta em três tipos: *absoluta*, *acelerativa* e *motora*. E utiliza as três próximas definições para definir os três tipos.

Definição VI: A quantidade absoluta de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à eficácia da causa que propaga a partir do centro, através dos espaços ao seu redor.<sup>113</sup>

A *quantidade absoluta* de um corpo é a *carga* desse corpo, da mesma maneira como pensamos a *carga elétrica*. Por exemplo, Newton define *quantidade absoluta* de um ímã é o seu tamanho, que é o que determina a sua intensidade, juntamente com a quantidade de massa de um ímã, que é o que determina a sua força de gravidade. A força absoluta da gravidade é a sua força de atração.

Definição VII: A quantidade acelerativa de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à velocidade que ela gera em um dado tempo.<sup>114</sup>

A *quantidade acelerativa* (aceleração) é o que mede quanto de velocidade uma força pode dar a um objeto, dado um intervalo de tempo.

Definição VIII: A quantidade motora de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional ao movimento que ela gera em um dado tempo.<sup>115</sup>

---

<sup>112</sup> Planetas conhecidos.

<sup>113</sup> NEWTON, 2008, p. 43.

<sup>114</sup> Ibid.

<sup>115</sup> Ibid.

Segundo Cajori<sup>116</sup>, podemos entender *quantidade motora de uma força centrípeta* como *força motriz*. E, por sua vez, *força motriz*, é a força que dá o movimento ao corpo. Devemos entender essa situação como uma força é que impressa continuamente sobre um objeto, até que se dê seu limite de tempo.<sup>117</sup>

Dadas essas definições (VI, VII e VIII) Newton afirma que podemos chamá-las simplesmente de “força motora” (VIII), “acelerativa” (VII) e absoluta (VI) e fornece definições mais sucintas para elas da seguinte maneira: a força motora é dada em relação aos corpos que tendem para o centro; a força acelerativa é dada em relação aos lugares desses corpos<sup>118</sup>, de onde partem até onde chegam;<sup>119</sup> e força absoluta é em relação ao centro de força para o qual eles tendem.<sup>120</sup> Como ele escreve:

Atribuo a força motora ao corpo como um esforço e propensão do todo em direção a um centro, surgindo das propensões das diversas partes tomadas em conjunto; a força acelerativa ao lugar do corpo, como um certo poder difundido do centro para todos os lugares ao redor para mover os corpos que aí estiverem; a força absoluta ao centro, enquanto dotado de alguma causa sem a qual aquelas forças motoras não se propagam pelos espaços circundantes (NEWTON, 2008, p. 43).

Após apresentar essas definições, Newton deduz delas que o peso ( $p$ ) diminui em função da diminuição da gravidade. Isso se torna possível se pensarmos que a força de gravidade tem sua força motora, acelerativa e absoluta. A aceleração da força da gravidade é vetorial e aponta para o seu centro. Um corpo sob ação da gravidade está sob ação da

---

<sup>116</sup> *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, Tradução de RICCI, T. - CAJORI, F. Apêndice histórico e explicativo, nota 13 p. 312.

<sup>117</sup> Talvez este trecho fique confuso por se pensar que a força de gravidade também empurra os planetas em suas órbitas. Quiçá Newton de fato pensasse que a força de gravidade também servisse, de alguma forma, para empurrar os planetas em suas órbitas. Cabe lembrar que na época de Newton não se tinha a teoria da formação dos planetas que temos hoje, para entender que o que a gravidade faz na realidade é manter o movimento dos planetas dado em um momento inicial ao redor do Sol. Toda a época de Newton acreditava na criação do mundo, sem qualquer alternativa para isso.

<sup>118</sup> Isto fica mais claro ao lembrarmos que a derivada da velocidade é a aceleração, então quando se diz que “a força acelerativa é dada em relação aos lugares desses corpos”, temos que pensar que Newton está falando da função derivada da velocidade que é calculada em um ponto específico da função.

<sup>119</sup> Para entendermos essa definição, deve-se pensar que dois corpos iguais saíram ao mesmo tempo de um mesmo ponto e, ao final de um tempo demarcado, um foi mais longe do que o outro; assim, a única coisa que variou entre eles foi a aceleração.

<sup>120</sup> Na sua explicação à definição VIII, Newton dá um exemplo do peso: peso é uma força vetorial que é dada em relação à quantidade de massa e a aceleração da gravidade local. Sendo a força absoluta, o peso de um mesmo corpo só irá mudar se a aceleração da gravidade mudar, e essa ação da gravidade é contínua e perpétua sobre o corpo e, por isso, tomada como absoluta.

aceleração da gravidade  $e$ , sendo o peso ( $p$ ) definido por massa ( $m$ ) vezes a aceleração da gravidade ( $G$ ), então, ao aumentar ou diminuir a aceleração da gravidade - que por sua vez é definida segundo a quantidade e matéria do corpo central - o peso aumenta ou diminui.<sup>121</sup>

Assim é que próximo à superfície da Terra, onde a gravidade acelerativa ou a força que produz a gravidade em todos os corpos é a mesma, a gravidade motora ou o peso é igual ao corpo. Mas se subíssemos a regiões mais altas, onde a gravidade acelerativa é menor, o peso seria da mesma maneira diminuído e seria sempre o produto do corpo pela gravidade acelerativa (NEWTON, 2008, p. 44).

#### Escólio da proposição VIII.

Newton utiliza este escólio para dar distinções entre as noções de espaço e tempo relativos e absolutos. Este se tornará um ponto crítico de futuras discussões de Newton com Leibniz, pois no entendimento de Leibniz, na correspondência com Clarke, não existe o espaço absoluto. Já para Newton o espaço e tempo absolutos são uma necessidade para que existam o espaço e tempo relativos. Além deste ponto metafísico da discussão, compreender um espaço e tempo absolutos nos ajuda a entender melhor a composição de movimento que os fenômenos possam ter. Talvez fosse isso que estivesse em mente quando Newton afirmou que a indutibilidade de *movimentos absolutos* vem da percepção de movimentos aparentes. Se existe movimento aparente, ou relativo, então necessariamente deve existir um movimento retilíneo e absoluto, do qual o movimento aparente participa. Para Newton *movimento absoluto é a translação de um corpo de um lugar absoluto para outro e repouso absoluto é a permanência de um corpo na mesma parte do (...) espaço imóvel*. (NEWTON, 2008, p. 45)

A existência de repousos ou movimentos absolutos não pode ser reconhecida a partir de repousos ou movimentos relativos. Eles devem ser dados não de maneira indutiva, mas de maneira dedutiva, ou serem os axiomas do movimento no mundo, isto é, devem ser aquilo do qual é pressuposto para que exista movimento no mundo. Se tudo estivesse em um constante movimento, não seríamos capazes de definir lugares absolutos para as coisas. E se não definirmos lugares absolutos, não poderemos distinguir o movimento do repouso e nem ao menos definir a velocidade real das coisas.

---

<sup>121</sup> Sabemos hoje que o campo gravitacional atua de maneira igual para todos os lados e em todas as altitudes da Terra e que só há variação de gravitação com a variação de matéria ao centro, mas quando Newton concebeu a força de gravidade, ele acreditava que a força em exercício era algo que estava diretamente ligada à superfície da Terra, de maneira que quanto mais superfície, mais força, e quanto menos superfície, menos força. Desta maneira Newton pensava que no alto de uma montanha a gravidade seria ligeiramente menor do que no plano.

Newton admite que não existe uma maneira de trazer aos sentidos a existência de repousos ou espaços absolutos. Eles são pressupostos para que a mecânica newtoniana funcione; do contrário, o movimento seria *naturalmente corruptível* e caberia a Newton ou descrever essa corruptibilidade ou adotar a explicação de Aristóteles. Assumir o movimento como sendo sempre retilíneo e uniforme é uma forma de dizer que ele não tende a uma corruptibilidade natural, de que há sempre forças atuando sobre o movimento, ou seja, que não há nenhuma vontade que o leve para determinado ponto, mas sempre sob atuação de uma força.

Por conta das *peçoas comuns*<sup>122</sup> definirem o que é *tempo, espaço, lugar e movimento* de forma relativa aos sentidos, isto causa um certo desentendimento quanto ao que é tempo e espaço absolutos. Por conta disso, Newton define cada um dos termos fazendo as distinções entre aquilo que aparece para os nossos sentidos em relação aos termos absoluto e relativo, verdadeiro e aparente, matemático e comum.<sup>123</sup>

I - Tempo absoluto, verdadeiro e matemático Ele flui uniformemente, sem nenhuma relação com qualquer outra coisa e é também chamado de *duração*. O tempo comum, aparente e relativo é obtido através do movimento, do relógio, do Sol, do que se usar para medir. (NEWTON, 2008, p. 45)

II - Espaço absoluto. Não possui relação com qualquer coisa externa, ou seja, não é algo que aparece por conta dos objetos, mas existe por si mesmo e permanece sempre imóvel. O espaço relativo é dado em relação aos objetos ou em relação à Terra. (ibid.)

---

<sup>122</sup> Newton refere-se ao senso comum que todos utilizamos diariamente para o uso de termos como tempo, espaço, lugar e movimento.

<sup>123</sup> Nessas explicações do escólio, podemos identificar o que seriam elementos da metafísica da mecânica newtoniana, são os pressupostos dos quais Newton parte para desenvolver os traços de sua física. Essas definições de tempo, espaço e movimento absoluto servem não só para negar uma vontade natural das coisas, mas também para adequar os fenômenos físicos às propriedades matemáticas para que assim possam ser calculados com tal propriedade axiomática. Se se aceita as definições dadas (de I a VIII) e se aceita as definições de espaço, tempo e movimento absolutos, então todo o desenvolvimento a partir disso (as proposições) adquirem a mesma verdade que as dos axiomas e das proposições dos *Elementos* de Euclides; ou seja, partindo de que tais axiomas sejam verdadeiros, as proposições que se seguem deles também serão necessariamente verdadeiras.

III – Lugar. É uma parte do espaço que um corpo ocupa. Newton utiliza o termo *parte do espaço* e não *situação* ou *superfície* externa ao corpo, pois as superfícies são sempre desiguais e a situação é uma propriedade do lugar. (ibid.)

IV - Movimento absoluto. É a translação de um lugar absoluto, num espaço absoluto, para outro. Newton faz distinção entre o lugar relativo e o lugar absoluto utilizando como exemplo um navio: um objeto que se encontra em um navio tem como lugar relativo um lugar específico do navio e está em repouso relativo, por estar em repouso em relação ao navio, mas não em relação a Terra. O lugar absoluto desse objeto no navio não é nem o navio nem a própria Terra, mas seu lugar no espaço absoluto que independe de qualquer referência.<sup>124</sup> Em relação ao seu movimento, o que compõe o movimento verdadeiro desse objeto é a composição dos movimentos da Terra mais o movimento do navio e o movimento do próprio objeto. (NEWTON, 2008, p. 45-6)

Em astronomia, o tempo absoluto da duração dos dias é distinguido de seu tempo relativo. Pois os dias, compreendidos na sua composição dia e noite, são desiguais em suas proporções de claro e escuro, enquanto que o *dia absoluto* tem sempre a mesma quantidade de tempo todos os dias.<sup>125</sup> O fluxo do tempo absoluto é inalterável, apesar de não termos um método perfeitamente rigoroso para medi-lo. *Todas as coisas são colocadas no tempo de acordo com uma ordem de sucessão; e no espaço, de acordo com uma ordem de situação.* (NEWTON, 2008, p. 48)

Como não somos capazes de perceber o espaço absoluto, reconhecemos mediante objetos perceptíveis, e através deles percebemos e calculamos o movimento. A utilização desses lugares e movimentos relativos não gera problema algum para os cálculos, mas, contrapõe Newton, ao fazer investigações filosóficas, devemos nos livrar de tudo o que é aparente e ficar apenas com as coisas em si mesmas. Por conta de não percebermos o repouso

---

<sup>124</sup> Mas, para efeito de cálculos, estando o navio e o objeto dentro dele no mesmo lugar (ainda que relativo), na Terra, poderíamos assumir que a Terra é seu lugar verdadeiro, já que todos os movimentos da Terra são também os movimentos desses dois objetos, então eles seriam irrelevantes para o cálculo.

<sup>125</sup> Sacrobosco (Johannes de Sacrobosco 1195 - 1256) no seu livro Tratado da Esfera (SACROBOSCO, 2006), já havia apresentado uma distinção entre *dias artificiais* e *dias naturais*. Os artificiais são os que se apresentam pela composição do claro e escuro, hora os dias são mais claros, hora mais escuros. E o *dia natural* é a duração exata e total do dia, o dia astronômico.

absoluto, não somos capazes de reconhecer o movimento absoluto. As coisas em repouso relativo carregam o movimento do todo e, por isso, não percebemos o repouso absoluto. Se o lugar é movido, tudo o que está nele é movido com ele. O movimento relativo não sofre modificações por conta do movimento verdadeiro do todo. Se a Terra de repente começasse a girar mais rapidamente, ou mais lentamente, o movimento relativo dos corpos postos na Terra não seria afetado. Assim como um navio oscila sua velocidade, o movimento relativo entre as pessoas não é afetado.<sup>126</sup>

### 2.2.2 – Axiomas ou leis do movimento.

Lei I - Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.<sup>127</sup>

Essa lei, conhecida como *lei da inércia*, é exemplificada por Newton da seguinte maneira: projéteis lançados continuam seu percurso em movimento retilíneo uniforme, desde que não sofram retardo da resistência do ar ou da gravidade que o puxa para baixo. Um pião, por exemplo, que mantém movimentos circulares, cessa sua rotação por conta da resistência do ar, atrito com o solo e exercício da força da gravidade. Esse último exemplo serviria para explicar retardos que não são, principalmente, causados pela gravidade.

A principal justificativa para a exposição da lei da inércia, além de todo o seu pressuposto mecânico, é apresentar uma contraposição, ou ao menos uma melhor solução, para a ideia de *tendência ao repouso* de Aristóteles. Os exemplos servem para que Newton explique a inércia que é tão contrária aos sentidos. A experiência mostra que todo movimento *tende ao repouso*, como dizia Aristóteles, mas o que Newton está dizendo é justamente o contrário, isto é, que nenhum movimento tende naturalmente ao repouso, pelo contrário, todo movimento é perpétuo, e ele só cessa quando uma força atua sobre ele.

---

<sup>126</sup> Claro que do ponto de vista biológico tudo seria afetado na Terra se ela começasse a girar mais rápido ou mais lentamente. É claro que quando estamos dentro de um navio, sentimos quando sua velocidade muda. Mas o que Newton se refere é que desconsiderando possíveis solavancos no momento da alteração da velocidade, os movimentos relativos naquele lugar permanecerão os mesmos.

<sup>127</sup> NEWTON, 2008, p. 53.

O argumento de Aristóteles para definir que os corpos sublunares tendem ao repouso está calcado na própria corruptibilidade dos movimentos sublunares. E está associada a razão de que os movimentos sublunares são corrompidos por existir, em comunhão, na natureza os movimentos *para cima e para baixo*. Mas no pensamento mecanicista não existe a *ânima*, os movimentos eram tomados unicamente por suas forças; sendo assim, não é possível explicar a tendência ao repouso ou a continuidade do movimento por uma vontade da *ânima*, mas sim unicamente pelas forças envolvidas. Se tomarmos tão somente a força inicial de um objeto posto em movimento e desconsiderarmos todas as demais forças que possam atuar sobre ele, teremos um movimento perpétuo, pois nenhuma outra força interromperá a força inicial que colocou o objeto em movimento. Porém, considerando todas as forças em questão - de resistência do ar, gravidade e qualquer outra força que atue como um freio ou desviando o objeto -, então o objeto posto em movimento estará inevitavelmente parado.

Em contraposição à tradição peripatética, o que Newton quer dizer é que sempre há forças atuando sobre um mesmo corpo e são essas forças que cessam o movimento, e não uma vontade natural. E, como vimos, o início desse percurso é assumir que o movimento é perpétuo e retilíneo para, isto é, uma força vetorial, depois, assumir as forças que o perturbam. E isso se deve pelo seguinte motivo: se Newton tivesse escrito “há forças que sempre param os movimentos”, que é o que se quer dizer no limite, isso exigiria que ele descrevesse quais são essas forças e porquê elas cessam o movimento; no entanto, o que está escrito na lei isenta Newton de ter que descrever essas forças e, pelo contrário, pede para o leitor procurar quais são as forças que retardam o movimento, dados os seus casos. A primeira lei, tal como está formulada, possui um caráter universal muito maior do que se Newton tivesse escrito “forças exteriores retardam o movimento”, pois, se ele fosse descrever quais são as forças que retardam o movimento, ele poderia deixar de descrever algum caso, pois esses são inúmeros, e teria grandes problemas para descrever a força de gravidade como uma força que retarda e mantém o movimento.

Apesar da primeira lei ser um contrassenso do ponto de vista da experiência comum, ela permite que a razão investigue a natureza pelas causas de seus efeitos, sem que se pense que tudo opera segundo uma vontade. Esta primeira lei é a viabilização da mecânica, sem ela ainda haveriam “mistérios desnecessários” no movimento.

Lei II - A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.<sup>128</sup>

Esta lei versa que toda força é vetorial, ou seja, toda força tem uma única direção em linha reta de ação. Essa direção de ação só é visível na trajetória descrita pelo objeto. O objeto atingido sempre segue o vetor da força e o movimento gerado nunca é maior ou menor do que o da força que o impulsiona, mas tem mesma quantidade.

Um problema dessa lei poderia ser o de que máquinas, como um guindaste, por exemplo, faz que a força do homem que opera a máquina seja muitas vezes multiplicada, tornando esse operador capaz de carregar pesos muitíssimos maiores sem a mesma equivalência de força. Nesse caso, o movimento seria maior do que a força aplicada. Entretanto, o guindaste possui alavancas que conservam a força e a multiplicam para que se faça o movimento. Então, o caso do guindaste é que ele multiplica a força e não o movimento e, com a multiplicação da força, há movimento compatível com ela.

Lei III - A toda ação há sempre uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.<sup>129</sup>

De certa forma, essa lei é diretamente derivada da lei da inércia. Sem a lei das ações e reações, poder-se-ia cair no erro de que qualquer força pode mover qualquer peso, em maior ou menor velocidade. Mas, se pensarmos que quando puxamos um objeto este mesmo nos puxa em direção contrária, no caso em direção a ele, proporcionando, assim, a tensão entre aquilo que puxa e aquilo que é puxado, entenderemos que a cada peso é necessária uma força mínima para começar a mover o peso, isto é, retirá-lo da inércia. E, da mesma forma, esse mínimo de força deve ser mantido para que o objeto continue em movimento, considerando as resistências.

Um outro exemplo é o caso provindo de um jogo de sinuca: quando acertamos uma bola em uma outra ocorre um choque; a bola que recebe o choque não segue imediatamente

---

<sup>128</sup> NEWTON, 2008, p. 54.

<sup>129</sup> NEWTON, 2008, p. 54.

na mesma velocidade que a bola que lhe acertou, mas lhe oferece resistência ao movimento em reação ao choque.

É pela terceira lei que podemos entender a força elástica e também podemos explicar por que nem todo obstáculo reflete os projéteis, mas também podem ser quebrados por ele. Se colocarmos uma tábua de madeira como um obstáculo a uma bala de um revólver, a bala não será refletida pela madeira, ainda que a coloquemos em 45 ou 30°, mas a bala atravessará a madeira, justamente porque esta ofereceu resistência a uma coisa (a bala) que tinha muitíssima mais força do que ela podia segurar, mas, se colocássemos uma chapa de aço, a bala seria desviada de seu percurso, e não atravessaria a chapa.

É também mediante esta lei que podemos entender como um trem pode andar sobre os trilhos ou como nós mesmos andamos sobre o chão. A força que a locomotiva faz sobre os trilhos é uma força que tenta empurrar os trilhos para trás, entretanto, a força de reação dos trilhos é muito maior que a força da locomotiva, logo, ao invés do trem empurrar os trilhos para trás, e não sair do lugar, é o trem que é empurrado para frente e os trilhos permanecem no mesmo lugar. De mesma maneira, quando andamos sobre o solo, a força que fazemos é para empurrar o chão para trás de nós, porém como a força inercial do chão é muito maior do que a força que empregamos nele, somos nós que somos projetados para frente.

### **2.2.3 Corolários.**

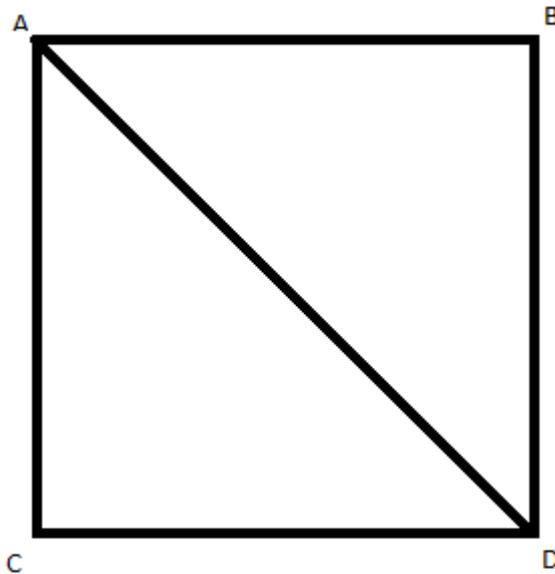
Corolário<sup>130</sup> I - Um corpo, submetido a duas forças simultaneamente, descreverá a diagonal de um paralelogramo no mesmo tempo em que ele descreveria os lados pela ação daquelas forças simultaneamente.<sup>131</sup>

---

<sup>130</sup> Um corolário é uma decorrência direta de um teorema. Newton aqui passa a fazer demonstrações a partir de suas definições e leis.

<sup>131</sup> NEWTON, 2008, p. 55.

Este primeiro corolário é um exemplo simples de composição de forças. Imagine que um corpo sai de um ponto A e segue em linha reta até um ponto B; temos aí a ação de uma única força. Imagine agora que A e B são na verdade pontos extremos de uma mesma parede, e o lugar se completa com os pontos C e D da parede paralela.



Se temos uma força que leva o corpo do ponto A ao ponto B e uma segunda força que leva o corpo em direção ao ponto C, temos um movimento diagonal de A para D, descrito por essas duas forças.

Ora, se olharmos a figura diremos que esse movimento diagonal na realidade é apenas um movimento retilíneo causado por uma única força. Para exemplificarmos melhor essa composição de duas forças, imaginemos o seguinte caso: posicionamos um canhão a  $45^\circ$  e damos um tiro. Ao observar o movimento, percebemos que a bala de canhão descreveu uma curva até o chão. Pois bem, se houvesse apenas a força inicial da bala de canhão, esta seguiria em linha reta *ad infinitum*, mas, pelo fato dela ter feito uma curva, podemos presumir uma segunda força, no caso, a própria força de gravidade. Até o momento, quando a bala de canhão vai para o alto, a força do movimento inicial é maior do que a força de gravidade, que é constante; quando ela começa a descrever sua curva, é o momento em que a força inicial começa a ser menor do que a força de gravidade; a força inicial da explosão no canhão estará na bala até o momento em que ela tocar o chão, do contrário, ao ser vencida pela gravidade, a bala cairia em linha reta no chão. Tudo o que a força de gravidade faz, nesse caso, é desviar o percurso da bala do alto para o chão. Se atirássemos uma bala de canhão alto o suficiente, veríamos com a sua queda que a bala chegaria um ponto no qual a força inicial do canhão

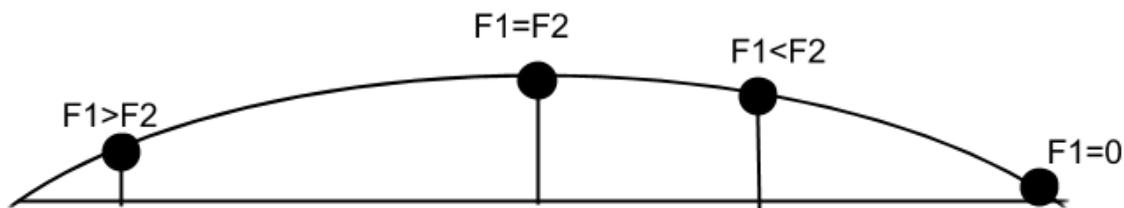
cessaria completamente e a bala não iria mais para frente, mas apenas para a direção do chão; nesse momento só haveria a força de gravidade.<sup>132</sup>

Corolário II - E assim é explicada a composição de qualquer força direta AD, a partir de quaisquer duas forças oblíquas AC e CD e, inversamente, a decomposição de qualquer força direta AD em duas forças oblíquas AC e CD, cuja composição e decomposição são abundantemente confirmadas pela mecânica.<sup>133</sup>

O corolário II é um complemento para o primeiro, nele Newton utiliza um exemplo de uma balança para demonstrar como podemos compor e decompor as forças de modo a equilibrar diferentes pesos.

A ideia é de que podemos decompor a força envolvida em um movimento diagonal, ou curvilíneo, em várias forças retilíneas. Dessa maneira, Newton preserva sua definição de que toda força é retilínea e não deixa de explicar os movimentos curvilíneos.

Poderíamos retomar como exemplo o caso da bolinha arremessada em um barbante. A bolinha descreve uma trajetória curvilínea e para isso há a composição direta de duas forças, a do braço que propulsiona através do barbante, e o próprio barbante que mantém tensão sobre a bola. Ou ainda pensar no exemplo da bola de canhão.<sup>134</sup>



---

<sup>132</sup> Para que qualquer projétil, ou foguete, possa sair de órbita, ele precisa atingir a velocidade de 11000km/h. Ao assumir essa velocidade, sua força seria grande o suficiente para vencer por completo a gravidade da Terra e chegar ao espaço.

<sup>133</sup> NEWTON, 2008, p. 55.

<sup>134</sup> Tome F1 como sendo a força de arremesso e F2 como a força de gravidade.

Corolário III - A quantidade de movimento, que é obtida tomando-se a soma dos movimentos dirigidos para as mesmas partes, e a diferença daqueles que são dirigidos a partes contrárias, não sofre mudança a partir da ação de corpos entre si.<sup>135</sup>

Essa propriedade é explicada por Newton utilizando duas esferas e suas proporções de reflexão. Conceba duas esferas, *A* e *B*, sendo *A* três vezes maior do que *B*; e que *A* esteja a uma velocidade igual a 2 e *B* a uma velocidade igual a 10. Assim, a proporção de movimento *A*:*B* é 6:10. *A* recebe o valor de seis por ser três vezes maior que *B* e estar a uma velocidade igual a 2. Sendo assim, se dividirmos os movimentos em partes, teremos que o movimento de *A* e *B* pode ser dividido em 16 partes, as seis partes de *A* e dez partes de *B*. Quando ocorre o choque entre as duas esferas, a proporção de movimento pode ser alterada para qualquer resultado em que sua soma dê 16, pois o tanto de movimento que uma perde é o tanto de movimento que a outra ganha. Dessa forma, as proporções de movimento podem ser:

0:16; 1:15; 2:14; 3:13; 4:12; 5:11; 6:10; 7:9; 8:8; 9:7; 10:6; 11:5; 12:4; 13:3; 14:2; 15:1; e 16:0.

Esse corolário deixar claro que no choque de corpos não existe movimento perdido, mas que o movimento é sempre transportado entre os corpos envolvidos. No caso de haver uma obstrução a um corpo, como, por exemplo, uma bola e uma parede, parte do movimento continua no movimento de retorno da bola e outra parte é absorvida pelo muro e o faz ou vibrar, ou gerar calor ou romper.

Corolário IV - O centro comum de gravidade de dois ou mais corpos não tem seu estado de movimento ou repouso alterado pelas ações dos corpos entre si e, portanto, o centro comum de gravidade de todos os corpos agindo uns sobre os outros (excluindo ações externas e impedimentos) ou está em repouso, ou se move em linha reta.<sup>136</sup>

Pela lei da gravitação universal poderíamos pensar que o centro de gravidade sofre alterações por conta dos corpos que o orbitam. Pensemos no caso do nosso sistema solar, onde o Sol é o centro de gravitação e a Terra um dos corpos que o gravitam. Quando Newton

---

<sup>135</sup> NEWTON, 2008, p. 57.

<sup>136</sup> NEWTON, 2008, p. 60.

diz que a Terra gravita (atrai) o Sol da mesma forma que o Sol gravita a Terra, essa relação é a que mantém, na realidade, a órbita da Terra, bem como a de qualquer outro planeta. Entretanto este centro de gravidade não é deslocado pela gravidade dos corpos que o orbitam. E por isso Newton diz que ou ele está imóvel ou está em movimento linear uniforme, pois em ambos os casos a força necessária para manter este movimento é zero.

Explicado isso, Newton deixa claro que o centro de gravidade, o Sol, não sofre alterações por conta dos planetas que o orbitam. E acrescenta que tal centro ou está em repouso ou está em movimento retilíneo. Esse acréscimo que Newton faz não é leviano, sua justificativa se segue no parágrafo explicativo ao corolário,

Pois se dois pontos prosseguem com um movimento uniforme em linhas retas, e a distância entre eles for dividida numa dada razão, o ponto divisor estará em repouso ou prosseguirá uniformemente em uma linha reta (...) e por uma argumentação semelhante, isso pode ser demonstrado quando os pontos não se movem no mesmo plano (NEWTON, 2008, p. 59).

Corolário V - O movimento de corpos encerrados em um dado espaço são os mesmos entre si, esteja esse espaço em repouso, ou se movendo uniformemente em uma linha reta sem qualquer movimento circular.<sup>137</sup>

O exemplo para esse corolário é simples, podemos exemplificar *encerrados em um dado espaço* como qualquer lugar determinado, e como o corolário diz que pode estar em repouso ou se movendo em linha reta, podemos imaginar esse lugar como sendo o interior de um navio. Os movimentos dentro do navio são os mesmos com o navio em movimento ou com ele em repouso: imagine dois marinheiros caminhando dentro do navio, sua caminhada será a mesma, em relação a elas, com o navio em movimento ou em repouso. Isso se deve, como dito anteriormente, dos movimentos do lugar dos corpos em questão serem irrelevantes para o cálculo entre eles. Seria como pensar que a velocidade da Terra interfere na velocidade de um carro.<sup>138</sup>

---

<sup>137</sup> NEWTON, 2008, p. 61.

<sup>138</sup> Newton está se referindo a cálculos de movimento onde todos os elementos envolvidos estão em um lugar em movimento. Neste caso, podemos desconsiderar este movimento que é comum a eles. Mas caso quiséssemos tomar um referencial de fora deste ponto comum e calcular seus movimentos, então levaríamos em consideração este movimento também. – É como se quiséssemos calcular a velocidade de uma caminhada dentro de um trem, com o referencial no vagão e depois calcular a velocidade do caminhante com o referencial na Terra.

Corolário VI - Se corpos movidos de qualquer maneira entre si são impelidos na direção de linhas paralelas por forças acelerativas iguais, eles continuarão todos a mover-se entre si da mesma maneira, como se não tivessem sido impelidos por aquelas forças.<sup>139</sup>

Esse corolário é um complemento do anterior, mas, para o entendermos melhor, imagine que há um punhado de bolinhas movimentando-se sobre uma plataforma; imagine agora que essa plataforma começa a subir, os movimentos das bolinhas entre si continuarão os mesmos como se nada tivesse acontecido.

Isto também serve para dar a noção do que se deve e do que não se deve considerar em nossos cálculos. Por vezes a associação do mundo com a forma mecânica de um relógio leva a pensar que devemos levar em consideração todas as variáveis de um dado movimento, mas Newton está nos demonstrando com o quinto e sexto corolário que há determinadas características dos movimentos que não precisamos colocar em nossos cálculos.

O argumento central desses dois últimos corolários, que expressam em conjunto que o movimento do lugar comum dos corpos não é relevante para o cálculo do movimento dos corpos entre si, é o argumento que explica o que Galileu não conseguia explicar em sua época acerca da razão de uma bola arremessada de uma torre não cair mais para o oeste dela, ou dos pássaros não serem arremessados para fora da Terra. Isto é, ele não tinha noção de que se todos os corpos estão envolvidos em um movimento, no caso o movimento da própria Terra, então podemos desconsiderar este movimento comum a todos e considerar apenas o movimento entre os envolvidos, no caso, entre os objetos na Terra.

#### **2.2.4 - Comentários de Cohen sobre o método teórico Newtoniano.<sup>140</sup>**

Sobre as definições e leis dos movimentos de Newton, diversos aspectos podem ser listados para a discussão sobre o método de Newton. Cohen, por exemplo, aponta que o interesse pela descrição de um método dos filósofos seiscentistas (Bacon e Descartes) relaciona-se com a noção de “experiência”, crescente na época. Isso por conta da noção de experiência carregar a característica de que, com os detalhes suficientemente dados, é possível

---

<sup>139</sup> NEWTON, 2008, p. 61.

<sup>140</sup> O texto trabalhado aqui está intitulado “O método e o estilo de Newton” e está publicado no livro “Newton – Textos, antecedentes e comentários” p. 164-83.

que qualquer um e em qualquer lugar possa reproduzir o experimento, sendo assim, nota-se a necessidade de um método universal para se orientar a investigação científica.

Para Cohen, Newton percebeu a importância dos conceitos e leis no âmbito da experiência, além disso, percebeu que algumas relações de propriedades matemáticas podem descrever fenômenos físicos. Com essa ideia em mente, seu objetivo nos *Principia* foi demonstrar que os *princípios matemáticos* podem ser aplicados para os fenômenos físicos, que culmina no terceiro livro dos *Principia*, quando Newton faz a descrição do *Sistema do Mundo*. O que há de novo em Newton, no aspecto do método em comparação com Bacon e Descartes, não é a ideia de aplicação da matemática sobre os fenômenos, pois essa ideia já vinha sendo cultivada desde Galileu, passando por Descartes, Bacon, Kepler e Huygens, mas sim o grau de aplicação e sucesso matemático que se tem com Newton.

O ponto de vista do método newtoniano é o de que as causas dos fenômenos são sempre mecânicas e que devemos investigar essas causas até que cheguemos na primeiríssima causa. Na questão 31 da *Óptica*, Newton expõe seus princípios de análise e síntese e o método da indução,

Tal como na matemática, também na filosofia natural a investigação das coisas difíceis pelo método de análise deve sempre preceder o método de composição. Essa análise consiste em fazer experimentos e observações e deles extrair conclusões gerais, através da indução, e em não aceitar contra as conclusões nenhuma objeção senão as que forem extraídas de experimentos ou de outras verdades seguras. Pois as hipóteses não devem ser levadas em consideração na filosofia experimental. Embora a argumentação advinda de experimentos e observações, através da indução, não constitua uma demonstração das conclusões gerais, ela é, ainda assim, a melhor forma de argumentação admitida pela natureza das coisas, e pode ser considerada tão mais sólida quanto mais geral for a indução. (NEWTON, 1730, p. 404)

Sobre a análise:

Proceder dos compostos para os ingredientes, e dos movimentos para as forças que os produzem; e em geral, dos efeitos para suas causas, e das causas particulares para outras mais gerais, até que a argumentação termine na mais geral. (NEWTON, 1730, p. 404)

A análise comparada com a síntese:

A síntese consiste em presumir descobertas as causas e estabelecidos os princípios, e através deles explicar os fenômenos daí provenientes, e comprovar as explicações. (NEWTON, 1730, p. 405)

O roteiro teórico descrito por Newton, para o âmbito das descobertas da filosofia experimental, se consiste em: descobrir resultados simples pela análise (decomposição dos fenômenos em suas forças mais simples) e generalizar essas forças simples por indução e com

essas forças (características) generalizadas passar a fazer a síntese dos fenômenos. Talvez Newton faça questão de deixar claro que seu método é indutivo por não querer ter trabalho (ou interesse) de tentar fazer a descrição dedutiva dessas forças, o que o levaria a ter que dar explicações sobre a origem delas, caindo em um problema metafísico.

Apesar de expor esse roteiro, algumas proposições da *Óptica* revela que Newton não foi capaz de segui-lo em todas as suas demonstrações. Algumas das proposições isoladas vêm rotuladas por *prova pelos experimentos*, ou seja, ele não explicou isso pelos seus princípios mais gerais, mas por conta do experimento mostrar que é assim o caso.

Cohen aponta que o método de Newton para seus experimentos não era de fato o da análise para a composição (COHEN, 2010, p. 167). Sendo assim, se quisermos aprender como era de fato o método newtoniano, precisamos inicialmente de uma análise que seja intermediária entre o trabalho feito nos *Principia* e o trabalho feito na *Óptica*. Com esse objetivo, Cohen começa sua análise do que seria de fato o método newtoniano, tomando duas características básicas que estão dispostas hierarquicamente:

A primeira é a de que os pressupostos e definições compatíveis com a natureza dão experimentos comprováveis. Isto é, se seus pressupostos matemáticos estiverem corretos, a natureza os confirmará pelos experimentos. Isto foi expresso por Galileu quando ele estudava o aumento da velocidade em planos inclinados, quando procurava um experimento para demonstrar o conceito de aceleração. Cohen observa aqui que outra característica absorvida por Newton de Galileu, a despreocupação na explicação das causas dos fenômenos. Exemplifica ele que, assim como Galileu não tinha preocupações sobre a causa do aumento da aceleração no plano inclinado, Newton, mais tarde, não se preocupará em dar a causa da força de gravidade. (COHEN, 2010, p. 167)

O que é preciso notar é que o procedimento de extrair leis matemáticas da natureza, já presente Galileu, consiste em fazer experimentos e observar os resultados, e não pela síntese das forças generalizadas, como escreveu Newton na questão 31. De certa maneira, acrescenta Cohen, este método de observar e extrair leis matemáticas também foi utilizado por Kepler com os dados de Brahe na descoberta da sua terceira lei. (COHEN, 2010, p. 167)

O ponto que Cohen quer sintetizar é que o método descrito por Newton na questão 31 da *Óptica* e o método praticado por ele, e pelos demais filósofos naturais da época, não são os mesmos. Vejamos quais as diferenças:

O método descrito por Newton, como sendo seu método, consistia em depurar as forças e relações envolvidas em suas menores partes e generalizá-las por indução. Tendo esses princípios do movimento em mãos, bastaria encaixá-las de uma maneira que explique o fenômeno em questão. (COHEN, 2010, p. 167)

O método descrito por Cohen como sendo o real método newtoniano, é que pela análise de experimentos são extraídas as propriedades a serem trabalhadas. A diferença entre um e outro é que o segundo método é muito mais empírico do que o primeiro, excluindo-se a “meditação” sobre quais são os princípios de movimento (COHEN, 2010, p. 168) – Claro que Newton possuía uma preocupação, e uma crença, numa causa, mas essa preocupação era deixada de lado ao se escrever sobre a ciência.

O segundo nível da hierarquia é partir da descrição matemática para descobrir as causas dos fenômenos (COHEN, 2010, p. 168). Ou descobrir uma explicação para os fenômenos e não ficar apenas na sua apresentação de propriedades. No caso de Newton, a orientação para a explicação das causas vinha das suas propriedades matemáticas, e não de uma explicação fora delas. Da mesma forma que a trajetória de um disparo é a expressão matemática de uma parábola, desconsiderando a resistência do ar, Newton procura as causas pelas propriedades matemáticas.

Para poder entender o que há de revolucionário nisso, observemos os casos de Boyle, quando descobriu a “lei de Boyle”, e de Kepler quando descobriu suas três leis do movimento planetário. – Boyle, contemporâneo de Newton, ao descobrir sua lei dos volumes dos gases, procurou explicar a causa do aumento da pressão dos gases pela sua compressão por duas hipóteses que não utilizavam as propriedades matemáticas. – Kepler, ao descobrir que os planetas percorriam áreas iguais em tempos iguais, conseguiu dar conta do problema dos planetas moverem-se com velocidades diferentes no decorrer de suas órbitas, pois ao moverem-se em tempos iguais com áreas iguais, os planetas movem-se mais rapidamente no periélio e mais lentamente no afélio. Por enquanto, a descrição estava apenas no campo matemático, mas Kepler extrapola o campo matemático quando quer atribuir uma causa a essa

variação de movimento e aponta que o Sol exerce uma força magnética sobre os planetas sem jamais ter provado, ou demonstrado, essa influência.

Newton, procurando saber que tipo de força poderia gerar a lei das áreas, mostrou matematicamente que para um corpo com um movimento inercial inicial produzir a lei das áreas, deveria ter necessariamente uma força centrípeta e dirigida para o ponto o qual é o centro das áreas calculadas, dando, assim, a causa não só para uma força de gravidade, mas também a causa da variação de velocidade da lei das áreas pela proporção inversa do quadrado da distância. Dessa maneira, Newton provou matematicamente que a força que move os planetas ao redor do Sol é uma força gravitacional e, dessa maneira, ele não extrapola o argumento matemático como Kepler fez.

O que temos de notar aqui é que da despreocupação inicial de Newton em querer saber que tipo de causa está nas forças envolvidas nos fenômenos, passando a tratar apenas de suas propriedades matemáticas, ele consegue chegar a mais explicações e poder de previsibilidade trabalhando apenas com as conceituações matemáticas, sem a busca de explicações metafísicas. O que há de novo e de extraordinário em Newton é a sua aplicação matemática capaz de, até mesmo, provar, por necessidade, a existência de forças que fora do âmbito matemático não é possível provar. O poder do argumento matemático é tão grande que ele passa a sobrepor o argumento metafísico.

Este último ponto ressaltado por Cohen nos aponta duas coisas: que a aplicação de propriedades matemáticas ajudou Newton a definir que tipo de força possui o Sol sobre os planetas em órbita e ele prova isso mediante argumentos matemáticos; e a segunda é justamente a despreocupação, em sua obra, de explorar outras causas e propriedades que as já definidas pelas propriedades matemáticas. Esta é uma característica que será herdada pela ciência após Newton.

### **2.2.5 – Comentários de George Smith<sup>141</sup> sobre o método Newtoniano.**

No prefácio da primeira edição dos *Principia*, Newton informa ao leitor qual a nova maneira de se fazer o que ele chama de *filosofia experimental*, ou o que chamamos hoje de

---

<sup>141</sup> Estes comentários foram retirados do capítulo do *Cambridge Compendium to Newton* chamado *The Methodology of the Principia*. (p. 138)

*ciência empírica*. Smith<sup>142</sup> faz uma longa citação (SMITH, 2004, p. 138) do referido trecho dos *Principia*, da qual podemos retirar os seguintes pontos: Newton resume seu trabalho filosófico, neste trecho, em, *a partir dos fenômenos de movimento, investigar as forças da natureza e, então, dessas forças demonstrar os outros fenômenos*; (NEWTON, 2008, p. 14)

A principal distinção que Newton procurava fazer era do seu modelo de ciência com o modelo cartesiano de ciência que se apresentava na época. Este modelo, como dito, concentrava em uma ciência de cunho mais instrumental. A apresentação de Newton no primeiro livro dos *Principia* consiste em, primeiramente, apontar quais são essas forças, princípios de movimento, da natureza mediante a qual podemos identificá-las nos fenômenos e demonstrá-las através de princípios matemáticos. No terceiro livro, já bem conhecidas as forças de movimento do mundo, ele então fará a demonstração do Sistema do Mundo (as órbitas) através dos princípios apresentados.

Smith apresenta mais dois comentários de Newton na primeira edição dos *Principia* sobre seu método: 1) *uma observação enigmática* (SMITH, 2004, p. 138) no final da abertura da discussão sobre o espaço e o tempo que tem como propósito explicar

como determinar os movimentos verdadeiro das (a partir das) suas causas, efeitos e diferentes aparências, e reciprocamente, como determinar dos movimentos, se verdadeiros ou aparentes, suas causas e efeitos. (NEWTON, 1687, p. 382f)

O segundo comentário de Smith é o escólio que está no Livro I, Seção II, no qual Newton propõe que *sua abordagem distinta fará que seja possível argumentar de forma mais segura na filosofia natural*. (SMITH, 2004, p. 139)

Na segunda edição dos *Principia*, Newton separa os fenômenos e regras envolvidas na gravitação universal, que na terceira edição de 1726 virá a ser uma quarta regra, e adiciona um escólio geral com o seu procedimento metodológico:

Eu não tenho ainda como deduzir a partir dos fenômenos a razão para as propriedades da gravidade e eu não faço hipóteses. Pois aquilo que não é deduzido dos fenômenos deve ser chamado de hipóteses; e hipótese, seja metafísica ou física, ou baseada em qualidades ocultas, ou mecânicas [ocultas], não têm lugar na filosofia experimental. Nesta filosofia experimental, proposições são deduzidas dos fenômenos e generalizadas por indução (NEWTON, 1687, p. 943)

---

<sup>142</sup> Professor George Smith. Universidade de Tufts. Coeditor do *Cambridge Companion to Newton*.

Com isso, segundo Smith, é possível dizer que a filosofia experimental de Newton não é hipotético-dedutiva<sup>143</sup> (SMITH, 2004, p. 139), mesmo debaixo da suposta segurança da filosofia mecânica, onde as hipóteses cresceriam abaixo das mais seguras bases do conhecimento. Pois a filosofia mecânica procede com rigor de análise de cada passo dos procedimentos, sem tirar nada que não seja dos experimentos, logo suas hipóteses seriam as mais seguras de serem feitas, mas, mesmo com essa segurança, Newton não se sujeita a hipóteses, ideias sobre os movimentos não são constituídas pelos experimentos.

Smith passa a fazer um longo comentário, baseando-se no escólio da proposição LXIX, salientando que a força de gravidade como foi tratada nos *Principia* não é, propriamente, uma força mecânica por não possuir um contato direto entre os agentes (SMITH, 2004, p. 140). Ela seria uma força tratada abstratamente, independente do mecanismo, o que nos faz pensar que a origem da força de gravidade é antes uma solução matemática ao problema do que uma descoberta física. Ela seria, neste caso, um artifício para salvar os fenômenos que ela se apropria, no caso, da aproximação mútua dos corpos, sendo essa a força que mantém as órbitas. Sendo assim, propõe Smith que procuremos entender os procedimentos matemáticos de Newton para que possamos entender seu percurso metodológico (SMITH, 2004, p. 141).

#### **2.2.5.1 - A teoria matemática de Newton nos Principia.**

Os dois mais proeminentes livros de matemática da época de Newton antes dos *Principia* foram os seguintes: *Duas Novas Ciências* (1638) de Galileu e o *Horologium Oscillatorium* (1673) de Huygens. Newton, provavelmente, não conhecia o livro de Galileu (SMITH, 2004, 142), mas conhecia muito bem o livro de Huygens. Apesar disso, os resultados de Galileu não eram estranhos para Newton, pois Newton conhecia os *Diálogos Sobre os Dois Sistemas Máximos do Mundo* (1632) e outras obras de Galileu. Apesar dos *Principia* parecerem-se com os dois livros antecessores quanto à forma em que foram

---

<sup>143</sup> O modelo hipotético-dedutivo, melhor descrito por Popper no seu livro *A lógica da pesquisa científica*, é um modelo que se baseia da seguinte maneira: primeiramente elaboram-se hipóteses sobre os fenômenos e então passamos a testar essas hipóteses com os experimentos; descartamos as hipóteses que se demonstraram falsas; e elaboramos novas hipóteses para serem testadas novamente. No modelo popperiano não há uma depreciação do conceito de hipótese, como há para Newton.

escritos, em axiomas e proposições<sup>144</sup>, os *Principia* difere-se dele em dois aspectos, segundo Smith:

O primeiro aspecto é que todas as proposições dos livros I e II são da forma lógica "se -então", enquanto que as proposições de Galileu e Huygens são dadas pela forma lógica "quando - então", em que o antecedente descreve uma situação experimental e o consequente é uma predição do que acontecerá sempre que o antecedente ocorrer. Enquanto que a forma "se-então" dá condições e a partir delas tira consequências. O objetivo primário de Galileu e Huygens, nos seus respectivos livros de matemática, utilizando essa forma lógica, era extrair consequências observacionais que dessem suporte para os axiomas. Smith diz que a diferença entre essas duas formas lógicas de fazer proposições, "se - então" e "quando - então", está relacionada com os *tipos de quantidades* [medidas] (SMITH, 2004, p.143) utilizadas por Newton, de um lado, e por Galileu e Huygens, do outro, respectivamente. Smith cita como exemplo que, com exceção das cartas de Huygens sobre a força centrífuga que aparecem no final do *Horologium Oscillatorium*, os axiomas e as proposições não utilizam o termo "força", que seria, nesse caso, um *tipo de quantidade* [medida] que não foi utilizada por Huygens, mas utilizada por Newton. Nem mesmo o conceito de *aceleração da gravidade* é utilizado por Galileu, que seria outro exemplo de distinções nas medidas utilizadas.

Smith (SMITH, 2004, p. 143) salienta que a distinção entre as teorias de Galileu e Huygens, por um lado, e Newton, por outro, é que os axiomas dos dois primeiros pareciam mais pressupostos a serem verificados, enquanto que Newton toma seus axiomas como verdadeiros e suas proposições têm papel contrário, ao invés de colocar a prova os axiomas, elas servem para adequar os fenômenos aos axiomas postulados. Servem para conectar movimentos a forças e vice-versa e também para fazer a composição ou decomposição de forças. A postura de Newton é a de estabelecer princípios de movimento e passar a explicar os fenômenos utilizando esses conceitos, enquanto que Huygens e Galileu procuravam por confirmações dos seus conceitos nos experimentos. O problema agora com Newton passa a ser encontrar um meio para poder caracterizar essas forças postuladas.

---

<sup>144</sup> A escrita na forma de axiomas e proposições era a típica maneira matemática de escrita da época. Era feita assim por conta do livro de Euclides, *Os Elementos*, ter sido escrito da mesma maneira. A ideia é dar os axiomas que são as bases para as elaborações e, nas proposições, fazer as demonstrações a partir dos axiomas.

Em um segundo ponto, a distinção entre a teoria matemática de Newton com as de Huygens e as de Galileu consiste na distinção do foco de cada um. Galileu descreveu uma teoria sobre a aceleração uniforme do movimento e Huygens estendeu essa teoria para os trajetos curvos e de movimento circular uniforme. Newton, por sua vez, oferece não só uma teoria sobre forças centrípetas sob a ação da gravidade, mas no Livro I dos *Principia* também uma teoria genérica o suficiente para abarcar diversos tipos de forças centrípetas, tanto as que variam segundo a lei do inverso do quadrado quanto as que variam linearmente, ainda que não houvessem outras forças centrípetas para se preocupar. E no livro II ele não só mostra uma teoria de resistências de forças que variam com o quadrado da velocidade, como também qualquer força de resistência, independente de qual seja a origem da força de velocidade. O importante é notar que as teorias de Newton são tão genéricas que podem descrever forças, velocidades e resistências dos fenômenos sem entrar em uma discussão quanto à origem dessas características. Isso só é possível graças à abordagem matemática que Newton dá a sua teoria física, não somente com o intuito de fazer fórmulas, mas por pensar em princípios matemáticos que permitam sua aplicação sobre qualquer força, velocidade ou resistência. A força da teoria newtoniana está justamente no seu poder genérico, segundo Smith.

Continua Smith (SMITH, 2004, p. 144) dizendo que podemos dividir as proposições dos Livros I e II em dois tipos, o primeiro tipo conecta parâmetros de regras para caracterizar as forças para os parâmetros de movimento. De um lado temos as regras que queremos aplicar, as noções de forças seriam as intermediárias que permitem as aplicações das regras sobre os movimentos que é nosso objetivo.

Regras <-> Forças <-> Movimento

Smith acrescenta que Huygens desenvolveu os primeiros cálculos da *força de queda vertical no primeiro segundo* (SMITH, 2004, p. 145) que hoje conhecemos por *aceleração da gravidade*, ou  $G$ , enquanto fazia seus estudos sobre pêndulos. Porém, Huygens não percebeu a importância desses cálculos no cálculo do movimento em geral tal como Newton percebeu.

O segundo tipo de proposição dos Livros I e II são as que fazem combinações que deixam claro o contraste entre diferentes condições de força em diferentes condições de movimento. Ou seja, reconhecer que, apesar da diversidade de situações, os princípios de movimento são os mesmos. Um exemplo desse tipo de proposição é entre a lei de  $3/2$  da força

de Kepler, que era uma lei de proporção entre as órbitas, e a pequena correção dessa lei necessária para calcular qualquer corpo em órbita.

## Capítulo 3. – A Óptica e sua importância experimental.

### 3.1 - Introdução. – A importância do experimento para a ciência moderna.

A primeira coisa a se distinguir é a noção de *experimento* e *experiência*, ou *observação da natureza*, no caso. A *experiência*, ou *observação*, é passiva quanto ao que observa, apenas se coleta os dados presentes na natureza. O *experimento* é o que interroga efetivamente a natureza, formando condições para que as perguntas à natureza possam ser feitas e resultados que diminuam a ambiguidade dessas respostas. A noção de *experiência* é a que foi levada pelos textos aristotélicos e, conseqüentemente, pelas universidades até o século XVII. Porém, mesmo com essa noção de experiência/observação, para os aristotélicos a experiência não constituía o conhecimento científico. Constituía apenas o conhecimento prático, ou "artesanal". (Met., I, 1, 981 a 24) O conhecimento científico era constituído pela investigação contemplativa da natureza começando pelas razões mais simples e constituindo o conhecimento a partir delas para o todo.

No percorrer da revolução científica, o *experimento* ganha relevância sobre a *experiência* e toma parte constitutiva do conhecimento científico com Galileu. Um dos grandes aperfeiçoamentos instrumentais de Galileu, que de certa forma o ajudou a encontrar argumentos para o sistema copernicano, foi a luneta. Com ela, Galileu fez diversas descobertas, como as luas de Júpiter, as manchas solares, as crateras lunares, as fases de Vênus. Galileu convergiu essas suas descobertas observacionais ou para sustentar o copernicanismo ou para contrapor o aristotelismo. As principais observações que lhe serviam de argumento para o heliocentrismo foram as luas de Júpiter e as fases de Vênus. Fora esse trabalho astronômico, Galileu possuía estudos com pêndulos e rampas que lhe permitiram enunciar um princípio de inércia e a noção de aceleração dos corpos. Tomando esses dois termos principais, inércia e aceleração, podemos dizer que eles possuem a sua origem conceitual nesses experimentos com rampas e pêndulos de Galileu.

Outro exemplo de sucessos pela experimentação é o de Robert Boyle que, através de seus experimentos, chegou a definição da lei que leva o seu nome.<sup>145</sup> Robert Boyle inicia suas

---

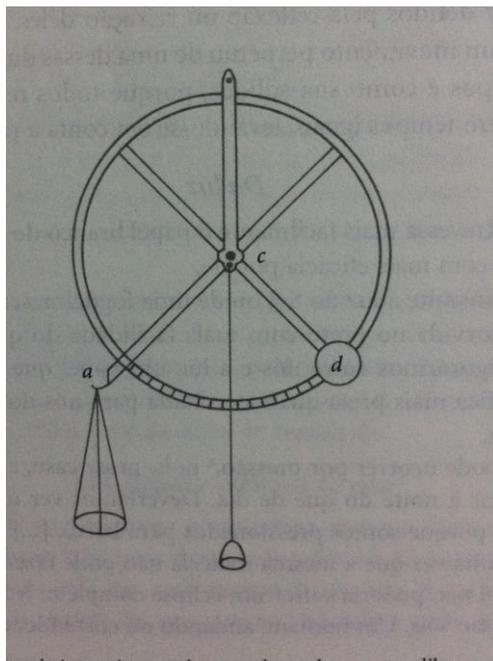
<sup>145</sup> A Lei de Boyle é a que afirma que a pressão em um sistema fechado varia de acordo com a temperatura nesse sistema. Que é, por fim, a lei que permite o cálculo para termômetros e barômetros. Boyle descobriu essa propriedade em 1662 e ela foi confirmada por Edme Mariotte em 1672.

atividades com experimentos em 1649 quando retorna das suas viagens pela Europa e constrói um laboratório na cidade de Sailbridge. Também é um defensor da Filosofia Experimental, a qual Newton também é um grande defensor, dando sua opinião na sua crítica *Químico Vulgar*, e também expondo isso no seu livro *Of the Atomicall Philosophy*. Fora a Lei dos Gases, Boyle também chega ao desenvolvimento do indicador de cor para os ácidos (Xarope de Violeta), descobre a existência do Enxofre, Hidrogênio e dá a noção moderna de *elemento químico*, prova que o ar é uma mistura de gases, melhora a então *Máquina de Otto von Guericke*, hoje conhecida como bomba de vácuo, faz melhorias no termômetro inicialmente desenvolvido por Galileu, e outras descobertas e melhorias. Boyle é uma importante influência para Newton, como se demonstra na sua correspondência para com o próprio.

Podemos observar a relevância do experimento para Newton já em um texto seu de juventude chamado *Questiones quaedam philosophicae*, que são um conjunto de textos escritos ao final de sua graduação, por volta de 1664, que constituem seu primeiro passo da sua carreira científica. (COHEN, p. 22, 2010) Estes textos são tão primários na vida científica de Newton que neles ainda vemos as preocupações em refutar os argumentos da ciência aristotélica, coisa que é totalmente descartada na obra de maturidade, e a concordância de Newton com a teoria dos vórtices cartesiana, outra coisa que é completamente abandonada na obra de maturidade. Este texto principal é composto por uma série de textos, onde podemos observar que Newton utiliza-se de argumentos experimentais, não de seus experimentos, mas de experimentos realizados por outros, para negar afirmações dos peripatéticos. Os textos que compõem este primeiro texto de Newton são: 1) *A conjunção dos corpos*, onde Newton parte da questão aristotélica do que é ou não a conjunção dos corpos dada pelo repouso. E sua resposta baseia-se em dizer, primeiramente, que a composição da matéria se dá por outra forma que não o repouso, utilizando o exemplo da areia que se compõem num forno e não em estado de repouso. E, mais a frente no texto, Newton utiliza os experimentos de Boyle sobre a pressão do ar para elaborar o argumento de que a composição das coisas se dá pelas pressões, seja do próprio ar, seja de outros elementos que estão em conjunto a essa matéria. 2) *Da matéria e dos orbis celestes*, ele nos dá razões para se acreditar nos vórtices cartesianos, culminando no fenômeno da aurora boreal como experimento que confirma a existência dos vórtices. 3) *Do Sol, das estrelas e dos cometas*, Newton aponta que as caudas dos cometas são fenômenos que podem ser explicados pelos vórtices de Descartes. Percebemos novamente que a experiência é o elemento central para o respaldo de teorias. Neste caso, a cauda do cometa é

gerada justamente por conta do movimento do vórtice sobre o cometa. 4) *Da gravidade e da leveza*, Newton atenta para um importante detalhe quando pensa que a força de gravidade exerce sobre os objetos, ao considerar o meio no qual esses objetos estão envolvidos. Primeiramente, ele dá um exemplo de como se descobrir o peso da água nos objetos que estão submersos e, então, ele utiliza essa noção aplicada sobre o ar, para saber quanto da força do peso nos objetos é na verdade peso do ar. Para solucionar o problema, Newton sugere uma balança que se consiste em uma roda com um pêndulo, onde dois pesos são colocados em dois braços dessa roda e, assim, pode-se pesar os objetos sem a interferência do peso do ar sobre os objetos. Por fim, ele responde brevemente o que poderia ser uma dúvida latente: se a força de gravidade atua nos corpos penetrando-os pelos poros, um prato de pé possuiria menos peso do que um prato deitado, ou talvez o chumbo pulverizado seria mais pesado, ou mais leve, do que a peça de chumbo inteira. Ou, talvez ainda, haveria outras coisas que poderiam influenciar no peso dos objetos, como a dilatação ou compressão de acordo com a temperatura, ou ações magnéticas sobre os corpos. Porém, Newton resume sua resposta em dizer que dois corpos em queda livre caem ao mesmo tempo no chão, desconsiderando a resistência do ar, como apregoou Galileu. Logo, o problema era eliminar apenas a resistência, ou pressão, do ar do cálculo do peso.

E podemos perceber já neste primeiro texto alguns dos problemas que uma concepção do éter sobre a força de gravidade poderia trazer, como observado no caso do prato inclinado e o prato deitado ou nas partes de chumbo que poderiam ter menos poros por onde o éter penetraria nos corpos para transmitir a força de gravidade. Essas são propriedades que poderiam ser estudadas por Newton para que se averiguasse as propriedades do éter, mas por algum motivo que ainda não sabemos esses estudos, se existiram, não estão publicados e no final das contas Newton suspende o juízo sobre as questões relacionadas com o éter.



Nesta imagem, (COHEN, p. 27, 2010) podemos ver que os pesos são colocados nos braços A e D da roda e então o pêndulo é capaz de identificar a diferença de peso entre dos dois objetos. 5) *Da Luz*<sup>146</sup>, Newton inicia este texto perguntando por que a luz atravessa mais o papel branco do que o papel preto, se ela é melhor refletida pelo papel branco? - A resposta dele se resume a dizer que a Luz não é transportada por pressão, e dá diversos exemplos do que ocorreria caso ela fosse transportada por pressão. É uma resposta bem menos elaborada quando em comparação a sua resposta a Hooke sobre o problema dos jarros. 6) *Da sensação*, neste texto também observamos a experiência tomando base para o conhecimento e vemos também a forte influência que Descartes exercia sobre o jovem Newton. Neste texto, Newton começa, e apenas começa, uma investigação sobre onde estaria o senso comum no homem. Sua investigação começa por reconhecer que o estômago tem maior ligação com o coração do que a cabeça, pois quando o estômago é *ferido* (envenenado), isso faz cessar o movimento do coração muito mais rápido do que se a cabeça fosse ferida e, por vezes, a cabeça pode ser gravemente ferida e não interromper o movimento do coração. Partindo deste princípio,

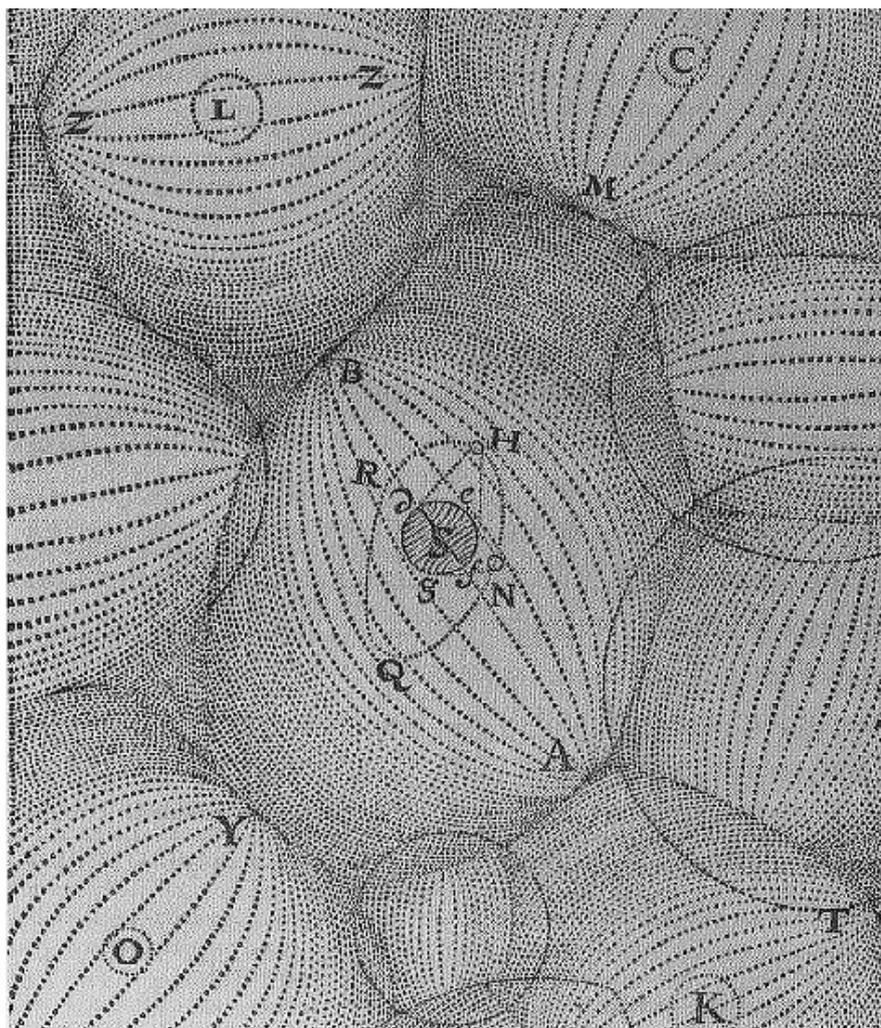
---

<sup>146</sup> Apenas lembrando que este texto foi escrito em 1664. A resposta de Newton ao problema de Hooke, que se consiste em uma resposta mais madura sobre a natureza da Luz, aconteceu apenas em 1675; a intensificação das experiências sobre a luz ocorreu entre 1670-2 e a primeira publicação da *Óptica* aconteceu em 1704.

Newton assume que o senso comum pode estar em um desses dez lugares: no corpo todo, no estômago, coração, cérebro, membranas (coração), *septum lucidum*, alguma partícula dentro do corpo, glândula pineal (cerebelo), nos nervos dos quatro ventrículos do cérebro ou nos espíritos animais dos quatro ventrículos do cérebro. E 7) *Dos fluxos e refluxos do mar*, a pergunta que encabeça este texto é querer investigar se a Lua é capaz de pressionar a atmosfera e assim causar o fluxo e o refluxo do mar. Para sustentar essa hipótese, Newton se utilizará do seguinte exemplo: se tomarmos um tubo de trinta polegadas e enchê-lo de mercúrio, e vedarmos uma das entradas e o virarmos com a boca para baixo, o mercúrio irá descer talvez até quatro polegadas dentro deste tubo (NEWTON *in* COHEN, p. 27, 2010), da mesma forma, o ar é pressionado pela Lua que, por sua vez, pressiona a água e causa então o fluxo e refluxo do mar, da mesma maneira que um barômetro sofre alterações com o aumento e a diminuição do calor ambiente. Newton chega a cogitar que o vórtice da Terra também pode causar uma diferenciação anual na pressão do mar, assim como a mudança do dia para a noite pode também causar mudança sobre a água por conta dela também ser pressionada pelo Sol. - Para entendermos melhor essa explicação de Newton sobre a pressão da Lua e do Sol sobre o mar, não podemos entender isso como sendo uma reação à força de gravidade destes dois astros, como o próprio Newton dirá em sua maturidade, mas como sendo de fato uma pressão causada pela passagem do Sol e da Lua. Em primeiro lugar, temos de lembrar que Newton, neste ponto, é um cartesiano, e por conta disto ele aceita a teoria de que o universo pode ser explicado pelo modelo hidrostático de Descartes, e sendo assim, que o próprio universo está cheio deste líquido que compõe os vórtices.<sup>147</sup>

---

<sup>147</sup> Ilustração do modelo hidrostático de Descartes. Fonte da imagem: <http://astro.if.ufrgs.br/vortex.jpg>



Logo, é racional pensar que a Lua, quando é arrastada pelo seu vórtice, causa uma pressão sob esse líquido no qual está imersa, que por sua vez causa uma pressão na atmosfera e, por fim, a pressão sob a água que observamos. De mesma maneira, quando a Terra é arrastada em seu vórtice em volta do Sol, é este que causa a mesma pressão neste mesmo líquido, e causa também o mesmo efeito sob a água, podendo ser observado na passagem do dia para a noite.<sup>148</sup>

---

<sup>148</sup> De fato a gravidade da Lua e do Sol exercem efeito sobre as marés. O mar avança mais sobre a Terra quando é de dia por conta da gravidade do Sol, e pela mesma razão recua a noite. A gravidade da Lua também exerce o mesmo efeito nas marés. A diferença entre a ação descrita por Newton, na sua obra madura, e a de Descartes é que Newton descreve a ação do Sol e da Lua sobre as marés como uma ação gravitacional, isto é, de atração das águas por esses dois astros. Enquanto que Descartes apregoa que há uma pressão sobre as águas por conta da pressão exercida sobre o éter e conseqüentemente na atmosfera.

Nesses sete textos da juventude de Newton, podemos observar que todos eles se iniciam com uma questão objetiva e, apesar da carga teórica das investigações serem cartesianas, a forma a qual Newton recorre para respondê-las é trazendo experimentos e/ou experiências, não necessariamente feitas por ele, para serem observadas a modo de corroborar a teoria.

Uma investigação de Newton que desde o começo foi uma investigação experimental, foi sua investigação sobre a heterogeneidade da luz. Ela se inicia já em sua juventude, 1664, com o seu trabalho com lentes hiperbólicas e atinge sua total maturidade com a *Óptica* em 1704. Para conhecermos parte deste trabalho, vamos analisar seu texto *Das Cores*, de 1666, *Uma hipótese explicativa das propriedades da luz sobre as quais discorrem meus diversos artigos*, de 1675 e alguns trechos da *Óptica*.

### **3.2 - A Óptica.**

Como vimos, o interesse de Newton pelos fenômenos envolvendo a luz pode ser observado desde sua obra de juventude apresentada, onde aparecem suas primeiras questões e explicações sobre as propriedades da luz, no qual ele utiliza-se das teorias vigentes na época de cunho cartesiano. O ápice das descobertas sobre a luz, assim como sobre os demais assuntos, como admite o próprio Newton, se deu nos dois anos de reclusão em Woolsthorpe, em razão da peste em Londres. Nestes dois anos, sobre a *Óptica*, Newton realizou seus primeiros experimentos com os prismas e as lentes.

O questionamento de Newton sobre a luz iniciou-se quando ele passou a duvidar da ideia vigente em sua época de que a luz branca era homogênea, ou seja, de que ao invés de ser composta por diversos raios em diversas frequências, como sabemos hoje, ela seria composta por uma só substância que seria a luz branca. Pensando em uma luz homogênea, concebia-se que ela possuiria uma espécie de "neutralidade de cor" ou que até poderia ser luz branca e, então, ao tocar em um objeto ou passar pelo vidro colorido, ela se modificaria na cor do objeto passado, assumindo sua cor. Newton passou a pensar em uma luz heterogênea a partir dos seus primeiros experimentos com prismas e que os fenômenos com as cores estariam relacionados pelo fato dela ser heterogênea.

Pensando em uma luz homogênea, Descartes acreditava que lentes esféricas poderiam deixar os raios de luz paralelos, o que colocaria fim na aberração cromática que as lentes dos

telescópios de época faziam. Entretanto, as lentes esféricas não conseguiam acabar com essa aberração cromática e isso pode ser explicado pelo experimento com o fio colorido de Newton que será apresentado mais adiante. Newton percebeu que estas lentes não retirariam a aberração cromática justamente por conta da luz ser heterogênea, isto é, por conta de haver uma divisão de raios (cores) ao se passar pelas lentes. Com tal descoberta, Newton chegou à conclusão de que os raios isolados de luz, que compõem a luz branca, possuem apenas uma cor e que, sendo assim, os fenômenos com as cores se dão pela separação dos raios e não pela modificação da natureza de uma luz homogênea.

O amadurecimento da teoria das cores de Newton aconteceu quando ele tornou-se *Professor Lucasiano*<sup>149</sup> (1669) e desenvolveu um curso dividido em três séries sobre as cores. Foi próximo dessa época (1675) que Newton desenvolveu o experimento conhecido como *anéis de Newton* em que se observava o anel colorido que se formava no ar contido entre a lente e uma lâmina de vidro.<sup>150</sup> Observada a periodicidade desses anéis coloridos, Newton notou que era possível saber qual cor apareceria em qual espessura do anel, desde que se soubesse o diâmetro do anel, o que possibilitou que cem anos mais tarde se provasse a teoria ondulatória da luz. Mas nesse momento não era importante para Newton falar sobre uma teoria ondulatória da luz, seu objetivo era apenas demonstrar a sua heterogeneidade, mesmo porque ele pensava em uma teoria corpuscular da luz.

Os experimentos com os prismas e lentes explicavam a luz heterogênea, mas Newton queria agora, através da mesma teoria, explicar as cores nos objetos sólidos, ou seja, explicar como podem as coisas possuírem diferentes cores, como os objetos conseguem refletir apenas uma das cores presentes na luz branca. Newton observou que as cores eram compostas em espessuras diferentes, através do experimento com a lente sobre uma superfície de vidro, então ele chegou à conclusão de que os objetos refletem as cores porque têm uma mesma espessura em relação à cor apresentada.<sup>151</sup>

---

<sup>149</sup> Professor lucasiano é o nome da cátedra de matemática da Universidade de Cambridge.

<sup>150</sup> Os *anéis de Newton* também podem ser observados em camadas finas de óleo ou em bolhas de sabão, são anéis multicoloridos que aparecem quando não há contato perfeito entre duas superfícies.

<sup>151</sup> Hoje sabemos que as cores nos objetos se dão por conta dos objetos refletirem apenas uma faixa eletromagnética e absorverem as demais faixas, como energia térmica. Entretanto, esta teoria apareceu apenas no

Dados os estudos de Newton sobre a refração, parecia impossível corrigir a aberração cromática dos telescópios, já que ela parecia ocorrer independente da forma que fosse a lente. Entretanto, Newton observou que os espelhos não geravam aberração cromática e em 1668 Newton inventou o telescópio de reflexão. Este primeiro telescópio inventado por Newton tinha aproximadamente apenas seis polegadas (~15cm) e conseguia ampliar o observado em até quarenta vezes, o que era mais do que fazia um telescópio de refração de seis pés (~182cm). A *Royal Society* pediu a Newton para ver o telescópio e ele assim o fez em 1671; em 11 de janeiro de 1672 ele foi eleito membro da *Royal Society*. Até o momento, Newton não tinha publicado nada sobre sua teoria da luz, passou a publicar depois da recepção calorosa que teve o seu telescópio de reflexão. Uma versão final da *Óptica* surgiu apenas em 1703, mais de trinta anos depois de seus experimentos e primeiras teorias sobre a heterogeneidade da luz.

### 3.3 - Das Cores.<sup>152</sup>

*Das cores* é um conjunto de três textos onde Newton faz a descrição de experimentos que ele realizou com a luz e prismas. Os textos não procuram defender nenhum ponto de vista teórico, parecem ser apenas anotações de experimentos feitos por Newton, mas com certeza formam a base de conhecimento daquilo que um dia viria a ser a *Óptica*.

#### Texto 1.

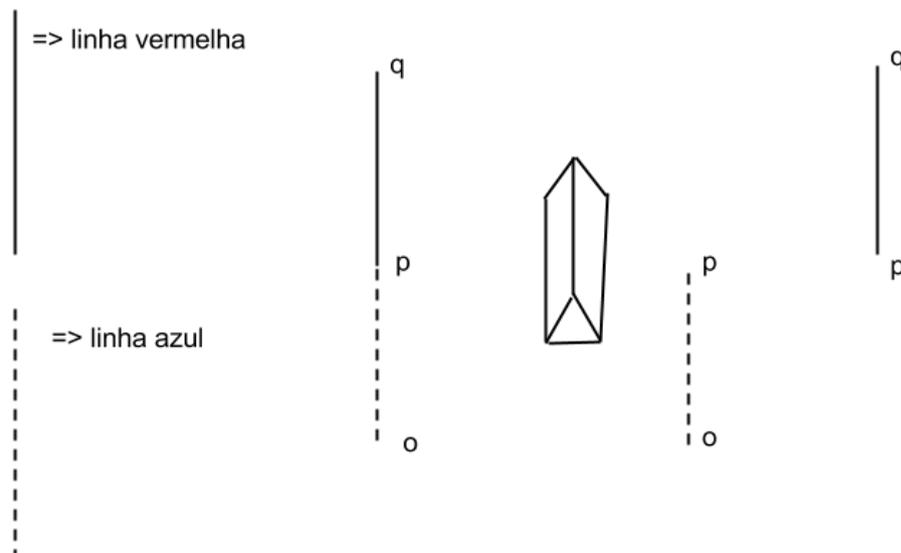
Newton procura provar, por meio de experimentos, a heterogeneidade da luz, para a realização deste primeiro experimento, Newton parte de um conhecimento já comum de época que determina que, na escala de cores, os pontos opostos eram o vermelho e o azul. E neste primeiro momento tudo que ele consegue fazer é provar isso mediante uma mesma linha com essas duas cores e um prisma. Porém, mais a frente, ele usará isso como prova da heterogeneidade da luz em oposição à ideia homogênea. Newton inicia o texto com um experimento realizado por ele, fazendo a seguinte descrição: em um papel preto faz-se uma linha contínua dividida em duas cores, metade azul e metade vermelha. Ao olhar para essa

---

final do século XIX. Na época de Newton, parecia muito mais sensato pensar que as cores eram refletidas nos objetos por uma razão semelhante a de como são refletidas nas lentes e nos prismas.

<sup>152</sup> Este texto, original e integral, pode ser encontrado em COHEN, p. 190, 2010.

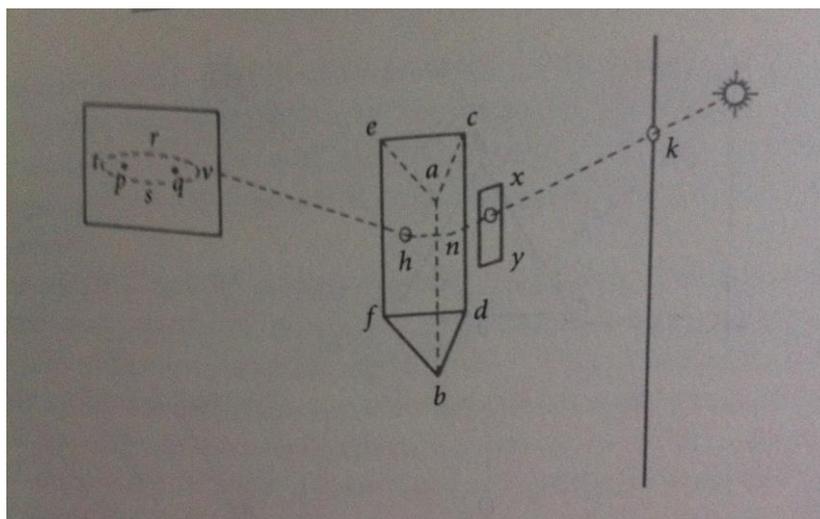
linha por um prisma, sua imagem fica como se fossem duas linhas distintas, uma azul, de um lado, e outra vermelha, de outro. E disso Newton concluiu que os raios de luz azul sofrem mais refração do que os raios de luz vermelha.



Pode se obter o mesmo resultado com um fio de duas cores segurado no escuro.

Dando todas as distâncias necessárias para a reprodução do que foi feito, Newton dá um segundo experimento, dessa vez apenas com um prisma, onde ele descreve a decomposição da luz solar numa matriz de cores. O ponto característico que ele aponta é a distância que o espectro azul fica do espectro vermelho.

Numa segunda fase do mesmo texto, Newton coloca uma placa com um pequeno furo no intuito de diminuir a inclinação dos raios ao passar pelo prisma, isto é, deixá-los com uma saída mais paralela. Newton conseguiu diminuir a inclinação com esta placa em 24' (minutos de grau), mas diminuindo também a impressão do espectro na parede. Com esse experimento, ele conclui que os raios azuis e vermelhos do espectro eram paralelos antes da refração no prisma, o que se permite dizer, entre outras coisas, que todos eles tinham origem na luz branca do Sol. (COHEN, p. 191, 2010)



Podemos observar que essa exposição de Newton é muito mais didática do que de fato cronológica com os experimentos, pois é claro que o experimento com o fio azul e vermelho tem sua origem no experimento do prisma e não o contrário, como foi exposto, justamente por se conhecer previamente que o espectro azul e o vermelho são espectros da extremidade. Entretanto, Newton expôs primeiramente o experimento com o fio, ao que parece, para que se tenha uma orientação do que deveríamos observar no segundo experimento, que é justamente a distância entre o espectro azul e o vermelho. E, talvez, o experimento com o fio seja também para mostrar a própria eficiência do prisma em decompor as cores, para que não se pense, como pensavam os aristotélicos, que a cor é obtida pela luz ao passar pelo prisma, e não que estivesse anteriormente na luz. Com o experimento do prisma separando como que em duas linhas uma mesma linha que é metade azul e metade vermelha, prova-se que o que o prisma faz é decompor as cores e não adicionar cor a luz.

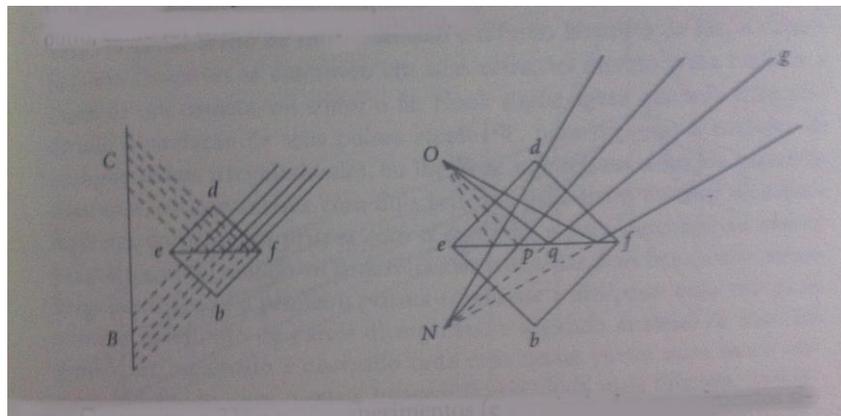
## Texto 2.

Newton começa este texto descrevendo que ao se incidir a luz do Sol sob um prisma qualquer, parte será refratada com a decomposição das cores e parte será refratada como luz branca. Se o prisma for colocado de maneira mais oblíqua, aumenta-se a área que as cores refratadas tomam, fazendo a cor branca começar a se azular. Mas, se continuarmos a inclinar o prisma, a cor azulada voltará a ser branca.

Continuando a explicação, Newton faz a descrição de um segundo experimento que consiste em observar um prisma posto a céu aberto. Relata Newton que, ao fazer isso, parte do céu refletido no prisma, observado perpendicularmente junto a sua base, parecerá mais escuro

do que a outra. Explica Newton que isso se deve como os raios são refletidos do prisma ao olho, e não qualquer tipo de sujeira no prisma, ou no seu interior.

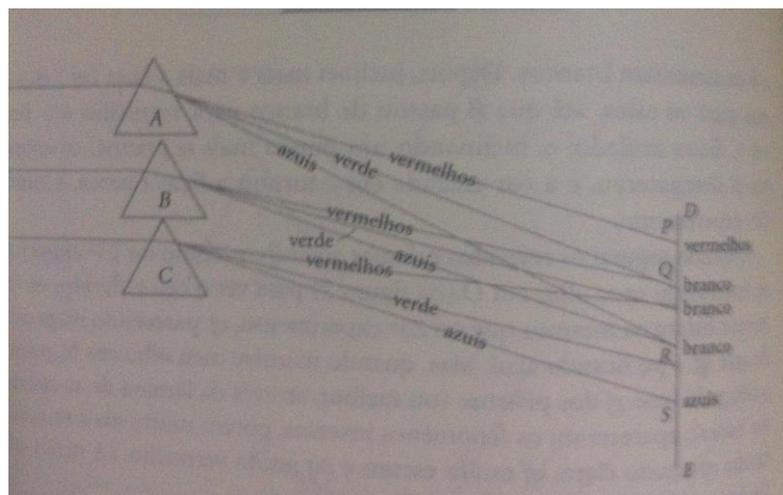
Outro experimento relatado foi que ao se colocar dois prismas, base contra base, e posto em um quarto escuro com uma única fonte de luz, observou-se na parede que houve apenas uma fraca coloração azul e vermelha nos pontos mais extremos da refração e, ao se inclinar um pouco mais o prisma, essa fraca coloração desaparece e a luz torna-se novamente branca. Ao se manter os prismas juntos a céu aberto, também se observou o azul do céu mais escuro em uma parte do que em outra, mas ao colocar o olho no ponto N (ver na imagem (COHEN, p. 193, 2010)) observou-se essa distinção nas cores com mais tenuidade, com um tom avermelhado.



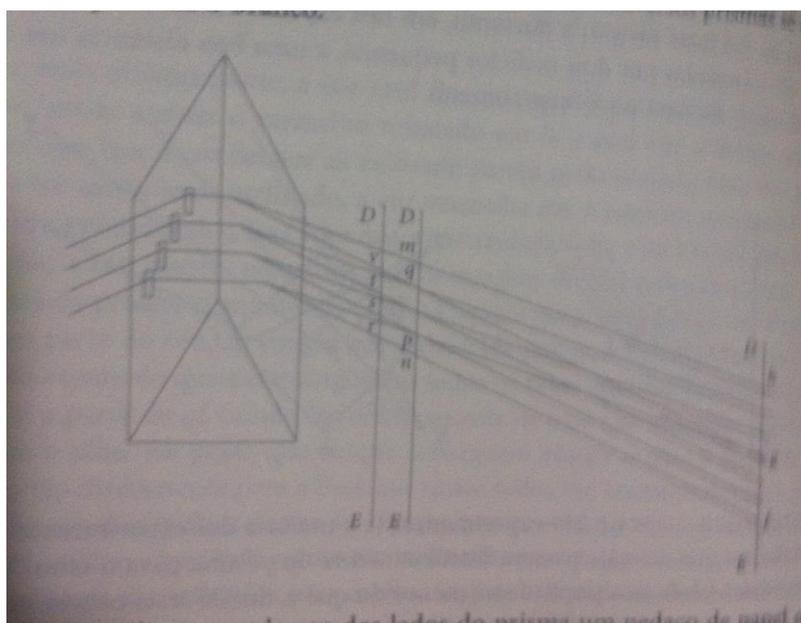
### Texto 3.

Este terceiro texto é apenas um complemento dos seus experimentos, demonstrando que na mistura das cores decompostas é possível fazer outras cores.

Se três prismas A, B e C forem colocados de tal forma que as cores vermelhas e azuis de B misturem-se com, respectivamente, as verdes de A e C, o resultado final do espectro na parede será: vermelho, branco, branco, azul.



Se colocarmos entre a parede e um único prisma uma folha de papel com diversas fendas, conforme afastamos o papel do prisma, as cores refratadas pelo prisma se misturam, refletindo novamente a cor branca na parede.



### 3.4 - Conclusão de *Das Cores*.

Podemos observar por esses três textos os primeiros passos de Newton em suas investigações sobre a luz. Tais textos foram escritos em 1666, justamente em um dos anos de peste em Londres, onde o próprio Newton dirá, mais tarde, serem seus melhores anos de desenvolvimento de teorias. Além disso, vemos também o peso que os experimentos possuem

já para o jovem Newton, primeiramente em seus textos procurando argumentos para as teses cartesianas, e agora na dissertação de suas primeiras ideias sobre uma luz heterogênea.

### **3.5 - Carta de Newton a Oldenburg de 11 de junho de 1672.**

Cohen (Cohen, p. 195, 2010) fez a seleção de dois pontos da referida carta de Newton a Oldenburg<sup>153</sup> onde Newton responde duas perguntas, a saber: *Que o raio não é dividido nem dilatado de nenhum modo*; e *Que o branco é uma mistura de todas as cores*. Respectivamente, os pontos sete e nove da carta. No primeiro ponto citado, Newton demonstrará que o prisma não divide (ou multiplica) os raios de luz ao passarem por ele. E no segundo texto Newton demonstrará que a luz branca é composta pelas demais cores e que as cores não são dadas pelo prisma ao a luz passar por ele, tal como pensavam os peripatéticos.

#### **3.5.1 - Que o raio não é dividido nem dilatado de nenhum outro modo.**

Objetivo deste texto:

Saber se as refrações desiguais produzidas sem respeito a qualquer desigualdade de incidência são causadas pela refrangibilidade diferenciada de diversos raios, ou por ser o mesmo raio dividido, partido ou difundido em partes divergentes. (NEWTON *in* COHEN, p. 195, 2010)

Isto é, há difrações, de um prisma, por exemplo, que numa mesma refração possui alguns raios que não seguem o padrão dos demais. O que se quer saber é se os raios são divididos ou se eles são refratados de maneira diferente. Mas, como já está no título do trabalho, vamos ver o argumento de Newton do porque eles não se multiplicam, mas são refratados de maneira diferente.

Newton inicia seu argumento dizendo que para se explicar esse fenômeno ele não pensa em uma teoria melhor do que a de uma dilatação e difusão aleatórias da luz, tal como discorreu Descartes sobre as refrações etéreas. Pensando nisso, ao responder Hooke sobre os experimentos com prismas que ele, Newton, havia feito, argumenta que utilizou em suas experiências dois prismas, de maneira que o segundo prisma retirasse a regularidade do primeiro para que se evidenciasse a irregularidade da refração. Se o primeiro prisma espalhasse e dissipasse cada raio em um número indefinido de partes divergentes, o segundo

---

<sup>153</sup> Henry Oldenburg (c.1619 - 1677) foi um teólogo, filósofo natural e Secretário Geral da *Royal Society*.

prisma deveria fazer a mesma coisa em um outro número indefinido de raios, dilatando a imagem produzida.

Entretanto isso não aconteceu e isso porque "as partes divergentes lineares não dependem uma das outras quanto a maneira de sua refração" (NEWTON in COHEN, p. 196, 2010), isto é, a linearidade da refração se mantém, provando que os raios não são divididos (ou multiplicados) na refração. Em um segundo experimento, colocando o segundo prisma na transversal com o intuito de modificar o formato da imagem refratada, não se observou qualquer modificação na imagem, independentemente da posição que se colocava os prismas. O que por fim mostra que os raios de luz são gerados por uma lei constante, sem nenhuma irregularidade.

### **3.5.2 - Que o branco é uma mistura de todas as cores.**

Questão: saber se o branco é uma cor independente ou se é resultado da mistura das demais cores. Newton passará nesse trecho para a descrição de diversos experimentos que podem confirmar a afirmação de que a luz branca é composta pela mistura das demais cores.

Newton descreve aqui o seguinte experimento: se captarmos em uma lente todas as cores, exceto, por exemplo, o vermelho, então o resultado final será uma cor vermelha. E o mesmo acontece com todas as demais cores. Newton conclui disso que a resposta completa para a sua questão não é apenas demonstrar que a decomposição do branco gera as cores, mas demonstrar também como a composição das cores pode gerar o branco. A questão é se todas as cores se convertem no branco, ou seja, se cada uma das cores em questão transforma-se em branco, ou se é a mistura de todas as cores que resulta no branco. Porém, para aquele que optar por responder a questão para a primeira alternativa, isto é, que as cores se transformam no branco, terá de explicar, entre outras propriedades da luz, porque todas as coisas não possuem coloração branca, já que os raios de luz de mistura no ar.

Completando esse argumento, Newton descreve um outro experimento que hoje conhecemos por "disco de Newton".

Por exemplo, experimentando qual será a aparência dessas cores numa sucessão muito rápida uma das outras. E isso pode ser facilmente executado através do giro rápido de uma roda que tenha em seu perímetro muitos pinos ou dentes, cujos interstícios e espessuras sejam iguais e de tal largura que, se a roda for interposta entre o prisma e a conjunção branca das cores, metade das cores possa ser interceptada por um pino ou dente, e a outra metade passe por um interstício. (NEWTON in COHEN, p. 197, 2010)

Newton completa que feita essa roda de cores e se ela for girada tão rapidamente a ponto de não se distinguir mais as cores, o espectro resultante será branco. E assim se prova que o branco é gerado pela mistura das cores e não pela assimilação ou redução dos raios de luz um pelos outros. Completando esse experimento com os prismas e a roda de cores, Newton ainda cita uma situação que pode confirmar que o branco é resultante da mistura das cores: se convergirmos a luz branca do Sol nas suas diversas cores, interceptaremos uma dessas cores e convergiremos novamente as cores em luz branca e, por fim, dissolveremos novamente essa cor branca; disto, perceberemos que nesse novo espectro não haverá a cor que interceptamos da primeira vez que a luz branca foi decomposta, provando, dessa maneira, que a cor decomposta não é dada pelo prisma, tal como pensavam os aristotélicos.

Um contraponto colocado por Hooke às teorias de Newton, refere-se à questão de que qualquer corpo colorido posto em rotação geraria a cor branca. Newton assume que sim, mas, devido à condição das cores do objeto em questão, essa cor branca resultante pode ser acinzentada, não sendo de uma luminosidade perfeita. A questão de Hooke seria negar a afirmação de Newton por conta do tom acinzentado do branco, entretanto Newton afirma que o que há é uma diferença no tom do branco e não na cor produzida.

A seguir, Newton completa sua descrição no sentido de explicar porque a luz branca em objetos coloridos colocados em rotação fica acinzentada. Ele descreve que, se uma folha de papel branco receber uma luz refletida de um objeto, essa luz terá a cor desse objeto, porém se a cor refletida for o cinza, então o seu reflexo será branco. No penúltimo parágrafo, seguindo ainda a mesma lógica, Newton descreve "E a distinção parece estar em que os tons de cinza e talvez o preto são produzidos por um defeito desigual da luz.", o que nos faz perceber que talvez Newton, assim como sua época, pensasse no preto como uma cor/luz possível, e não como a ausência de cor/luz.

Concluindo o nono ponto da carta, Newton assume que a composição do branco pode ser feita a partir da mistura de quatro ou cinco cores mais eminentes, utilizando a luz como fonte dessas cores, ou pintando essas cores no disco de cores proposto por ele. E assim se conclui a respeito da natureza do branco como sendo uma mistura das cores no caso da luz.

No caso da mistura de tintas, como citado no exemplo, a cor resultante será algum tom de preto ou cinza, dependendo das cores misturadas.<sup>154</sup>

Como pudemos ver nessa leitura das questões que envolveram a luz trabalhadas por Newton, aqui há um espaço muito maior para a experimentação, através dos primas e lentes do que na elaboração dos *Principia*. Enquanto que as demonstrações de Newton sobre as questões de movimento passavam pelo viés matemático, as explicações de Newton para os fenômenos com a luz passam pelo viés da experiência. Newton elabora propriedades sobre a luz, justamente pelo comportamento que ela apresenta, e prova essas propriedades mediante os experimentos. Enquanto que as propriedades expostas nos *Principia*, tal como a da gravidade, por exemplo, são expostas não tanto pela experiência, mas pela propriedade matemática e geométrica das órbitas: o que se procurava fazer com a força de gravidade é expor uma força que justificasse as propriedades das três leis de Kepler e, também, de uma força que variasse pela metade com o quadrado da distância e mante-se os planetas em movimento orbital.

---

<sup>154</sup> É importante notar que há uma distinção entre a composição das cores feitas pela luz e a composição química das cores obtida pelas tintas, por exemplo. A composição de cores citada por Newton nesta carta faz referência a uma composição feita pelos raios de luz, sendo que a composição química pode ser dada com resultados diferentes, dependendo das cores misturadas.

## Conclusão.

Das descrições que Newton faz de seu próprio método, nos parece que a indução parece ser uma característica necessária quando se parte o conhecimento por experimentos. Entretanto se pensarmos que o modelo mecânico de Newton é antes uma aplicação de um modelo matemático existente para a interpretação do movimento, podemos chegar ao ponto de que a experiência serve como corroboração ou como medida para a adequação do modelo matemático. Pensar que pelos experimentos podemos, quase que literalmente, "ler a natureza", confronta com muitos problemas fatigadamente tratados pela filosofia contemporânea. Em resumo, não há um meio pelo qual possamos justificar uma leitura pura da natureza. Somos obrigados a pensar que Newton aplicou um modelo matemático, uma teoria, sobre o movimento que teve uma aplicação excelente tanto para a resolução de problemas quanto para a explicação e previsão de fenômenos.

Por outro lado, como explicaríamos essa adequação tão boa com os fenômenos se pensarmos que houve apenas aplicação de um modelo matemático? - Para responder essa questão precisamos voltar atrás na história da ciência de Kepler a Newton, e entender como os experimentos de cientistas anteriores definiram os rumos da ciência moderna.

A realização do projeto newtoniano não é de crédito apenas de Newton, mas sim o passo final de um esforço que começou com Copérnico ao elaborar o modelo heliocêntrico do Universo e, décadas mais tarde, apareceram Galileu e Kepler para fazer o amadurecimento e defesa desta ideia. Mas não apenas isso, começaram, ambos, a fazer as modificações nas próprias noções da ciência de época para que se pudesse assimilar com mais familiaridade a ideia de que o Sol estava no centro do universo e, principalmente, que a Terra possuía movimento. E, para tanto, foi necessário que abandonássemos diversas noções aristotélicas, como a de *anima*, *movimento natural*, mundo *sub* e *supralunar* e diversas outras, e em seus lugares colocássemos noções como *força*, *aceleração*, *massa*, *movimento ondulatório* e diversos outros que, um a um, foram compondo a ciência moderna como a conhecemos. E, então, já na época de Newton, tivemos a grande colaboração para as noções modernas da ciência de Boyle, Huygens, Torricelli, Hooke e tantos outros que colaboraram não só na definição mais própria desses novos termos, mas também passaram a construir seus próprios instrumentos mostrando que essa nova ciência

tinha o potencial de conhecer muito mais o mundo. Essa nova ciência era capaz de gerar mais tecnologias que nos ajudassem a explorar o mundo.

De maneira que, quando Newton começou seu trabalho todo o vocabulário e as noções que tomaram a ciência moderna estavam todas formadas, mas separadamente. Seu grande papel foi juntar tudo isso em um sistema harmonioso, e universal, que fosse capaz de prever fenômenos e explicá-los. O trabalho de Newton na mecânica foi publicado muito antes de seus trabalhos sobre óptica, e seu uso prático permanece até hoje. Mas muito mais do que o sucesso da mecânica Newtoniana, ou do sucesso da *Óptica*, talvez o mais valioso legado científico de Newton tenha sido justamente o modelo de ciência que ele concretizou com a sua obra, que é a expressão do modelo de ciência que se construiu com Kepler e Galileu. Pois a mecânica, em seu desenvolvimento acadêmico, já foi superada pela nossa física contemporânea, mas o modelo de se fazer ciência ainda perdura. E este modelo não é mais apenas do uso da física, mas foi adotado, cada um à sua melhor forma, para todas as demais ciências exatas e algumas biológicas. Mesmo aquelas que não poderiam, por assim dizer, adotar tal modelo de ciência.

Reconhecido essa força do modelo newtoniano, meu esforço foi tentar mostrar um pouco da sua origem: quais foram os problemas que ele tinha de resolver na sua juventude, quais questões o levaram a novas formas de responder esses fenômenos e como eram as soluções por ele encontradas. Não tanto como era a solução, mas que tipo de características elas carregavam e qual objetivo as respostas tinham. E percebemos pela leitura que o compromisso, na mecânica, das respostas de Newton é matemático. Muito diferente do objetivo aristotélico que pensava em dar explicações até as causas finais dos fenômenos, onde necessariamente se entrava em um campo metafísico. O objetivo de Newton, ressaltado que na mecânica, era dar respostas o suficiente para que se pudesse formalizar matematicamente o problema e com isso pudesse ter previsibilidade sobre ele. Neste sentido, a função da física é muito mais prática, no seu sentido usual, do que na antiga física aristotélica, que tinha mais um sentido explicativo do que prático. O que tentei demonstrar foi que Newton não pensava em fazer uma “física mais usual” do que explicativa, sua intenção era a de elaborar um modelo que nos explicasse mais sobre os movimentos, mas por fazer isso sobre uma modulação matemática, junto a esse poder explicativo, a teoria ganha uma dimensão prática muito grande.

Já na *Óptica* o caminho percorrido pelo livro é muito mais experimental, mas sem abandonar determinadas noções matemáticas. Ao que podemos observar, Newton estava convencido de que as relações das operações matemáticas eram as mesmas relações dos fenômenos na natureza. Podemos observar que desde o seu primeiro texto que trata sobre o assunto, *Questionem quedam philosophicae*, passando pelas cartas à Oldenburg, até a elaboração da *Óptica*, o que há de principal em todos esses textos é a descrição de experimentos. No caso das cartas e do livro, são descrições de experimentos que corroboram as teorias de Newton. Mas são dadas em um caminho contrário: Newton descreve que fez os experimentos e chegou a essas conclusões mediante esses experimentos. Ou seja, fez os experimentos e chegou à conclusão de que a luz não era homogênea, mas heterogênea, por exemplo. No percurso da *Óptica*, Newton tem muito mais o teor de que partiu por um caminho de experimentação da natureza da luz do que pela testabilidade de proposições por ele construídas.

Temos aqui rapidamente apresentados os dois principais livros da carreira acadêmica de Newton. Assim como dito no início dessa dissertação, procurei apresentar os dois principais aspectos do modelo newtoniano de se fazer ciência, a matemática e a experimentação. O uso da matemática, no sentido de fazer uma aplicação das propriedades geométricas, principalmente, na descrição dos movimentos e da experimentação nos casos de fenômenos ópticos. E, desta forma, não melhor apresentada em virtude do tempo, temos os dois principais aspectos do modelo newtoniano de ciência, e mais do que isso, dois principais aspectos da nossa ciência contemporânea, desenvolvida ao longo de mais de 400 anos em suas menores partes.

## **Bibliografia.**

ABBAGNANO, N. (2007) *Dicionário de Filosofia*. Tradução de Alfredo Bosi & Ivone Castilho Benedetti. Editora Martins Fontes.

ARISTOTELES. (2006) *On the heavens*. Tradução de GUTHRIE, W.K.C. Loeb Classical Library.

BARBATTI, M. (1997) Conceitos físicos e metafísicos no jovem Newton: uma leitura do De Gratitatione. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência*, vol. 17, p. 59.

BARRA, E. S. O. (1995) Em que sentido Newton pôde dizer “hypothesis non fingo”. *Cadernos de Filosofia da Ciência (CLE/UNICAMP)* v. 5 n°1/2 p. 221-245.

BURTT, E. A. (2003) *Metaphysical foundation of modern science*. Dover Publications INC.

CHANDRASEKHAR, S. (1995) *Newton's Principia for the Common Reader*. Clarendon Press.

COHEN I. B. & SMITH. *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge University Press, 2002.

\_\_\_\_\_. & WESTFALL R. S. (2010) *Newton – Textos, antecedentes e comentários*. Tradução de Vera Ribeiro. Editora Contraponto.

CREW H. – (1928) *The rise of the Modern Physics*. Baltimore.

LEIBNIZ, G. – (1974) Coleção Os Pensadores. Editora Abril.

MACH, E. – (1921) *Die Mechanik in ihrer Entwicklung*. L.A. Brockhaus, 1921.

MOURÃO, R. R. F. (1995) *Dicionário Enciclopédico de Astronomia e Astronáutica*. Editora Nova Fronteira.

NEWTON, I. (1946) *Mathematical Principles of Natural Philosophy and his system of the world*. University of California Press.

\_\_\_\_\_. (1704) *Opticks* 1st. Edition.

\_\_\_\_\_. (1730) *Opticks*. 3rd. Edition.

\_\_\_\_\_. (1996) *Óptica*. Tradução de André Koch Torres Assis. Edusp.

\_\_\_\_\_. (1959) *The Correspondence of Isaac Newton*. Editado por TURNBULL, F.R.S. Cambridge University Press.

\_\_\_\_\_. (1984) *The Optical papers of Isaac Newton*. Editado por Alan E. Shapiro. Cambridge University Press.

\_\_\_\_\_. (2008) *Princípios matemáticos de Filosofia Natural*. Tradução de RICCI, T., Edusp.

\_\_\_\_\_. (1726) *Principia* (Terceira edição)

\_\_\_\_\_. (1687) *Principia*. (Primeira edição)

\_\_\_\_\_. (2010) *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*. – Coleção Folha Livros que mudaram o mundo.

SACROBOSCO, J. (2006) *Tratado da Esfera*. Traduzido e editado por Roberto Andrade Martins. UNICAMP Grupo de História e Teoria da Ciência. Disponível em: <http://ghc.ifc.unicamp.br/download/Sacrobosco-1478-trad.pdf>

STRONG, E. W. (1951) Newton's "mathematical way". In *Journal of the history of Ideas*, Vol. 12 N° 1, pp. 90-110.

WESTFALL, R. S. (1996) *Never at rest – A biography of Isaac Newton*. Cambridge University Press.