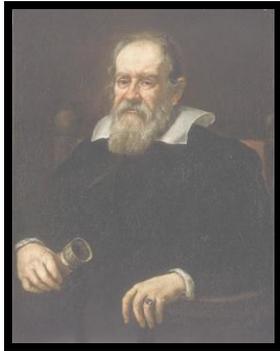


GALILEU AVALIADO POR NEWTON

Fernando Luiz Lobo B. Carneiro



GALILEU



NEWTON

Introdução

Analisar o papel relativo de Galileu e de Newton na história da Mecânica é de fato uma das melhores maneiras de comemorar o grande feito de Newton. Newton, ao realizar sua grande síntese, unificando as três leis de Kepler na lei da gravitação universal, e identificando a gravidade terrestre com a gravitação universal, conquistou glória imorredoura. Com grande modéstia e honestidade intelectual, soube valorizar sua dívida para com seus antecessores, especialmente Galileu e Huygens. A Galileu atribuiu os dois primeiros princípios e as leis da queda dos corpos e da trajetória dos projéteis. Na realidade coube a Newton a formulação correta do segundo princípio, graças à introdução do conceito da massa, inexistente em Galileu. Seguindo as indicações do próprio Newton, procuraremos apresentar uma avaliação correta das contribuições dos dois grandes cientistas à história da Mecânica.

O Papel Individual dos Cientistas na História da Ciência

Comemorou-se ano passado em todo o mundo, o 300^o aniversário da publicação, em 1687, dos *Philosophiae naturalis principia mathematica*, de Newton.¹ Em 1988 completam-se os 350 anos de publicação, em 1638, dos *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, de Galileu². Essas duas obras, e mais o *Horologium Oscillatorium*, de Huygens, de 1663, constituem a base sólida sobre a qual se ergueu a Dinâmica, com desenvolvimentos posteriores, como os realizados no século 18 pelos Bernoulli e por Euler, d'Alembert e Lagrange, até chegar-se, no século 20, à mecânica relativística, com Einstein.

A avaliação do papel desempenhado na história da ciência pelos *Discorsi* de Galileu e pelos *Principia* de Newton tem passado por oscilações, que vão deste uma admiração exagerada, carente de espírito crítico e muitas vezes ingênua, a uma excessiva e por vezes mesquinha preocupação em diminuir os méritos dos dois grandes cientistas, através da exaltação de discutíveis precursores medievais e da crítica unilateral de seus erros e imprecisões.

DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
intorno à due nuove scienze

Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI,
del Signor
GALILEO GALILEI LINCEO,
Filosofo e Matematico primario del Serenissimo
Grand Duca di Toscana.

Con una Appendice del centro di gravità d'alcuni Solidi.



IN LEIDA,
Appresso gli Elsevirii. M. D. C. XXXVIII.

1638

Tanto Galileu como Newton foram também acusados de terem sido beneficiados pela sorte, fazendo descobertas que eram puramente questões de tempo, isto é, que já estavam de tal modo preparadas pela evolução anterior da ciência que teriam sido realizadas, na falta deles, por outros cientistas contemporâneos, de valor igual ou até mesmo superior.

Parece-me que a posição justa a adotar, entre estas duas atitudes extremadas, é a que foi definida por Ludovico Geymonat, em sua biografia *Galileo Galilei* (3, p. 64, 65):

Que as descobertas fossem “puramente questão de tempo” parece-me uma afirmação, sem mais, aceitável. Note-se porém que a mesma observação pode ser repetida para todas as descobertas científicas, tanto para as de natureza experimental quanto para as de natureza teórica. Basta lembrar que a descoberta do cálculo infinitesimal, que constitui um dos maiores títulos de glória de Newton, tem, como hoje sabemos, seus antecedentes imediatos nas pesquisas de Cavalieri, Torriceli, Fermat, Pascal, Barrow, etc. . . , de modo que, para sermos rigorosos, seria exato afirmar que resultou do fruto mais de um século que de um homem. E isso é tão verdadeiro que o mesmo cálculo foi redescoberto por Leibniz pouco depois e independentemente de Newton, e que ambos puderam sustentar — substancialmente de boa fé — que eram os verdadeiros idealizadores desse novo e importante ramo da matemática. A realidade é que mesmo a mais genial invenção não é jamais fruto de um indivíduo isolado, mas sempre de um pesquisador que atua em uma civilização bem determinada; **o que não impede que tenha sido precisamente esse pesquisador, e não outro, a realizá-la, e que portanto corresponde a ele um mérito especial, distinto daquele mérito especial, distinto daquele mérito genérico que corresponde à cultura na qual se formou.**

A avaliação da participação relativa de Galileu e de Newton na fundação da Dinâmica tem também dado lugar a atitudes unilaterais e até mesmo passionais. De um lado os admiradores incondicionais de

Galileu tendem a atribuir-lhe a autoria exclusiva de certas descobertas para as quais contribuiu apenas de modo parcial, e que foram mais tarde formuladas de modo mais preciso e mais completo por Newton. De outro lado certos autores tendem a ignorar completamente as contribuições de Galileu, atribuindo tudo a Newton, como se antes de Newton nada tivesse ocorrido no domínio da Dinâmica.

Galileu Avaliado por Newton

Galileu, no parágrafo introdutório da *Giornata prima* dos *Discorsi*, reconhece que muito aprendeu com os artesãos do Arsenal de Veneza, “muitos dos quais se tornaram altamente competentes e hábeis nas explicações, seja pelas observações feitas por seus antecessores, seja por sua própria experiência cotidiana”. Da mesma forma Newton e em diversas partes dos *Principia* se refere, com grande modéstia, às contribuições de seus antecessores, e muito especialmente às de Galileu, Newton disse que se apoiou “sobre os ombros de gigantes.” Neste trabalho procuraremos apresentar a avaliação feita por Newton do papel desempenhado por Galileu na história da Mecânica.

No *Scholium* dos Axiomas ou Leis do Movimento, Newton afirma o seguinte:

Até aqui enunciei princípios que foram aceitos por matemáticos e são abundantemente confirmados por experiências. Pelas duas primeiras leis e primeiros dois corolários, Galileu descobriu que a queda dos corpos varia com o quadrado do tempo (*in duplicata ratione temporis*) e que o movimento dos projéteis se dá em curva parabólica. A experiência confirma ambas as descobertas. Com um pequeno retardamento desses movimentos devido à resistência do ar (1, p. 21).

No *Scholium* da seção II do Livro I *Determinação das forças centrípetas*, Newton afirma que: “Se a elipse, tendo seu centro removido para uma distância infinita, degenera em uma parábola, o corpo mover-se-á nessa parábola; e a força, tendendo agora para um centro infinitamente remoto, tornar-se-á constante. Este é o teorema de Galileu” (1, p. 55).

O célebre princípio de relatividade galileano corresponde ao Corolário V dos Axiomas ou Leis do Movimento de Newton: “Os movimentos dos corpos incluídos em um dado espaço são os mesmos

entre si, quer esse espaço esteja em repouso, ou se mova uniformemente para diante em linha reta, sem nenhum movimento circular” (1, p. 20).

O nome de Galileu não é citado explicitamente, mas no parágrafo final do comentário a esse corolário é apresentado por Newton, como prova o seguinte argumento: “Uma clara prova disso temos com o movimento de um navio, no interior do qual todos os movimentos ocorrem do mesmo modo, quer o navio esteja em repouso, quer se mova uniformemente em linha reta” (1, p. 21).

Esse exemplo do navio em movimento é exatamente o mesmo dado por Galileu na famosa e muitas vezes citada passagem do *Diálogo sopra i due massimi sistemi del mondo*:

Encerre-se com um amigo na cabine principal sob o convés de um navio grande, levando consigo moscas, borboletas e outros animaizinhos voadores. Leve também um grande aquário com peixes. Pendure uma garrafa pingando em uma outra, de gargalo estreito, debaixo dela. Com o navio parado, observe cuidadosamente como os animaizinhos voam com a mesma velocidade em todas as direções da cabine. Os peixes nadam indiferentemente em todas as direções; as gotas caem no recipiente em baixo da garrafa; e ao jogar algo a seu amigo, não é preciso jogar com mais força numa direção que em outra, as distâncias sendo iguais; ao saltar de pés juntos, você atravessa distâncias iguais em qualquer direção. Depois de observar cuidadosamente todas essas coisas (embora não haja dúvida de que têm de ocorrer dessa forma com o navio parado), faça o navio deslocar-se com a velocidade que quiser, contanto que o movimento seja uniforme e não oscile para lado ou outro. Você não perceberá a mínima alteração em qualquer dos efeitos mencionados, e será impossível dizer se o navio está parado ou em movimento... Porque o movimento geral do navio, estando comunicado ao ar e a todas as coisas que nele estão contidas, . . . nelas se conserva de modo indestrutível (4, p. VI - 547, 548) (17, p. 470, 471).

Stillman Drake informa em sua biografia de Galileu (5, p. 83), que Newton leu uma tradução inglesa do *Diálogo*, publicada em 1661, e nela fez algumas anotações quando pela primeira vez considerou a possibilidade da gravitação universal, em 1666. A tradução do *Diálogo* apareceu na Parte I das *Mathematical collections*, publicada em Londres em 1661, por Thomas Salisbury. A Parte II das *Mathematical collections*, publicada em 1665, continha entre outras coisas uma tradução inglesa dos *Discorsi*. A dupla referência de Newton à descoberta de Galileu relativa à trajetória parabólica dos projéteis (que não está incluída no *Diálogo*) constitui evidência de que Newton também leu a tradução inglesa dos *Discorsi*, embora não tenham sido encontradas anotações suas nessa segunda obra. Além disso Colin Ronan, em seu livro *Galileo*, informa que quando a Royal Society foi fundada, em 1660, era grande a influência de Galileu entre os seus membros, e que o “tutor” de Newton na Universidade de Cambridge, Isaac Barrow, era um adepto fervoroso dos métodos de Galileu (6, p. 248, 249).

O Princípio da Inércia Segundo Galileu

De acordo com as citações feitas, vê-se que Newton atribui a Galileu a paternidade das duas primeiras leis do movimento; a terceira, ainda segundo Newton, teria sido utilizada por Christopher Wren, por Wallis e por Huygens no estudo do impacto de esferas. Também a Galileu Newton atribui a descoberta da lei da queda dos corpos e da trajetória parabólica dos projéteis.

Começemos pela primeira lei, a lei da inércia ou da persistência do movimento. Essa lei, já pouco antes entrevista, de modo menos preciso, por Giovanni Benedetti, é enunciada por Galileu nos *Discorsi* da seguinte forma: “Seja qual for o grau de velocidade que se encontre em um móvel, este permanecerá por sua natureza impresso de forma indestrutível, desde que sejam removidas as causas externas de aceleração ou retardamento. . .” (2, p. 243).

Attendere insuper licet, quod velocitatis gradus, quicumque in mobili reperiatur, est in illo suapte natura indelebiliter impressus, dum externæ causæ accelerationis aut retardationis tollantur, quod in solo horizontali plano contingit; nam in planis declivibus adest iam causa accelerationis maioris, in acclivibus vero retardationis: ex quo pariter sequitur, motum in horizontali esse quoque æternum; si enim est æquabilis, non debilitatur aut remittitur, et multo minus tollitur.

A essa definição que, apesar da sua redação um tanto arcaica, corresponderia exatamente à formulação atual da lei, Galileu acrescenta: "O que acontece somente em plano horizontal (perfeitamente polido), pois nos planos em declive está presente uma causa de aceleração, enquanto que nos planos em aclave está presente uma causa de retardamento. De onde se conclui que o movimento sobre um plano horizontal é eterno; é de fato uniforme, não aumenta nem diminui, nem tampouco cessa" (2, p. 243).

Formulação semelhante havia sido anteriormente apresentada no *Diálogo* (4, p. VII-172). Carugo e Geymonat observam que na formulação dos *Discorsi* Galileu corrigiu uma pequena falha de formulação do *Diálogo*, a qual poderia levar à conclusão de um caráter também inercial do movimento circular (2, nota 243) (17, p. 106-109).

Galileu conclui que se ocorre uma descida em um plano inclinado, a partir de uma certa altura, em virtude do ímpeto (impulso) adquirido o móvel subirá até a mesma altura, em um outro plano inclinado, mesmo que este último tenha inclinação diferente. Esta conclusão de Galileu desempenhou um papel muito importante na história da Mecânica.

A referência a um plano horizontal, acrescentada por Galileu ao enunciado da primeira lei, levou quase todos os seus comentadores, como Alexandre Koyré, à conclusão de que Galileu havia concebido o princípio da inércia de forma restrita, e que somente Descartes, e depois Newton, o teriam generalizado. Geymonat, em sua biografia de Galileu, se insurge muito justamente contra tal interpretação, que considera "excessivamente severa" (3, p. 218, 219).

Na verdade Galileu, ao estudar a trajetória de um projétil lançado horizontalmente, afirma que, em consequência da gravidade, nasce um movimento composto de um movimento horizontal uniforme e de um movimento para baixo uniformemente acelerado. Sobre esse princípio galileano de composição dos movimentos voltaremos a falar mais adiante.

Galileu, embora não o tenha feito no *Diálogo*, deixa claro nos *Discorsi* que em toda a argumentação acima referida está desprezando a esfericidade da Terra, pois só considera corpos pesados movendo-se em distâncias curtas relativamente ao raio do globo terrestre e na vizinhança da sua superfície. Dentro dessa aproximação o movimento de um ponto na superfície da Terra pode ser considerado como retilíneo e uniforme, como se tratasse de uma simples translação, e não de um movimento de rotação. A uma objeção baseada precisamente na esfericidade da Terra, Galileu concorda em princípio que "nem o movimento transversal seja uniforme, nem a aceleração natural se dê nas condições supostas" (isto é, sempre constante e numa mesma direção, a vertical), "nem a trajetória do projétil seja parabólica", mas que, na prática, "os

instrumentos e as distâncias nas quais operamos são tão pequenas em comparação com a grande distância ao centro do globo terrestre, que bem podemos tomar um minuto de grau do círculo máximo como se fosse uma linha reta, e duas perpendiculares levantadas de suas extremidades, como se fossem paralelas” (2, p. 274, 275). Em linguagem científica moderna, poderíamos dizer que Galileu está admitindo um referencial inercial “aproximado”, ligado à superfície da Terra (17, p. 191).

Geymonat, em sua biografia de Galileu (3, p. 164), transcreve um trecho do *Diálogo* que não costuma ser citado, mas que é da mais alta importância, e demonstra que o conceito de Galileu sobre a persistência do movimento ou lei da inércia nada tem de restrito, nem a um plano horizontal, nem mesmo ao desprezo da esfericidade e da rotação da Terra. A principal objeção dos adeptos do sistema de Ptolomeu ao de Copérnico era que, em consequência do movimento da Terra, um corpo pesado, deixado cair do alto de uma torre, deveria tocar o solo atrás do pé desse torre, isto é, para oeste, pois durante o tempo de queda a base da torre teria se deslocado para leste.

No trecho citado Galileu mostra, com grande precisão científica, que o corpo, em lugar de cair para trás do pé da torre, cairá um pouco para leste. Se o movimento da torre fosse uma translação uniforme, o corpo cairia exatamente ao pé da vertical do ponto de onde se soltara em consequência da lei da inércia; mas, como o movimento é de rotação em torno do eixo da Terra, verifica-se um desvio para leste (17, p. 492, 493). Essa é uma das conclusões de Galileu que melhor demonstra seu alto valor científico. Transcrevamo-la portanto:

. . . contrariamente à suposição de que ela (a esfera pesada) não deva acompanhar o movimento da Terra, mas ficar para trás, deverá na verdade antecipar-se a este, já que, ao avizinhar-se da Terra, o movimento de rotação deve fazer-se continuamente por círculos menores, de tal forma que, conservando-se na esfera aquela mesma velocidade que tinha no alto, deveria antecipar-se, como disse, ao giro da Terra (4, p. VII - 259, 260).

Vê-se assim que Newton estava absolutamente certo, e não exagerou ao atribuir a Galileu, em sua plenitude, e não apenas em forma restrita, o princípio da inércia. Já o mesmo não se poderá dizer relativamente à segunda lei, que, esta sim, foi concebida por Galileu de forma ainda incompleta, como mostraremos a seguir.

O Segundo Princípio e o Conceito Newtoniano de Massa

O princípio da composição dos movimentos, formulado por Galileu ao estudar a trajetória dos projéteis, pode ser considerado como uma antecipação do segundo princípio de Newton, na qual ainda está ausente o conceito de massa. Nos problemas tratados por Galileu — a queda livre dos corpos, o plano inclinado, o pêndulo, a trajetória dos projéteis —, só ocorriam forças proporcionais às massas, oriundas da ação da gravidade. Forças proporcionais às massas imprimem a corpos de massas diferentes a mesma aceleração. É natural portanto que Galileu considerasse acelerações e não forças. No movimento dos projéteis, segundo Galileu, a gravidade provoca uma contínua mudança da velocidade e da direção do movimento, encurvando a trajetória que, de outro modo, seria retilínea, de acordo com o princípio da inércia. A demonstração de que essa curva é uma parábola é apresentada com grande clareza na *Giornata quarta* dos *Discorsi*. Afirmar que a gravidade provoca uma mudança de velocidade, a ela proporcional, e na sua direção, é, neste caso, o mesmo que dizer que força-peso provoca uma mudança da quantidade de movimento, a ela proporcional, e na sua direção, pois tanto a força-peso como a quantidade de movimento são proporcionais à massa.

Stillman Drake, realizando uma pesquisa sobre manuscritos inéditos arquivados na Biblioteca Nacional de Florença, descobriu anotações de ensaios realizados por Galileu para comprovar suas conclusões sobre a trajetória dos projéteis, deduzidas do princípio da composição dos movimentos. Uma esfera, depois de adquirir velocidades diferentes ao deslizar sobre um plano inclinado, a partir de diversas alturas, até uma mesa horizontal, e depois de percorrer um pequeno trecho dessa mesa, até a borda, era assim lançada horizontalmente, como um projétil, percorrendo uma trajetória parabólica, até atingir o solo. Para cada uma das diferentes velocidades horizontais impressas à esfera, proporcionais à raiz quadrada da altura da queda sobre o plano inclinado, Galileu mediu a distância horizontal entre a borda da mesa e o ponto no qual a esfera tocou o solo. Os afastamentos entre a previsão teórica e os valores medidos foram inferiores a 4% (7, p. 448, 449). Depois da morte de Galileu, seus discípulos, congregados na Academia del Cimento, realizaram também experiências com tiros horizontais de canhão, dados do alto da torre da Fortaleza de Livorno para verificar que o tempo após o qual a bala atingia o mar era sempre o mesmo, e igual ao tempo da queda de uma bala deixada cair em queda livre ao pé da torre (2, p. 273).

Embora Galileu tenha feito, principalmente no fim de sua vida, algumas tentativas para estabelecer uma teoria das colisões — que cons-

tituem o ensaio póstumo publicado com o título *Giornata sexta* –, o conceito de massa só foi introduzido depois da sua morte, por alguns de seus discípulos, como Aggiunti e Borelli. Esses pioneiros mostraram que no fenômeno do impacto não é o peso que é determinante, mas a quantidade da matéria (2, notas 321, 324).

Apesar desses primeiros resultados, constantes da obra de Borelli *De vis percussionis*, publicada em 1667, e dos estudos já citados, de Christopher Wren, de Wallis, e de Huygens, não é exagero atribuir-se a Newton a formulação rigorosa da segunda lei do movimento.

Newton foi muito criticado por sua definição de massa. “Definição I: A medida da quantidade da matéria resulta conjuntamente de sua densidade e de seu volume; . . . a essa quantidade da matéria me referirei daqui por diante como corpo ou massa”; “Definição II: a medida da quantidade de movimento resulta conjuntamente da velocidade e da quantidade da matéria” (1, p. 1).

A medida da massa seria assim o produto do volume pela densidade. A muitos autores isso pareceu um círculo vicioso, já que a definição atual da densidade, na língua inglesa, é a massa da unidade de volume, que, em outras línguas, é designada como massa específica. Cajory, comentarista dos *Principia*, observa em sua nota 11 (1, p. 638) que seria absurdo que uma personalidade com o valor científico de Newton pudesse cometer semelhante deslize. A explicação é que, no tempo de Newton, densidade, mesmo na língua inglesa, significava densidade relativa, isto é, massa específica relativa, e não massa específica, tomando-se como unidade a densidade da água. Assim, o produto do volume pela densidade (relativa) pode ser perfeitamente adotado como uma medida da massa; a unidade de massa, nesse caso, seria a massa da unidade de volume da água. Esse produto se distingue do peso, que varia com a intensidade local do campo gravitacional, pois a densidade relativa independe dessa intensidade. Não há portanto nenhum erro nem círculo vicioso na definição de Newton.

Newton, nas Definições VII e VIII, distingue a força aceleratriz, que seria a intensidade local do campo gravitacional, da força motiva (ou motriz), que seria o produto daquela pela massa. “Eu referencio a força motriz ao corpo em seu conjunto, . . . e a força aceleratriz à posição do corpo” (1, p. 4, 5).

É oportuno observar que Newton nunca escreveu, em trecho algum de sua obra, que “o produto da massa pela aceleração é proporcional à força” ou que “a taxa de variação com o tempo da quantidade de movimento é proporcional à força”, como se lê em quase todos os tratados modernos de Mecânica ou de Física. A segunda lei é por ele enunciada, nos *Principia*, em termos bem diferentes:

A mudança da quantidade de movimento é proporcional à força impressa e se faz na direção em linha reta segundo a qual essa força é impressa, . . . quer seja a força impressa totalmente de uma só vez, quer o seja gradual e continuamente (1, p. 13, grifos nossos).

Há assim em Newton uma certa ambigüidade no conceito de força, que se encontra também nos cientistas do século XVIII e até mesmo em alguns do século XIX, como por exemplo Poinsot. A força impressa totalmente de uma só vez seria o que hoje se designa como força impulsiva, força instantânea, ou simplesmente impulso. Trata-se, na realidade, como ocorre nos impactos, de uma força muito grande atuando durante um intervalo de tempo muito pequeno, e cujo efeito pode ser considerado aproximadamente como uma variação finita da quantidade de movimento. O impulso é o produto do valor médio da força pelo intervalo de tempo durante o qual atua. A força impressa gradual e continuamente, de Newton, seria o que hoje se entende por força.

Uma formulação alternativa da segunda lei de Newton, mais próxima da formulação dos *Principia*, seria: "a mudança (finita) da quantidade de movimento é proporcional ao impulso". É sugestivo que a demonstração do teorema das forças centrais (que corresponde à segunda lei de Kepler), dada por Newton nos *Principia*, Proposição 1 do Livro I, é baseada na divisão do tempo em pequenos intervalos e na atuação descontínua da força somente ao fim de cada intervalo, "de uma só vez, com grande impulso" (1, p. 40). A trajetória assim obtida seria poligonal. Fazendo tender para o infinito o número de divisões de tempo, e portanto para zero cada intervalo de tempo, obtém-se a trajetória curva, e a força passa a atuar gradual e continuamente.

É também oportuno salientar que Newton nunca apresentou o segundo princípio como uma "definição de força". Em nenhum ponto de sua obra afirmou que "a força é igual ao produto da massa pela aceleração". Em vez de igualdade Newton fala sempre em proporcionalidade, e coloca a variação da quantidade de movimento como um efeito da força. A proporcionalidade, e não igualdade, implicaria na existência de um fator de proporcionalidade análogo à constante de gravitação. Modernamente considera-se que, em princípio, a unidade de força poderia ser independente das unidades de massa, de comprimento e de tempo, já que as forças podem ser comparadas estaticamente ou medidas por outros efeitos, também estáticos, como a deformação de molas elásticas. Adotando como unidade de força a força capaz de imprimir à unidade de massa a unidade de aceleração, como no sistema internacio-

nal de medidas SI, o fator de proporcionalidade desaparece, isto é, é feito igual à unidade, o que não significa que a força possa ser definida como o produto da massa pela aceleração.

Em sua obra *Principia* Newton define as forças como ações exercidas sobre um corpo tendentes a modificar seu estado de repouso ou de movimento uniforme em linha reta, e acrescenta que as forças podem ter diferentes origens (1, p. 2, Def. IV). Além das forças oriundas da gravitação, refere-se a forças de percussão e de pressão (1, p. 2, Def. IV), formas magnéticas (1, p. 4, Def. VI), forças de coesão, elétricas e musculares (1, p. 547), forças de resistência dos meios fluidos (1, p. 235 a 280). Nenhuma dessas forças é proporcional à massa do corpo como ocorreria se fossem forças de gravitação, mas a aceleração por elas impressa ao corpo é diretamente proporcional à sua intensidade e inversamente proporcional à massa. Refere-se também a forças hoje designadas como de ligação: as que mantêm coeso um pião em alta rotação (1, p. 13, Lei 2), e a tensão de uma corda que liga duas esferas em movimento tendendo a afastar-se uma da outra (1, p. 12)."

A Lei da Queda Livre dos Corpos

É fato sabido que Galileu nunca realizou a famosa experiência da queda de esferas do alto da Torre de Pisa. Não há a menor referência a essa suposta experiência em suas obras, ao passo que muitas outras experiências que Galileu efetivamente realizou são por ele descritas com detalhes em seus livros, ou constam de anotações em manuscritos arquivados na Biblioteca Central de Florença, como aquelas, já referidas, que foram analisadas por Stillman Drake. Tudo não passou na realidade de uma fantasia de Viviani em sua biografia de Galileu. Caem assim no vazio as farpas que alguns autores tentaram atirar contra Galileu, citando experiências anteriores realizadas no século V e VI por um comentador de Aristóteles, e uma realizada por Stevin, na Holanda, em 1586. É claro que inúmeras observações devem ter sido feitas, ao longo dos séculos, com resultados contrários à teoria de Aristóteles segundo a qual os tempos de queda livre dos corpos seriam inversamente proporcionais aos seus pesos. Para demonstrar o absurdo dessa teoria não eram nem mesmo necessárias observações muito precisas. Os corpos de grande densidade caíam aproximadamente com a mesma velocidade, independentemente de seus pesos; as diferenças maiores se verificavam em corpos de pequenas densidades. Coube a Galileu, no entanto, a primazia de afirmar com clareza que os tempos de queda independeriam tanto dos pesos como da natureza ou densidade dos corpos, se fosse removida a resistência oposta pelo meio, isto é, no vácuo.

Contrariamente à lenda divulgada por Viviani, Galileu afirma, em uma passagem da *Giornata prima* dos *Discorsi* que uma experiência direta para demonstrar a igualdade do tempo de queda de dois corpos de pesos diferentes seria muito difícil de realizar-se, em virtude da resistência do ar, principalmente quando a altura da queda fosse muito grande, único caso em que seria possível comparar com precisão razoável os tempos da queda (2, p. 128). E refere-se a experiências que de fato realizou com planos inclinados e com pêndulos, empregando esferas de chumbo e de cortiça. A comparação dos tempos de percurso, nos planos inclinados, e dos períodos de oscilação dos pêndulos comprovou a hipótese de que tais tempos não dependessem do peso e da natureza dos corpos, mas apenas das alturas da queda ou dos comprimentos dos pêndulos. No caso das experiências com pêndulos, Galileu verificou que a resistência do ar faz com que as amplitudes das oscilações dos pêndulos de cortiça diminuam mais rapidamente que as dos pêndulos de chumbo, mas não afeta significativamente os períodos de oscilação.

Quando Galileu iniciou suas pesquisas sobre a lei do movimento da queda livre dos corpos, começou com uma hipótese que teve de descartar depois: a de que as velocidades fossem proporcionais aos espaços percorridos. Substituiu-a depois por outra, a da proporcionalidade das velocidades aos tempos de percurso, da qual deduziu que os espaços percorridos são proporcionais aos quadrados dos tempos. A experiência demonstrou que esta segunda hipótese correspondia à realidade física. As experiências de Galileu com planos inclinados, realizadas com o objetivo de comprovar que o movimento da queda dos corpos é uniformemente acelerado, são minuciosamente descritas numa famosa passagem da *Giornata terza*, dos *Discorsi* (2, p. 213).

Há cerca de 50 anos, principalmente em consequência de teses defendidas por Alexandre Koyré, foi moda negar a veracidade dos relatos de Galileu sobre suas experiências. Essa atitude, que reproduzia dúvidas levantadas por Descartes e por Mersenne, está hoje em dia inteiramente superada. Diversas das experiências de Galileu foram reproduzidas com êxito por Settle e por Stillman Drake, entre outros. Pierre Thuillier publicou um interessante e convincente artigo sobre o assunto na revista *La Recherche*, intitulado *Galilée et l'Expérimentation*⁷. Em outro número desta mesma revista se demonstra que Galileu realizou de fato experiências para a determinação da resistência à tração de fios de cobre⁸. Vale consultar também a publicação em que são expostas as teorias de Galileu sobre a resistência dos materiais e sobre a semelhança física.⁹

O método de pesquisa científica de Galileu foi sempre uma justa combinação da observação e da experiência com a matemática, instrumento de lógica dedutiva. Partindo de alguns fatos experimentais, for-

mula-se uma primeira hipótese ou teoria para interpretá-los. Dessa teoria tiram-se conclusões, por via dedutiva; em seguida a validade dessas conclusões é submetida à experiência, à qual compete sempre a última palavra. A hipótese é substituída ou aperfeiçoada, se os ensaios não a confirmam. A fonte da verdade é sempre, em última análise, a experiência (9, p. 116).

O Princípio da Relatividade de Galileu

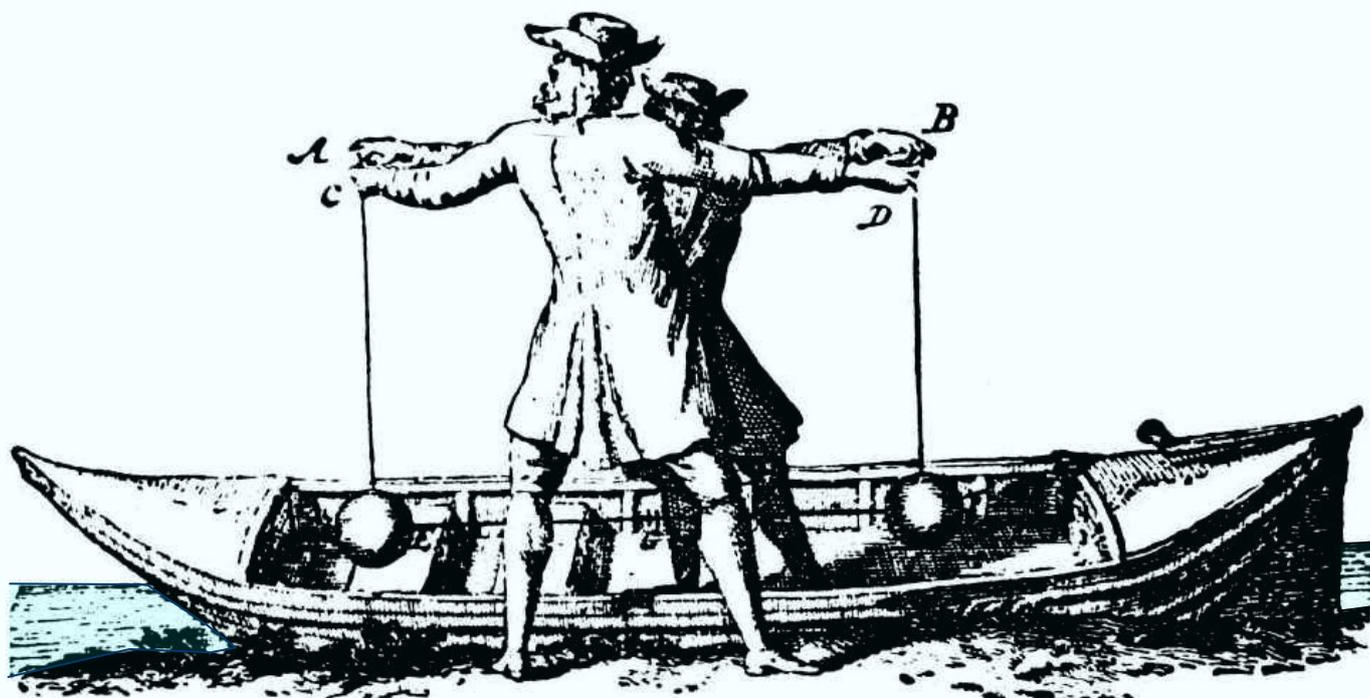
Já vimos que Newton apresentou o princípio galileano de relatividade como um corolário, o Corolário V dos Axiomas ou Leis do Movimento. Na realidade esse princípio pode ser assim obtido, por via dedutiva, das duas primeiras leis do movimento, o princípio da inércia e aquele que relaciona as forças com as variações da velocidade e não com os valores instantâneos da velocidade. No entanto Galileu chegou a esses princípios através da análise de observações cotidianas muito simples, que podem ser feitas, ao longo de sua vida, por qualquer pessoa que viaje em veículos que se desloquem em translação aproximadamente uniforme. Não se trata de experiências planejadas para verificar uma teoria, e realizadas mediante montagens especiais, nem tampouco de experiências imaginadas, como queria Alexandre Koyré. Aliás, hoje em dia, nas viagens de veículos estáveis a grandes velocidades, como no vôo de grandes aviões, sem turbulências, essas observações ficam muitíssimo mais evidentes que no navio de Galileu. Como afirma Galileu, se o veículo se move em translação uniforme, um observador nele encerrado, sem comunicação com o exterior, não perceberá a mínima alteração nas interações entre os corpos que se encontram no interior desse veículo, e "será impossível dizer-se se está parado ou em movimento"(4, p. VI - 547, 548).

Galileu, no final do trecho citado, procura apoiar-se na lei da inércia: "Porque o movimento geral do navio, tendo se comunicado ao ar e a todas as coisas que nele estão contidas . . . nelas se conserva de modo indestrutível." No entanto a lei da inércia não seria suficiente para explicar, por si só, o princípio de relatividade: esse princípio inclui também, em seu bojo, a lei de que as variações de velocidades, ou diferenças entre velocidades, é que são determinantes, e não os seus valores instantâneos.

Poder-se-ia portanto tomar o princípio galileano de relatividade como um dos princípios básicos da Mecânica, e não como simples consequência de outros princípios. É essa aliás a tendência da física moderna, a partir da elaboração, por Einstein, da teoria da relatividade. Nas obras de Einstein e de seus seguidores, o princípio de relatividade de

Galileu passou a ser considerado, diretamente, como um dos mais importantes princípios da física pré-relativística, ou newtoniana (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16).

É conhecida a belíssima aplicação desse princípio feita por Huygens, no estudo do impacto de duas esferas iguais, ao examinar como o impacto dessas esferas dentro de um bote em movimento retilíneo e uniforme seria visto por um observador na margem do rio (17, p. 472). É fácil verificar que o teorema da trajetória parabólica também pode ser deduzido do princípio de relatividade. Basta adotar um referencial movendo-se em translação, com a velocidade inicial do projétil; um objeto deixado cair verticalmente dentro de um veículo em movimento é visto por um observador de fora como descrevendo uma trajetória parabólica.



An Illustration from *De Percussione* (Huygens).

Cabe aqui uma observação: o princípio da relatividade de Galileu aplica-se normalmente a um sistema fechado, dentro do qual existem corpos sem nenhuma interação com outros objetos, situados fora do sistema. No entanto Galileu, no exemplo do navio, considerou, além das interações entre os objetos encerrados na cabine, a interação desses objetos com a Terra, correspondente à ação da gravidade. As constatações de Galileu são no entanto válidas se admitirmos que o campo gravitacional é uniforme, não variando portanto com o deslocamento do navio. Galileu mostrou, como vimos, que essa aproximação é aceitável, se os deslocamentos são pequenos quando comparados com o raio da Terra.

Praticamente todos os tratados modernos de mecânica ou física atribuem a Galileu o princípio de relatividade da mecânica newtoniana. Dele decorrem imediatamente as transformações de coordenadas que Einstein denominou transformações de Galileu, em comparação com as transformações de Lorentz, correspondentes à teoria da relatividade restrita.

Conceitos de Galileu e de Newton sobre o Espaço e o Tempo

Antes de terminar, digamos alguma coisa sobre os conceitos newtonianos de espaço e de tempo. Para Newton havia um espaço absoluto e um tempo absoluto. Em Galileu percebe-se a admissão implícita de um tempo absoluto, que seria o mesmo para quaisquer referenciais em movimentos relativos. O princípio da relatividade de Galileu, no entanto, não pressupõe um espaço absoluto, mas uma infinidade de referenciais inerciais privilegiados, nos quais é válido o princípio de inércia. Qualquer referencial que tenha um movimento de translação uniforme relativamente a um referencial inercial é também um referencial inercial. No exemplo do navio, Galileu toma como primeiro referencial um referencial inercial aproximado, ligado à superfície da Terra. Mas a Terra, por sua vez, não está imóvel, em consequência de seus movimentos de rotação em torno de seu eixo, e ao longo de sua órbita elíptica, no sistema solar. Não é o espaço absoluto.

Stillman Drake transcreve, em sua biografia de Galileu, um trecho surpreendente de uma carta sua a Lipati. Refere-se ao problema do centro do universo: se é o centro da Terra, como supunham os adeptos de Ptolomeu, ou o Sol, como supunham os copernicanos (e que mais tarde Newton localizaria no centro da gravidade do sistema solar):

Não há razão para nos cansarmos a provar isso, nem a provar que as estrelas fixas estão situadas em um espaço limitado por uma superfície esférica: basta saber que estão a uma distância imensa de nós. Do mesmo modo, querer atribuir um centro a esse espaço, do qual nem se conhece a forma, nem se pode conhecê-la (ou mesmo se tem forma) é, na minha opinião, um trabalho supérfluo e ocioso. Acreditar que a Terra possa estar localizada em um centro que nem se sabe se existe é, na verdade, uma empresa frustrante (5, p. 89).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 – NEWTON, Isaac. *Principia*. Califórnia, Univ. of California Press, 1934.
- 2 – GALILEI, Galileo. *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*. Torino, Paolo Boringhieri, 1958.
- 3 – GEYMONAT, Ludovico. *Galileo Galilei*. Torino, Einaudi, 1957.
- 4 – GALILEI, Galileo. *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano*. Firenze, s. ed., 1929-39.
- 5 – DRAKE, Stillman. *Galileo*. N. York, Hill and Wang, 1980.
- 6 – RONAN, Colin A. *Galileo*. London, Weidenfeld and Nicolson, 1974.
- 7 – THUILIER, Pierre. *Galilée et l'expérimentation*. La Recherche. Paris, 143, 1983.
- 8 – CARNEIRO, Fernando L.L.B. Galilée et la résistance des matériaux. *La Recherche*. Paris, 147, 1983.
- 9 – CARNEIRO, Fernando L.L.B. Galilée, fondateur de la résistance des matériaux / Galileo founder of the science of the strenght of materials. *Bulletin Rilem*. Paris, 27, 1965.
- 10 – EINSTEIN, Albert. *La relativité*. Paris, Payot, 1956.
- 11 – BERGMAN, Peter. *Introduction to the theory of relativity*. N. York, Dover, 1976.
- 12 – BORN, Max. *Einstein's theory of relativity*. N. York, Dover, 1965.
- 13 – LANDAU, L. et alii. *Curso de física general*. Moscu, MIR, 1979.
- 14 – EINSTEIN, Albert & INFELD, Leopold. *A evolução da física*. Rio de Janeiro, Zahar, 1976.
- 15 – KOURGANOFF, Vladimir. *Introducción a la teoria de la relatividad*. Barcelona, Labor, 1968.
- 16 – LANDAU, L. & RUNEE Y. *Que es la teoria de la relatividad*. Moscu, Mir, 1978.
- 17 – NUSSENZVEIG, H. Moysés. *Curso de física básica*. São Paulo, Blücher, 1985. v. 1.

Núcleo de Publicações da COPPE / UFRJ - 1988

+ + +