

ISAAC NEWTON (1642 - 1727)

1

Gil da Costa Marques

1.1 Breve Biografia

1.2 Obra

1.2.1 O Cálculo

1.2.2 Óptica e a Natureza Corpuscular da Luz

1.2.3 Os *Principia*

1.2.4 A Mecânica

1.2.5 Teoria da Gravitação

1.3 Conclusões

O material desta disciplina foi produzido pelo Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada (CEPA) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) para o projeto Licenciatura em Ciências (USP/Univesp).

Créditos

Coordenação de Produção: Beatriz Borges Casaro.

Revisão de Texto: Marcia Azevedo Coelho, Marina Keiko Tokumaru e Paulo Barroso.

Design Instrucional: Fernanda Diniz Junqueira Franco, Gezilda Balbino Pereira, Juliana Moraes Marques Giordano e Vani Kenski.

Projeto Gráfico e Diagramação: Daniella de Romero Pecora, Leandro de Oliveira, Priscila Pesce Lopes de Oliveira e Rafael de Queiroz Oliveira.

Ilustração: Alexandre Rocha, Aline Antunes, Benson Chin, Camila Torrano, Celso Roberto Lourenço, João Costa, Lidia Yoshino, Mauricio Rheinlander Klein e Thiago A. M. S.



1.1 Breve Biografia

Isaac Newton nasceu em 25 de dezembro de 1642 no paróquiado de Woolsthorpe, condado de Lincolnshire, na Inglaterra. Seu pai, John Newton, morreu três meses após seu nascimento. Assim, quando Newton tinha três anos, sua mãe, Harrieth, casou-se novamente, fazendo com que, a partir dessa idade, ele fosse morar com a avó materna. Sua dificuldade de relacionamento com os padrastos (sua mãe se casou mais uma vez) e com a própria mãe pode estar na origem do seu comportamento emocionalmente errático quando adulto.



Figura 1.1: Local de origem de Isaac Newton. / Fonte: Thinkstock

Foi educado primeiramente no The King's School e depois, a partir de 1660, no Trinity College, em Cambridge. Viveu ali, salvo por um período de dois anos, até 1696. Durante esse período, produziu seus trabalhos científicos.

Quando ele ingressou no Trinity College, essa escola era ainda impregnada pelo aristotelismo. Decidiu, então, educar-se cientificamente lendo obras mais recentes, como as de Galileu, Copérnico e Kepler. O primeiro livro científico adquirido por Newton era naquela época uma espécie de livro de cabeceira dos matemáticos: a famosa coleção de treze livros denominada *Elementos*, de Euclides. Ele considerou um tanto óbvias as proposições que se seguiam aos postulados e definições. Posteriormente, numa segunda leitura, já na graduação, reconsiderou a obra muito educativa. Leu em seguida *Geométrie*, de Descartes, achando-o de leitura difícil. Passou, assim, a se interessar primeiramente pela matemática. Interessou-se também, no início da sua formação como aluno de graduação, por *Optics*, de Kepler; *Logics*, de Saunderson; e *Arithmetica Infinitorum*, de John Wallis. Neste último texto, no qual fez várias anotações, Wallis apresenta resultados de problemas específicos do cálculo de áreas, o precursor do cálculo integral.

Enquanto estudava em Cambridge, Newton beneficiou-se do contato com Isaac Barrow. Enquanto este ensinava Óptica em Cambridge, Newton foi seu assistente (revisava as apostilas). Naquela época, Barrow dedicava-se também ao problema de determinar



Figura 1.2: Trinity College, Cambridge. / Fonte: Thinkstock

tangentes a curvas. Acredita-se que, ao estudar esse problema, ele tenha chegado muito próximo do processo de diferenciação. De qualquer forma, Barrow foi o primeiro a entender que a diferenciação e a integração são processos inversos um do outro. Essa é a base do teorema fundamental do cálculo.

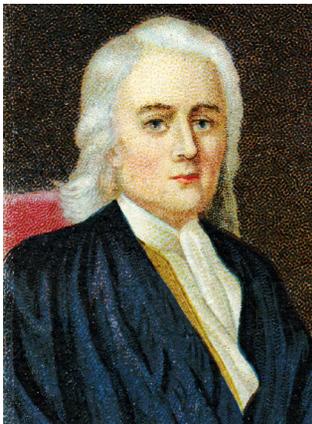


Figura 1.3: Isaac Newton.
/ Fonte: Thinkstock

Newton formou-se em 1665, mas sem nenhum destaque. Por causa da peste bubônica que assolou a Inglaterra, não pode continuar em Cambridge. Como consequência da peste, a Universidade de Cambridge ficou praticamente fechada de dezembro de 1665 a dezembro de 1667. Como muitos outros na Europa, Newton também trabalhou em casa nesse período. Foram para ele anos de grandes descobertas. Em particular, nesse período ele se dedicou ao polimento de lentes de formas geométricas diferentes da esférica. Aprendeu ainda sobre a decomposição da luz em diferentes cores. De acordo com Newton, “*nesses dias me iniciei na idade da invenção, pensei na matemática e na filosofia mais do que em qualquer outra época*”.

De volta a Cambridge em 1667, Newton conseguiu uma bolsa no Trinity College, o que lhe propiciou a oportunidade de fixar residência ali. No ano seguinte, obteve o título de mestre. Além da sua qualificação, Newton contou com a sorte, pois, ao aceitar uma honrosa indicação para servir como capelão do rei Carlos II, Barrow renunciou à cátedra Lucasiana de Cambridge (da qual foi o primeiro ocupante). Em reconhecimento ao talentoso jovem, Barrow indicou como seu substituto Newton, que se tornou professor da Universidade de Cambridge em 1669, aos 26 anos.

Ao completar 30 anos, foi eleito membro da recém fundada Royal Society. Não muito tempo depois disso, Newton envolveu-se numa série de disputas desgastantes. Uma das primeiras foi com Robert Hooke, curador da Royal Society.

Em 1678, Newton passou por sérios problemas emocionais. No ano seguinte, perdeu sua mãe e, a partir daí, tornou-se menos sociável. Cresceu seu interesse pela alquimia.

Com o lançamento dos *Principia*, em 1687, tornou-se o cientista mais influente do seu tempo e, a partir daí, devotou muito do seu tempo a questões de política pública. Como prenúncio da sua influência, quatro anos depois de publicar os *Principia*, Newton foi eleito duas vezes membro do Parlamento inglês, como representante da universidade: de 1689 a 1690 e em 1701. Está registrada apenas uma manifestação sua. Nela, Newton reclamava do frio na Câmara, ocupada por ele no Parlamento, e pedia que fechassem uma janela.

No fim do ano de 1692, e ao longo de dois anos, Newton foi acometido de uma doença que o levou a sofrer de insônia e de instabilidade emocional. Como resultado, afirmam historiadores, ele perdeu parte da sua agilidade mental e a disposição para tomar iniciativas de cunho científico.

Aceitando uma indicação política para atuar como guardião da Casa da Moeda, Newton mudou-se para Londres em 1696, onde se mostrou um bom administrador. Considera-se que a aceitação dessa indicação e a subsequente promoção como mestre da Casa, em 1699, contribuiu para o encerramento das suas investigações científicas. Assim, em 1701, Newton renunciou à cátedra Lucasiana da Universidade de Cambridge.

Depois que se mudou para Londres, Newton passou a usufruir do prestígio adquirido após a publicação da sua obra-prima e a desfrutar das vantagens do poder. Em 1703, foi eleito presidente da Royal Society e reeleito várias vezes até sua morte, em 1727. Exerceu de forma tirânica e autocrática os seus sucessivos mandatos. Fez uso da Royal Society no sentido de alinhá-la de acordo com seus interesses.

Em 1705, foi sagrado cavalheiro. A partir de então, passou a ser chamado Sir Isaac Newton. Nessa nova fase da vida, Newton devotou muito tempo à teologia, tendo escrito longos textos sobre as profecias bíblicas, especialmente as de Daniel, e sobre escatologia, principalmente com base no livro bíblico do Apocalipse.

Segundo seus biógrafos, Newton era uma pessoa isolada, absorto em seus pensamentos e não muito agradável no que diz respeito ao seu comportamento no ambiente de trabalho. Envolvia-se frequentemente em controvérsia com seus colegas professores, disputando prioridade sobre algumas ideias. Suas contrariedades no meio acadêmico teriam contribuído para o adiamento da publicação de suas ideias, o que aconteceu apenas duas décadas depois, por estímulo de Halley.

A querela científica de maior repercussão e também a mais duradoura (cerca de duas décadas) envolveu Newton e Gottfried Wilhelm Leibniz, em consequência da demora nas publicações. Como se sabe, ambos reivindicaram a criação do cálculo. Newton concebeu o cálculo antes de Leibniz, mas este publicou primeiro. Leibniz iniciou suas publicações em 1684, menos de vinte anos depois dos trabalhos iniciais de Newton sobre o tema.

1.2 Obra

Newton dedicou o seu tempo à investigação de várias ciências. Por exemplo, foi um alquimista ao longo de quase três décadas. Escreveu sobre História, Teologia, e Profecias. Escreveu cerca de 1,3 milhões de palavras (equivalentes a cerca de 20 livros) sobre assuntos bíblicos e teologia. Procurou conciliar ciência com religião.

Na área científica, identificamos quatro grandes contribuições de Newton: o cálculo diferencial e integral; a natureza corpuscular da luz (que é a teoria vigente hoje); a formulação da **Dinâmica e a Teoria da Gravitação Universal**.

Newton teria concebido o cálculo infinitesimal durante os anos da peste. Nesse mesmo período, estabeleceu os fundamentos da teoria da luz e das cores e iniciou seu trabalho sobre o movimento dos planetas. Os resultados sobre esse último tópico foram publicados posteriormente nos *Principia* (em 1687). Foram seus anos mais criativos, especialmente nas contribuições à matemática.

Em 1666, ele descobriu o teorema binomial – ou binômio de Newton, como é conhecido hoje – e desenvolveu métodos para a expansão de funções em termos de uma série infinita. Na matemática, além do binômio e sua versão generalizada para qualquer expoente, Newton descobriu as *identidades de Newton*. No seu *Cubic Curves* (apêndice do *Opticks*), classificou as **curvas cúbicas** (polinômios de terceiro grau em duas variáveis), enumerando 72 das 78 formas possíveis de uma curva cúbica. Na *Arithmetica Universalis*, estão contidas várias outras contribuições referentes ao estudo das funções, a demonstração de que as raízes complexas de uma equação real aparecem aos pares de números conjugados, limites para o número de raízes complexas de uma função polinomial e outros resultados.

Seus trabalhos, publicados sob a forma de livros, em ordem cronológica, foram os *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, sua obra-prima, consistindo de três volumes e publicada em 1687; o *Opticks*, no qual ele tratava, no apêndice, das curvas cúbicas e do método dos fluxos, de 1704; a *Universal Arithmetic* (1707); the *Analysis per Series, Fluxiones* etc. e os *Methodus Differentialis* (1711); e as *Lectiones Opticae* (1729). O manuscrito sobre fluxos, *The Method of Fluxions*, foi traduzido por J. Colson e publicado em 1736. Finalmente, o seu *Geometrica Analytica* foi impresso apenas em 1779, no primeiro volume da edição de Horsley dos trabalhos de Newton.

Fica evidente que Newton não tinha pressa em publicar seus resultados. Exceto pelos *Principia*, seus trabalhos foram publicados muito tempo depois de completados. E isso depois de muita insistência de seus amigos e admiradores, como Barrow e Halley. Por exemplo, sua contribuição mais importante na matemática, o *Method of Fluxions* (o cálculo diferencial, ficou pronto em 1671, mas só foi publicado em 1736).

1.2.1 O Cálculo

A invenção do cálculo infinitesimal figura como uma das grandes realizações intelectuais do século XVII, tendo sua utilização ampliada, desde então, para várias áreas do conhecimento.

Já no ano em que se formou, em 1665, Newton apresentou os primeiros resultados sobre o cálculo dos fluxos (*fluxions*, em inglês). Beneficiou-se de desenvolvimentos anteriores nessa área, notadamente os de Wallis e Barrows. Disse certa vez que, se ele havia conseguido ir mais longe que outros, era porque tinha se apoiado nos ombros de gigantes. Parece ser o caso em relação ao cálculo. Em 13 de novembro de 1666, ele utilizou o método dos fluxos para determinar a tangente e o raio de curvatura de uma curva num ponto.

Para definir, de forma precisa, o conceito de taxa de variação de uma grandeza – conceito essencial na descrição do movimento, uma vez que nele falamos de variações da distância percorrida com o tempo (velocidades) e variações da velocidade no tempo (acelerações) –, Newton criou o cálculo infinitesimal. Envolveu-se numa desgastante e controversa disputa com Leibniz a propósito do crédito pela criação do cálculo infinitesimal.

Quando uma grandeza física y depende de outra, designada por x , de forma que uma variação de x acarreta uma variação da primeira, dizemos que a grandeza y é uma função de x . Representamos tal dependência utilizando a notação $y = y(x)$. À grandeza variável, denominada y , Newton deu o nome de “fluente” (ou seja, algo que flui, ou varia). À taxa de variação, deu o nome de “fluxo do fluente”, ou simplesmente “fluxo”. Utilizou a notação para o fluxo do fluente y como sendo \dot{y} e o fluxo do fluxo do fluente (a segunda derivada) como \ddot{y} . Estabeleceu, assim, a diferença entre tipos de fluxos. Ao primeiro, já definido, deu o nome de fluxo principal.

Introduziu, no seu método, o conceito de “momento do fluente” como sendo sua variação quando variamos a grandeza física da qual ele depende por uma quantidade infinitesimal. Se variarmos x por uma quantidade o (dx na linguagem de hoje), o momento do fluente será dado por $\dot{y}o$.

Newton lidou com duas classes de problemas. A primeira poderia ser classificada como os relacionados à determinação de derivadas (ou fluxos) de funções. Na segunda, ele analisa o problema inverso, a saber, determinar o fluente a partir do fluxo. Trata-se do problema de determinar a primitiva, no cálculo integral, de uma função.

O método concebido por Newton partia do pressuposto de que todas as figuras geométricas poderiam ser pensadas como sendo geradas por movimentos contínuos. Ou seja, pode-se escrever uma curva, por exemplo, como função de um parâmetro e pensá-lo como se fosse o tempo. Foi com base nessa ideia de um tempo que flui que ele introduziu os conceitos de fluente (para as grandezas dependentes do tempo) e o de fluxo do fluente (para a taxa de variação instantânea). A velocidade seria o fluxo do fluente – no caso, a posição do objeto. Alguns vêem nisso um dos primeiros indícios da ideia de uma função contínua.

Newton continuou investigando uma série de notáveis aplicações do seu método dos fluxos. Em particular, analisou a questão dos máximos e mínimos de funções, tangentes a curvas, raios de curvatura de uma curva por um ponto.

1.2.2 Óptica e a Natureza Corpuscular da Luz

Ao ser contratado pela Universidade de Cambridge, Newton já havia feito algumas descobertas na área da óptica. Esse era um tema de grande interesse na época. Suas pesquisas levaram-no a dar aulas sobre esse tema entre 1669 e 1671. Já antes da sua contratação, quando voltou a viver em Woolsthorpe nos anos da peste, interessou-se pelo fenômeno das cores e do arco-íris. Os principais resultados das suas pesquisas sobre o tema foram publicados em 1672, na forma de um artigo na revista *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Diferentemente de outros trabalhos, esses resultados foram tornados públicos com relativa rapidez.

Newton tinha uma grande habilidade como físico experimental. Enquanto se mantinha em casa, realizou várias experiências. A mais famosa – o *experimentum crucis* – consistia em fazer um feixe de luz solar passar por uma pequena abertura e, em seguida, por um prisma. Verificou que a luz se decompunha em várias cores. Descobriu a dispersão da luz. Em seguida, selecionava um feixe de uma das cores (verde, por exemplo) e o fazia passar por um segundo prisma. Observou que o segundo feixe, de uma dada cor, não poderia mais ser separado. O disco de Newton serve para mostrar o efeito oposto, isto é, que a luz branca pode ser vista como uma soma de várias cores.

De acordo com ele,

As cores não são qualificações da luz, derivadas das refrações ou reflexões dos corpos naturais (como se acredita geralmente); são propriedades originais e inatas que diferem em raios diferentes. Alguns raios tendem a apresentar uma cor vermelha e nenhuma outra, outros uma cor amarela e nenhuma outra, outros uma cor verde e nenhuma outra, e assim por diante. Não há apenas raios próprios e particulares às cores mais dominantes, e sim todas as suas gradações intermediárias.

NEWTON, Isaac. *Óptica*. 1ª edição. Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

Essas palavras de Isaac Newton (1642–1727) foram escritas em seu primeiro trabalho publicado, dois meses depois que ele completou 29 anos.

Outra descoberta notável de Newton está associada ao fenômeno da interferência da luz. Trata-se aqui dos “anéis de Newton” e as cores exibidas por filmes finos. Observou que a luz, ao passar por uma lente convexa apoiada sobre uma placa de vidro, produz anéis concêntricos coloridos (os anéis de Newton).

Verificou experimentalmente que existe uma periodicidade no comportamento dos anéis coloridos e escuros, que ele atribuía ao comprimento dos espaçamentos entre o vidro e a lente.

Newton era um defensor da teoria corpuscular da luz. Ele procurou explicar os fenômenos da reflexão e refração da luz com base nessa teoria. No entanto, tinha dificuldades para explicar outro fenômeno ao qual dedicou algum tempo: a difração. De acordo com Newton:

Pois é evidente que a luz consiste em partes, tanto sucessivas como contemporâneas, porque no mesmo lugar podemos deter a que chega em dado momento e deixar passar a que chega imediatamente depois; e ao mesmo tempo podemos detê-la em qualquer lugar e deixá-la passar em qualquer outro. Pois a parte da luz que foi detida não pode ser a mesma que deixemos passar. Denomino raio de luz, ou propagada sozinha, ou fazer ou sofrer qualquer coisa sozinha, que o restante da luz não faz ou não sofre.

NEWTON, Isaac. *Óptica*. 1ª edição. Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

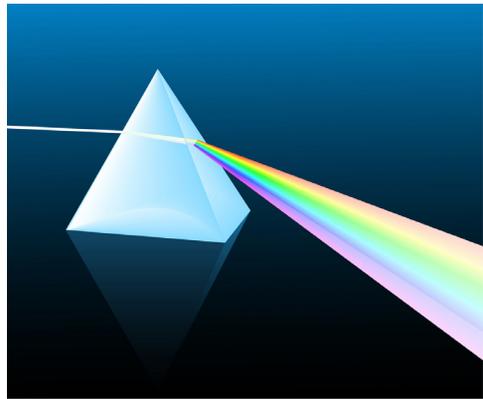


Figura 1.4: Dispersão da luz através do prisma.
/ Fonte: Thinkstock

Dedicou algum tempo à construção de um telescópio refrator acromático. Depois de desistir, decidiu construir um telescópio refletor, no que foi bem-sucedido. Esse tipo de telescópio recebe ainda hoje o nome de telescópio de Newton. Em 1672, construiu também um microscópio refletor e, alguns anos mais tarde, o sextante.

O seu livro *Optiks* contém uma série de resultados experimentais. Foi e continua sendo a obra mais lida de Newton. Na parte I do livro III, Newton estuda, entre outras coisas, a difração. Usava o nome de “inflexão” da luz, palavra cunhada por Hooke para designar tal fenômeno. O livro começa fazendo referências aos trabalhos de Grimaldi, que usava a palavra difração para designar esse fenômeno. Ele termina com uma exposição sobre as suas ideias do atomismo. O problema da difração, no entanto, só foi abordado a partir da publicação dos *Principia*.

A sua teoria corpuscular experimentou objeções por parte de Robert Hooke e Christiaan Huygens, os quais se alinhavam com os defensores da teoria ondulatória da luz.

1.2.3 Os *Principia*

A obra-prima de Newton é um conjunto de três volumes publicados com o título de *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*. Nessa obra, como o nome indica, ele aplica a matemática no estudo dos fenômenos naturais. Os dois primeiros volumes são voltados para o estudo do movimento. O terceiro deles, *O Sistema do Mundo*, versa sobre a gravitação universal.

A história desse livro pode ser iniciada com uma segunda visita de Halley a Cambridge, em novembro de 1684. Nessa ocasião, Halley havia tomado conhecimento do manuscrito prometido por Newton, quando de sua visita em agosto do mesmo ano, com o título de *De Motu*. Halley ficou tão entusiasmado que insistiu com Newton, e muito, para que comunicasse esses resultados à Royal Society. Esse trabalho continha partes essenciais do livro I dos *Principia*, bem como três proposições do livro II.

O manuscrito dos *Principia* ficou pronto em 1685. Correções no texto consumiram mais algum tempo. Assim, atendendo ao apelo de Halley, ele apresentou os *Principia* à Royal Society em 1686.

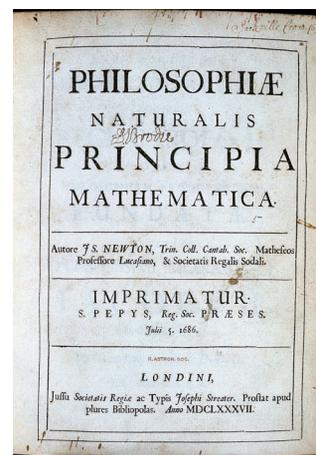


Figura 1.5: Livro *Principia*.

/ Fonte: [Thinkstock](#)

O livro foi muito bem recebido na comunidade científica. Mas por pouco não teve suprimida sua última parte, sobre a teoria da gravitação. Tudo porque Hooke gostaria que algum crédito fosse dado a ele em relação ao comportamento da gravitação com o quadrado da distância, fato que descobrira antes de Newton e que lhe comunicara numa correspondência trocada com ele entre 1679 e 1680. Newton ameaçou não apresentar os *Principia* à Royal Society. Praticamente se retirou da Society até a morte de Hooke, em 1703, e jamais mencionou a contribuição dele. Não por acaso, a publicação do seu *Optiks* só ocorreu em 1704.

O primeiro livro dos *Principia* considera o movimento das partículas quando sob a ação de forças, conceito esse claramente definido. Estabeleceu assim as bases da Dinâmica do movimento. Na introdução da versão dos *Principia* de 1687, Newton estabeleceu que a estática, até então uma ciência à parte, seria um caso particular da Dinâmica.

No segundo livro dos *Principia*, Newton dedica-se ao estudo de uma partícula num meio viscoso, à hidrodinâmica e a uma situação especial denominada hidrostática. Lidou ainda nesse volume com a análise de fenômenos ondulatórios (a propagação de ondas), a acústica (determinação da velocidade do som) e o fenômeno das marés.

No livro III, propõe que existe um poder gravitacional que se estende a todos os corpos. Essa força seria proporcional às “quantidades de matéria” que eles contêm, e é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Essa ideia, como apontado antes, parece ter-se originado no ano de 1666.

Nas suas demonstrações, procurou fazer uso da geometria clássica, recorrendo a poucas ilustrações e explicações. Fez uso de resultados clássicos, especialmente os de Apolônio sobre as cônicas. Com isso, o seu texto é de uma leitura muito difícil. Os estudiosos reuniram evidências mostrando que ele fez uso dos fluxos, o cálculo diferencial, até o ponto de poder traduzir os resultados em termos de conceitos geométricos. Como o cálculo era desconhecido, preferiu apresentar os resultados em termos de conceitos muito bem conhecidos, sendo, portanto, inteligíveis à época. No entanto, os *Principia* são escritos numa linguagem considerada arcaica e ininteligível para os padrões de hoje.

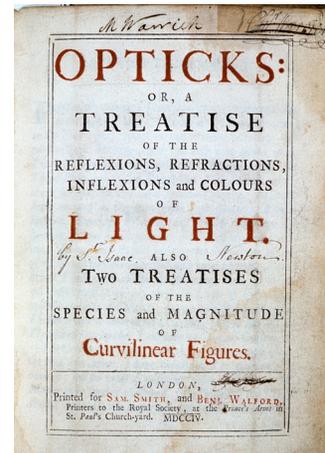


Figura 1.5: Livro *Optiks*.
/ Fonte: Thinkstock

1.2.4 A Mecânica

No livro I dos *Principia*, Newton faz uma introdução na qual fala sobre a ciência da Mecânica, que, de acordo com ele, fora tratada até então por meios racionais e práticos. As pesquisas que levaram aos resultados apresentados nessa obra foram desenvolvidas principalmente ao longo de três períodos. Os dois anos da peste bubônica (1664–1666), os dois anos nos quais se correspondeu com Hooke, e nos três anos seguintes a uma das visitas de Halley a Newton, no ano de 1684.

A formulação da Dinâmica é baseada em oito definições e três axiomas. A estes últimos damos hoje o nome de Leis de Newton do movimento. Em seguida, Newton apresenta, passo a passo, proposições, problemas e teoremas.

Sem procurar dar uma explicação para a origem das forças, entendeu que a força é o agente responsável pelo movimento e que ela é uma grandeza mensurável. De acordo com a quarta das suas oito definições, temos:

Uma força impressa é uma ação exercida sobre um corpo para mudar seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta. Essa força só existe enquanto dura a ação.

Definiu massa (sua primeira definição) da melhor maneira que pôde:

A quantidade de matéria é a medida da mesma, resultando da densidade e do volume conjuntamente.

Definiu ainda a quantidade de movimento:

A quantidade de movimento é a medida do mesmo, resultando da velocidade e da quantidade de matéria conjuntamente

E a “*vis insita*”, que definimos hoje como força de inércia:

A “*vis insita*”, ou força inata da matéria, é um poder de resistência, pelo qual cada corpo, por quanto de si depender, continua no seu estado presente, seja de repouso ou de movimento para diante em linha reta. Essa “*vis insita*” é também chamada força de inércia (“*vis inertiae*”).

As outras quatro definições apresentadas no livro I referem-se à força centrífuga. Não são muito claras. Numa delas, afirma que “a quantidade absoluta de uma força centrífuga é a medida da mesma, proporcional à eficiência da causa que a propaga do centro pelo espaço em redor”.

Em seguida, Newton enuncia seus três axiomas (o que se admite sem demonstrações), as suas leis da Dinâmica, conhecidas hoje como leis de Newton:

Cada corpo continua no seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, salvo se for compelido a mudar este estado por forças sobre ele impressas.

A mudança do movimento é proporcional à força motriz impressa, e é feita na direção em que a força é impressa.

A toda ação corresponde uma reação igual oposta, ou: as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas de lados contrários.

Em seu livro, Newton deduz seis corolários:

1. Um corpo, ativado simultaneamente por duas forças, descreverá a diagonal do paralelogramo no mesmo tempo em que descreveria os lados pelas forças separadamente.
2. E daí fica explicada a composição de uma força direta AD, a partir de duas forças oblíquas AC e DC; e, inversamente, a resolução de qualquer força direta AD em duas forças oblíquas AC e CD, cuja composição e resolução são abundantemente confirmadas pela Mecânica.
3. A quantidade de movimento, que se obtém tomando a soma dos movimentos dirigidos para as mesmas partes, e as diferenças dos que são dirigidos para partes contrárias, não sofre variação pela ação dos corpos entre si.

4. O centro de gravidade comum a dois ou mais corpos não altera seu estado de repouso ou movimento pelas ações dos corpos entre si; e, portanto, o centro da gravidade comum a todos os corpos agindo uns sobre os outros (excluindo ações externas e empulhos) está em repouso ou se move uniformemente em linha reta.
5. Os movimentos mútuos dos corpos incluídos num certo espaço são os mesmos, quer o espaço esteja em repouso ou se mova uniformemente para diante em linha reta sem nenhum movimento circular.
6. Se corpos, movendo-se de qualquer modo entre si mesmos, são impelidos na direção de linhas paralelas por forças aceleradoras iguais, continuarão todos a se mover entre si, do mesmo modo como se fossem impelidos por tais forças.

1.2.5 Teoria da Gravitação

Logo depois de formado, já em casa, Newton passou a se interessar pelos problemas da gravitação. Assim, conta-se que, no ano de 1666, ele teria inquirido sobre a queda de uma maçã enquanto descansava na fazenda da sua família em Woolsthorpe. Não se sabe se esta é outra história fantasiosa sobre a gravitação, ou não. De qualquer forma, o testemunho de Newton não deixa dúvida sobre quando ele teria iniciado o seu interesse por esse problema. Afirma ele: “*Naquele ano comecei a pensar na ideia de estender o efeito da gravidade para a órbita da Lua*”.

Seus pensamentos em relação à órbita da Lua podem ser resumidos em dois bons argumentos e numa excelente ideia.



Figura 1.7: Ilustração de Newton e a maçã.
/ Fonte: Thinkstock

Primeiramente, isso lhe permitiu entender que o movimento circular uniforme é, de fato, acelerado. Não fosse por isso, e de acordo com a lei da inércia, o móvel sairia pela tangente. Nessa ótica, pode-se dizer que a Lua cai continuamente sobre a Terra sem, contudo, jamais atingi-la. Isso porque a lua é continuamente atraída pela Terra por meio da força gravitacional.

Consideremos a Lua descrevendo um movimento circular de raio R_{lua} , e que esta esteja, num certo instante de tempo, numa posição designada por P (vide figura). Sem a existência de uma força, a Lua sairia pela tangente atingindo um ponto P' depois de um intervalo de tempo Δt , intervalo esse admitido como sendo muito pequeno. No entanto, como o movimento é

circular, ela se desvia em direção à Terra atingindo um ponto P sobre a circunferência. A Lua estaria acelerada na direção radial. Newton concluiu, com base em argumentos simples de geometria, que a aceleração (centrípeta) seria dada pela expressão:

$$a_{lua} = \frac{v^2}{R_{lua}} \quad 1.1$$

onde v é a velocidade da Lua em seu movimento em torno da Terra.

Como esse movimento é acelerado, o movimento circular requer uma força para se manter nessa órbita. Para estabelecer uma expressão para a dependência da força em relação à distância, bastaria comparar as forças exercidas pela Terra sobre os mais diversos objetos atraídos por ela.

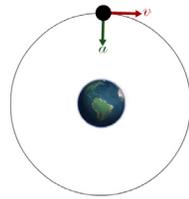
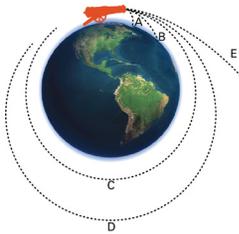


Figura 1.8: Canhão Orbital de Newton.

Para tal, desenvolveu o raciocínio de que a mesma força que atrai os objetos na superfície terrestre atrai a Lua. Passou, assim, a suspeitar ainda bem cedo da universalidade da gravitação. De fato, num dos seus escritos encontra-se uma ilustração parecida com aquela da **Figura 1.8**, representando o “canhão orbital de Newton”.

Nela, Newton desenvolve o raciocínio de que, se atirmos um objeto imprimindo a ele uma velocidade cada vez maior, ele atinge distâncias cada vez maiores. Podemos, assim, imprimir uma velocidade suficientemente grande para que ele não caia sobre a Terra. Atingiríamos uma velocidade tal que sua órbita seria circular. Para velocidades maiores que essa, sua órbita seria elíptica. Assim, a mesma força que impulsiona os objetos em direção ao centro da Terra pode manter a Lua orbitando em torno da Terra.

Imaginemos agora o caso do Sol. Sendo sua massa maior do que a massa da Terra, ele pode atrair os planetas. Essa atração faria com que eles orbitassem em torno do Sol, descrevendo órbitas elípticas ou circulares.

Tendo desenvolvido o raciocínio de que o movimento circular requer uma força para se manter nessa órbita, Newton pensou na hipótese de que ela variaria com o quadrado da distância. Para constatar a veracidade desse raciocínio, Newton comparou a aceleração da Lua com a aceleração dos objetos na superfície terrestre.

Levando-se em conta uma relação simples entre a velocidade e a velocidade angular, Newton percebeu que seria possível escrever tal aceleração em termos do período do movimento circular (T), de acordo com a expressão:

$$a_{lua} = \frac{v^2}{R_{lua}} = \omega^2 R = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R_{lua} \quad 1.2$$

A partir da distância da Lua (R_{lua}) e do período $T = 27,3$ dias, Newton concluiu que as acelerações dos objetos na superfície terrestre e a aceleração da Lua são inversamente proporcionais às distâncias até o centro da Terra. Ou seja:

$$\frac{a_{lua}}{a_{terra}} = \frac{a_{lua}}{g} = \left(\frac{R}{R_{lua}}\right)^2 \quad 1.3$$

E, portanto, a mesma força que age sobre uma maçã poderia manter a Lua em movimento.

Na realidade, os primeiros cálculos não foram muito animadores, pois, sendo a distância entre a Terra e a Lua cerca de 60 vezes o raio da Terra, a relação acima daria $1/3600$. O valor que Newton utilizou para o raio da Terra foi muito menor que o real, e ele obteve a relação de $1/4000$. Considerou esse resultado “muito bom”, mas, a despeito disso, engavetou o resultado e abandonou o problema. Em 1682, tomou conhecimento dos resultados experimentais de Picard sobre o comprimento de um grau de um Meridiano. De posse de melhores resultados sobre o raio da Terra, percebeu que sua ideia original de 1666 estava correta.

Mais ou menos 14 anos mais tarde, a investigação sobre os movimentos planetários foi reiniciada. Isso ocorreu depois de uma correspondência trocada com Hooke, iniciada em novembro de 1679. Em seu *Attempt to Prove the Motion of the Earth* (1674), Hooke defendia a ideia de uma força entre o Sol e os planetas que variasse de acordo com o quadrado da distância. Em 1679, escreveu a Newton falando dessa ideia. Por iniciativa de Newton, essa correspondência foi encerrada cerca de um ano depois.

A questão sobre o comportamento da força da gravidade em relação à distância era um tema no qual estavam interessados, além de Hooke, Huygens, Halley e Wren. Descobriram que se poderia deduzir a terceira lei de Kepler para os movimentos planetários se admitissem movimentos circulares e que sobre eles agiria uma força que varia com o inverso do quadrado da distância. Por outro lado, não sabiam como deduzir que, sob o efeito da mesma força, as órbitas poderiam também ser elípticas.

Em agosto de 1684, Halley trouxe o problema para Newton. Ao ser perguntado sobre qual seria a órbita de um planeta sob a ação de uma força atrativa e que variasse com o inverso do quadrado da distância, Newton respondeu de pronto que seria uma elipse. Teria demonstrado isso cerca de cinco anos antes. Não sabia como encontrá-la naquele momento, mas prometeu enviá-la em seguida. E isso aconteceu cerca de quatro meses depois. Com esse propósito, Newton produziu uma pequena monografia com o título de *De Motu*, em 1684. Esse trabalho foi a semente do *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

Na mecânica do ponto estabelecida por Newton, as órbitas elípticas valeriam para interações entre objetos puntiformes. Assim, o primeiro problema com o qual se deparou foi o de provar que objetos extensos e esféricos como o Sol podem ser tratados, para os pontos fora dele, como se toda a massa estivesse concentrada no seu centro. Newton fez essa descoberta no ano de 1685. Estava, assim, em condições de aplicar suas leis ao estudo do movimento dos planetas em torno do Sol.

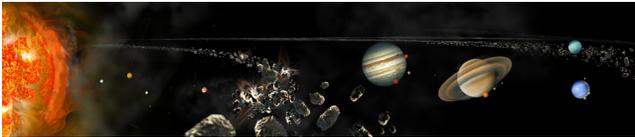


Figura 1.9: Movimentos dos planetas em torno do Sol.

Munido das suas leis apresentadas no primeiro volume, procurou aplicá-las aos principais fenômenos associados ao sistema solar. Assim, analisou o movimento sob a ação de uma força central (que chamava de “centrípeta”), tendo concluído aí a demonstração da primeira lei de Kepler. Provou ainda que uma partícula se movendo sob a ação de uma força central, variando com o inverso da distância até o centro de forças (o foco), teria uma trajetória que poderia ser uma das cônicas (talvez estivesse pensando apenas na elipse).

Em seguida, procurou determinar as massas e as distâncias dos planetas, bem como, sempre que possível, dos seus satélites. Estudou ainda o movimento da Lua e formulou a teoria das marés. Estudou ainda o fenômeno dos cometas, tendo proposto a esse respeito que eles pertenceriam ao sistema solar. Explicou como determinar a órbita de um cometa a partir da determinação de três pontos dessa órbita.

Na segunda edição do livro, Newton abordou o problema da precessão dos equinócios e confirmou experimentalmente a “Teoria dos Cometas”.

Credita-se à influência de Halley e ao seu tato em lidar com o colega o fato de Newton ter redobrado, a partir dessa visita de 1684, o seu interesse pelo problema da gravitação. Além disso, incentivou Newton a publicar os resultados na Royal Society, publicação essa que ocorreu em julho de 1687. Newton reconheceu, na introdução ao seu livro, o importante papel desempenhado por Halley.

Tendo em vista a necessidade de resolver o problema dos objetos esféricos extensos, o terceiro livro consumiu um tempo próximo de um ano a mais.

1.3 Conclusões

Newton figura como um dos maiores cientistas da história da humanidade. Foi ao mesmo tempo um grande teórico e um grande físico experimental. Estabeleceu os fundamentos da mecânica e a percepção, ainda hoje prevalente, do caráter universal da gravitação e das leis da Física. Lagrange referia-se aos *Principia* como a maior realização do intelecto humano.

Todas as leis físicas são escritas como taxas de variação. Assim, o cálculo é o instrumento matemático mais utilizado na formulação das leis que governam os fenômenos naturais.

A despeito da limitação da validade das leis da mecânica, elas descrevem, e muito bem, os fenômenos do cotidiano. A Lei da Gravitação Universal tem igualmente um alcance limitado. Não perdeu, no entanto, sua validade na descrição de uma ampla classe de fenômenos.

Assim, quer sejam exatas (como o cálculo) ou boas aproximações, como é o caso da Dinâmica Newtoniana e a Teoria da Gravitação Universal, as contribuições de Newton não perderam sua atualidade.