
GALILEO E A ROTAÇÃO DA TERRA

Roberto de Andrade Martins
Instituto de Física – UNICAMP
Campinas – SP

Resumo

Este trabalho analisa dois argumentos de Galileo Galilei relativos à rotação da Terra, de sua obra "Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo". Em um deles, Galileo defende a rotação da Terra contra o argumento de extrusão dos corpos por rotação. No segundo, Galileo procura evidenciar a rotação (e translação) da Terra pela existência das marés. Mostra-se que nenhum dos dois argumentos era satisfatório, para a Física da época. Conclui-se que Galileo nem conseguiu defender adequadamente a teoria copernicana contra os ataques da época, nem apresentar evidências positivas convincentes a seu favor. O artigo comenta também a relação entre esses pontos e dificuldades educacionais atuais.

I. Introdução

Quando Copérnico propôs seu sistema heliocêntrico, no século XVI, a idéia de que a Terra se movia era inaceitável, sob o ponto de vista físico. Naquela época, o sistema de Copérnico podia ser aceito sob o ponto de vista puramente astronômico, mas estava em conflito com a física terrestre. De acordo com os conhecimentos mecânicos da época, se a Terra se movesse, deveriam surgir fenômenos observáveis na própria Terra, por causa desse movimento. O movimento da Terra deveria afetar o movimento de queda dos corpos, o dos projéteis, dos pássaros, das nuvens, etc. A rotação da Terra deveria produzir a expulsão de todos os corpos de sua superfície. A teoria heliocêntrica exigia uma nova física, para explicar o motivo pelo qual esses fenômenos não eram observados.

O próprio Copérnico não foi capaz de desenvolver essa nova mecânica. Apenas no século XVII, essa base teórica para a astronomia heliocêntrica foi sendo desenvolvida. Considera-se normalmente que Galileo Galilei foi o principal responsável pela criação dessa nova física. Rupert Hall, por exemplo, assim descreve a importância do Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo (1632), de Galileo:

(..) foi, pois, muito mais do que uma defesa do sistema matemático heliocêntrico conforme definido por Copérnico. Pela primeira vez, Galileo deu a esse sistema existência filosófica e substância física. Acima de tudo, mostrou que os novos movimentos da Terra anunciados por Copérnico podiam ser compatíveis com um tratamento do movimento em geral que era diferente do de Aristóteles. (HALL, A revolução na ciência, p. 180)

É claro que não se pode negar que Galileo tenha contribuído para a criação da nova física e para a aceitação do sistema de Copérnico; mas as suas concepções são ainda intermediárias entre o pensamento antigo (de Aristóteles) e a mecânica clássica (de Newton). De modo nenhum ele consegue apresentar uma teoria física completa e satisfatória, coerente com o copernicanismo. É preciso abandonar a antiga concepção de Galileo como “o grande gênio” que resolve de uma só vez todos os problemas e lança a física de Aristóteles ao lixo. A história da ciência não dá saltos tão grandes assim.

Este artigo irá esclarecer algumas diferenças entre a física de Galileo e a de Newton, mostrando que não surgiu de uma só vez a nova mecânica necessária para que a astronomia de Copérnico se tornasse aceitável. Na verdade, Galileo não conseguiu nem responder a todas as objeções clássicas contra o movimento da Terra, nem apresentar evidências adequadas de que a Terra se move.

As principais dificuldades de Galileo estão associadas a movimentos de rotação. A análise das falhas que ele cometeu são muito instrutivas, sob o ponto de vista educacional. Elas nos mostram que mesmo uma pessoa altamente capaz pode se confundir com uma parte da mecânica que hoje nos parece tão banal. Essas dificuldades permitem ilustrar pontos conceituais delicados, que podem confundir não apenas estudantes como até professores da atualidade.

Serão estudados aqui dois pontos tratados por Galileo no seu livro *Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo*:

- a explicação do motivo pelo qual os corpos não são expelidos da Terra pela sua rotação;

- a teoria das marés de Galileo.

II. Copérnico e a rotação da Terra

Na sua obra “Sobre a revolução dos orbes celestes”, Copérnico discute várias objeções existentes contra a possibilidade de movimento da Terra. Um deles era o seguinte: se a Terra girasse (em torno de seu eixo), fazendo uma volta em cada 24 horas, seu movimento teria uma enorme velocidade. “Ora, as coisas que giram de forma repentina e violenta são inadequadas para se reunir, e por mais unidas que sejam elas se espalham, a menos que alguma força constante as obrigue a se prenderem. E há muito tempo, diz ele [Ptolomeu], a Terra espedaçada teria passado para além dos céus, o que é certamente ridículo; e a *fortiori* também todas as criaturas vivas e todas as outras massas separadas não poderiam permanecer inabaláveis” (COPERNICUS, *De revolutionibus*, I.7)¹.

Este, de fato, era um argumento de peso. Já se sabia desde a Antigüidade o valor aproximadamente correto do raio terrestre e era possível calcular sua velocidade equatorial,

¹ Copérnico atribui esse argumento a Ptolomeu, como Galileo também o faz. Koyré chega a indicar o ponto exato em que Ptolomeu teria feito essa objeção: *Almagesto*, livro I, capítulo 7 (ver KOYRÉ, *Études galiléennes*, p. 167, nota 2). Não consegui encontrar essa objeção no *Almagesto*, no entanto - nem no local citado por Koyré, nem em qualquer outro.

supondo-se que a Terra gira: algo equivalente a 1.700 km/h, em nossas unidades atuais. Como é que uma rotação com tal velocidade poderia deixar de produzir algum efeito observável?

A resposta que Copérnico fornece é das mais fracas: ele argumenta que o movimento de rotação da Terra é um movimento natural e que, por isso, não produz os mesmos efeitos de dispersão que se observa nos movimentos violentos de rotação:

Por estas e outras razões semelhantes, eles dizem que a Terra permanece em repouso no meio do universo e que não existe dúvida sobre isso. Mas se alguém opina que a Terra gira, ele também dirá que esse movimento é natural e não violento. Ora, coisas que estão de acordo com a natureza produzem efeitos contrários aos que são violentos. Pois as coisas às quais se aplica força ou violência se quebram e são incapazes de subsistir por um longo tempo. Mas as coisas que são causadas pela natureza estão em uma condição correta e são mantidas em sua melhor organização. Por isso, Ptolomeu não tinha razão para temer que a Terra e todas as coisas da Terra se espalhassem por uma revolução causada pelo poder da natureza, que é muito diferente daquela da arte ou do que pode resultar do gênio humano (COPERNICUS, De revolutionibus, I.8).

Por que motivo os corpos em rotação tendem a se quebrar ou espalhar? Atualmente, interpretamos isso como uma consequência da inércia. Suponhamos que vários corpos estão inicialmente presos entre si e que o conjunto está girando com grande velocidade. Se a ligação entre eles for rompida, cada um tenderá a manter a velocidade que tem naquele instante e se mover em linha reta. Como cada um desses corpos estará se movendo em uma direção diferente (por causa da rotação), o resultado será que eles se espalharão, distanciando-se uns dos outros.

Na época de Copérnico, não havia ainda sido estabelecida a lei da inércia. Pode-se alegar, por isso, que sua justificativa era válida, para sua época. Isso não é verdade. No tempo de Copérnico, existia uma distinção entre movimentos naturais e violentos, mas essa distinção era a da física de Aristóteles. Essa física aristotélica era totalmente incompatível com os raciocínios de Copérnico. Ele só estaria justificado se tivesse desenvolvido uma nova conceituação de movimentos naturais e violentos - o que Copérnico não fez.

Houve diferentes tentativas de explicação posteriores. William Gilbert, por exemplo, defende a existência de uma influência da Terra que prende todos os corpos terrestres a ela, fazendo com que eles a acompanhem e não sofram influência dessa rotação (GILBERT, *De magnete* VI, 5).

Atualmente, acreditamos que a rotação da Terra tende, de fato, a expelir os corpos de sua superfície; mas que essa tendência é muito inferior à atração gravitacional e por isso a Terra não se desfaz em pedaços. Copérnico não apresenta nenhuma explicação semelhante a esta. E Galileo, como trata essa dificuldade?

Em alguns pontos de seu livro, Galileo aceita a idéia de que o movimento circular da Terra é natural. Mas não é este o argumento que ele utiliza para responder ao problema da extrusão dos corpos. Pois Galileo conhece muito bem a inércia e sabe que, por causa dela, os corpos *terrestres* possuem a tendência a escapar do movimento circular. Por que, então, os corpos que estão sobre a Terra não são lançados para fora? Por causa da gravidade. Qualitativamente, a

resposta de Galileo é igual à moderna. Mas, sob o ponto de vista quantitativo, sua visão é totalmente inadequada, pois ele acreditava que, por menor que fosse essa gravidade, ela seria suficiente para reter os corpos na superfície da Terra.

É este aspecto quantitativo, extremamente curioso - e um tanto complicado – que iremos explorar a seguir. Embora esse ponto da obra de Galileo já tenha sido estudado várias vezes², vale à pena revisitá-lo e analisar com cuidado seus argumentos.

III. Inércia e movimento circular

Antes de procurar resolver a questão da expulsão dos corpos pela rotação da Terra, Galileo discute a existência e razão desse efeito. Através de Salviati, ele discute o seguinte exemplo:

Coloque-se água em um pequeno balde e amarre-se esse balde na extremidade de uma corda. Pode-se então segurar a outra extremidade da corda e fazer o balde girar rapidamente, seja em um plano horizontal ou vertical, sem que a água caia de dentro dele. A tendência da água de se afastar do centro supera o seu peso e por isso, mesmo quando o balde está de cabeça para baixo, a água não cai. Se, no fundo do balde, for feito um furo, a água sairá por esse furo, afastando-se do centro de rotação. Da mesma forma, se forem colocadas pedras dentro do balde, elas também não cairão e tentarão se afastar do centro de rotação. (GALILEO, *Dialogo dei massimi sistemi*, v. 2, p. 377; *Dialogue concerning the two chief world systems*, p. 190; "La vertigine veloce ha facultà di estrudere e dissipare"³)

Em seguida, Galileo analisa o movimento de uma pedra lançada por uma funda. Inicialmente, a pedra tem um movimento circular. Quando, no entanto, a pedra é solta da funda, ela deixa de se mover circularmente e adquire um movimento (inicial) em linha reta, por causa do seu "ímpeto". Esse movimento retilíneo tem uma direção tangencial ao círculo, ou seja: em uma direção que faz um ângulo nulo com o seu movimento circular inicial. Movendo-se nessa direção tangencial, a pedra se afasta do centro do círculo. Este é o motivo da tendência que os corpos em rotação têm de se afastar do centro: não porque exista uma tendência a se moverem radialmente para fora, mas por sua tendência a se moverem tangencialmente.

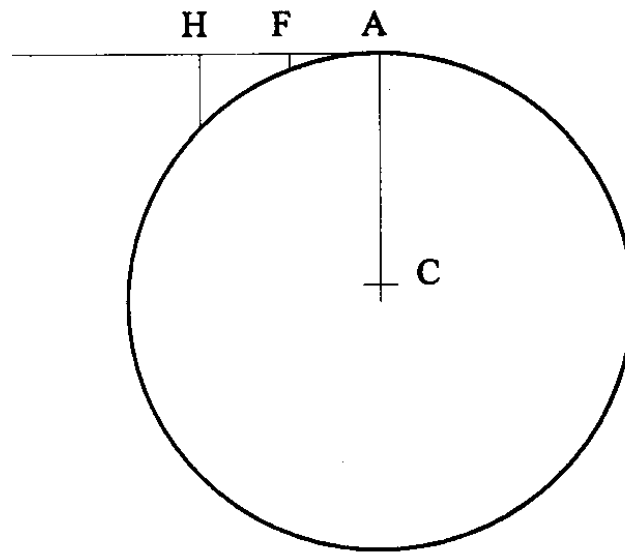
Até aqui, a explicação (qualitativa) de Galileo é quase igual à moderna -com a diferença apenas de que ele se refere ao "ímpeto" da pedra e não à sua "inércia". No entanto, a continuação da análise introduz considerações quantitativas problemáticas.

Quando um corpo que tinha movimento circular escapa desse movimento e inicia o movimento tangencial retilíneo, essa reta se afasta inicialmente muito pouco da circunferência, depois vai se afastando mais depressa.

² Ver, por exemplo, HALL, *A revolução na ciência*, p. 186; KOYRÉ, *Études galiléennes*, pp. 258-71. No entanto, a

análise aqui realizada é diferente da desses e de outros autores.

³ As indicações das citações de Galileo serão feitas do seguinte modo: indicando-se a paginação do texto italiano na edição utilizada das *Opere* de Galileo; em seguida, a paginação da tradução inglesa de Drake; e, por fim, o título marginal do texto original, através do qual toma-se fácil localizar o trecho em outras edições do livro.



Salviati -(...) Passo agora mais adiante e lhe pergunto se o móvel, depois da separação, ao continuar o seu movimento reto, vai sempre se afastando igualmente do centro, ou se quiser da circunferência, do círculo do qual participou o movimento anterior; o que equivale a dizer: se um móvel que parte do ponto da tangente e se move por essa tangente, se afasta igualmente do ponto de contato e da circunferência do círculo.

Simplicio -Não, senhor, pois a tangente na vizinhança do ponto de contato se afasta pouquíssimo da circunferência, com a qual ela contém um ângulo estreitíssimo; mas ao se afastar mais e mais, o afastamento cresce sempre com maior proporção; de modo que em um círculo que tivesse, por exemplo, dez braças de diâmetro, um ponto da tangente que estivesse a dois palmos de distância do contato, estaria distante da circunferência do círculo três ou quatro vezes mais do que um ponto que estivesse a um palmo de distância do ponto de contato; e o ponto que estivesse a uma distância de meio palmo, de modo semelhante creio que apenas se afastaria a quarta parte da distância do segundo

(...). (GALILEO, Dialogo dei massimi sistemi, v. 2, p. 382; Dialogue concerning the two chief world systems, p. 194; "Proietto si muove per la tangente il cerchio del moto precedente nel punto della separazione"

Aqui, Galileu utiliza as propriedades geométricas da tangente do círculo: a distância entre a tangente e a circunferência é aproximadamente proporcional ao quadrado da distância ao ponto de tangência. Até aqui, não há nenhum problema com o raciocínio. Mas vamos prosseguir.

Quando um corpo é lançado horizontalmente a partir de um ponto próximo à superfície da Terra, ele tem um "ímpeto" para se mover segundo a tangente, mas tem ao mesmo tempo uma tendência para baixo, por causa da gravidade. Salviati pergunta a Simplicio quando um corpo começa a se desviar para baixo, ao ser lançado horizontalmente. Simplicio responde que ele começa imediatamente a se desviar para baixo. Salviati concorda e utiliza a resposta para dizer que esse desvio, por menor que seja, basta para reter o corpo e impedir que ele se distancie:

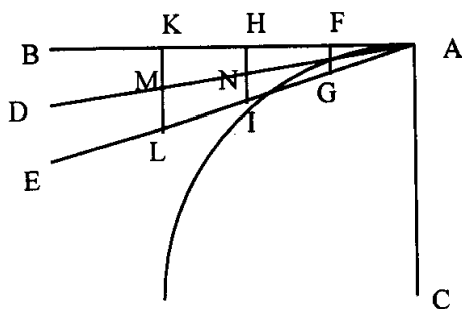
Salviati -De tal forma que aquela pedra que, destacada daquela roda movida em rotação com grande velocidade, tivesse também tendência natural de se mover para o centro da mesma roda -assim como tem de se mover para o centro da Terra - poderia facilmente retornar à roda, ou melhor ainda não se afastar dela; pois sendo, no início da separação, o afastamento tão minúsculo, pela infinita agudeza do ângulo de contato, qualquer pequena inclinação que o desviasse para o centro da roda bastaria para retê-lo sobre a circunferência. (GALILEO, Dialogo dei massimi sistemi, v. 2, p. 383; Dialogue concerning the two chief world systems, p. 194; "Proietto grave, subito che è separato dal proiciente, comincia a declinare")

Na discussão seguinte entre Salviati e Simplicio, são levantados vários pontos. Salviati esclarece que, para que um corpo fique preso à circunferência de uma roda (ou da Terra), basta que seu movimento para o centro supere o distanciamento entre a tangente e a circunferência. Para que o corpo pudesse escapar, segundo Salviati, seria necessário que o movimento tangencial fosse tão rápido que o tempo no qual o corpo se move, por exemplo, mil braças pela tangente, seja pouco para que o corpo se mova, pela queda, a distância entre a tangente e a circunferência. No entanto, diz Salviati, “digo-lhe que isso não acontecerá, mesmo que aquele movimento [tangencial] seja feito mais veloz, e este [para o centro] mais lento, tanto quanto se desejar”. (GALILEO, *Dialogo dei massimi sistemi*, v. 2, p. 387; Dialogue concerning the two chief world systems, p. 197; “Proietto grave, subito che è separato dal proiciente, comincia a declinare”)

Simplicio coloca em dúvida a conclusão de Salviati: “E por que não poderia ser [o movimento] pela tangente tão veloz, que não desse tempo a uma pena para chegar à superfície da Terra?” Mas Salviati mantém sua posição e critica a falta de conhecimento geométrico de Simplicio:

Salviati -Vós dizeis assim, e dizeis o que é falso, por deficiência não de lógica ou de física ou metafísica, mas de geometria (...) (GALILEO, Dialogo dei massimi sistemi, v. 2, p. 387; Dialogue concerning the two chief world systems, p. 197; “Proietto grave, subito che è separato dal proiciente, comincia a declinare”)

Por fim, Salviati esclarece seu argumento (ou seja, o de Galileo) através de um diagrama:



Suponhamos que as distâncias AF, FH, HK sobre a tangente AB sejam todas iguais, representando portanto tempos iguais. Consideremos uma reta secante qualquer, AE, traçada a partir do ponto de tangência A com qualquer inclinação que se queira. As distâncias FG, HI e KL são proporcionais a AF, AH e KL, pois são lados homólogos de triângulos semelhantes. Essas distâncias FG, HI e KL podem representar os graus de velocidade que o corpo vai adquirindo em direção ao centro do círculo, pois são proporcionais ao tempo. Utilizando nossa terminologia atual, é fácil ver que a inclinação entre a secante AE e a tangente AB representa a aceleração do corpo em direção ao centro.

Se quisermos representar um movimento que tenha menor tendência em direção ao centro (ou seja, com menor aceleração), deveremos utilizar uma outra secante como AD, de tal modo que os segmentos entre essa secante e a tangente representem as velocidades adquiridas pelo corpo em direção ao centro. Pode-se assim representar o movimento do corpo, por menor que seja sua tendência em direção ao centro do círculo.

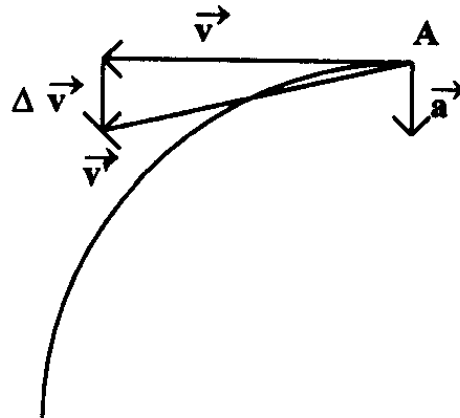
Salviati -(..) É claro que deslocando a linha EA para AB, diminuindo o ângulo EAB (o que se pode fazer ao infinito, assim como a gravidade pode ser diminuída ao infinito), diminui-se de modo semelhante ao infinito a velocidade de queda e, conseqüentemente, a causa que impedia o lançamento [do corpo para fora]. (GALILEO, Dialogo dei massimi sistemi, v. 2, p. 391; Dialogue concerning the two chief world systems, p. 200; "Dimostrazione geometrica per provare l'impossibilità dell'estrusione mediante la vertigine terrestre")

No entanto, por menor que seja o ângulo EAB (e, portanto, por menor que seja a gravidade), a reta AE nunca será tangente à circunferência (pois só existe uma tangente, que é AB). A reta AE será sempre secante, o que significa que o movimento inicial do corpo não irá afastá-lo do centro da circunferência, e sim aproximá-lo dele. Ou seja: por menor que seja a gravidade, para tempos muito pequenos, ela será suficiente para fazer com que o corpo caia uma distância maior do que aquela entre a tangente e a circunferência do círculo e será suficiente para manter o corpo na superfície terrestre.

O raciocínio de Galileo se baseia em propriedades geométricas: a distância entre a tangente e a secante é proporcional à distância ao ponto de encontro; pelo contrário, a distância entre a circunferência e a tangente é proporcional ao quadrado dessa distância. Assim sendo, para tempos suficientemente pequenos, a distância entre a tangente e a secante será maior do que a distância entre a tangente e a circunferência. Essa propriedade geométrica é correta. No entanto, o raciocínio de Galileo é incorreto. Sabemos que se a velocidade for suficientemente alta e a atração para o centro suficientemente baixa, o corpo escapará da circunferência e se afastará do centro. Mas o que está errado no raciocínio de Galileo?

O erro é sutil: Galileo se confundiu com o diagrama. A figura reproduzida acima contém um diagrama de velocidade em função do tempo, que produz as retas secantes. *Essas retas não são uma indicação da trajetória do corpo.* Na verdade, a direção em que o corpo se move não tem nada a ver com essa figura. Não se pode fazer uma comparação entre um gráfico espacial (a circunferência) com um gráfico de velocidade em função do tempo.

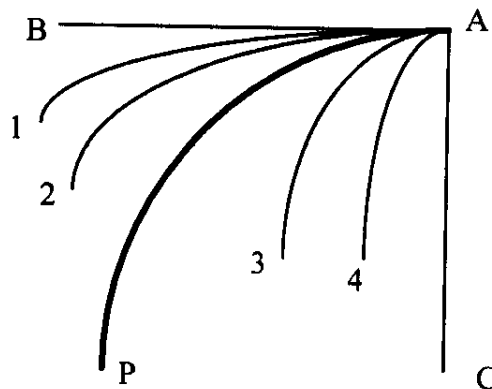
Utilizando uma representação vetorial moderna, podemos reproduzir e ver mais claramente o engano de Galileo.



Seja v a velocidade inicial de um corpo, devida à rotação da Terra. Seja a a aceleração da gravidade. A variação de velocidade Δv será paralela à aceleração a e a velocidade resultante v' será a soma vetorial de v e Δv . Nesta linguagem, o argumento de Galileo é o seguinte: por menor que seja a aceleração a , haverá uma variação Δv de velocidade e a velocidade resultante v' já não será tangencial ao círculo e sim uma secante, dirigindo-se para dentro da superfície da Terra. Ou seja: o movimento não afastará o corpo da superfície da Terra, e portanto o objeto ficará preso à superfície.

O erro do raciocínio está em considerar que Δv é finito, quando Δt tende a zero. O diagrama induz a pensar que, sendo a aceleração a finita, a variação de velocidade Δv também seria finita. Mas, quando Δt tende a zero, Δv também tende a zero e a velocidade do corpo, em cada instante, continua a ser tangencial.

Para fazer o raciocínio correto, Galileo teria que ter construído um gráfico do *espaço* percorrido pelo corpo, em sua queda, em função do tempo, para comparar com a *distância* entre a tangente e a circunferência, em função do mesmo tempo. Se fizesse isso, Galileo teria percebido que o espaço percorrido na queda, em função do tempo, produz uma parábola que pode, conforme o caso, ficar contida *dentro* da circunferência (curvas 3 e 4), ou ficar fora dela (curvas 1 e 2). No primeiro desses casos, o objeto ficaria retido na superfície da Terra; no segundo, escaparia.



Utilizando-se esse tipo de raciocínio, pode-se determinar qual a aceleração da gravidade necessária para reter os corpos e impedi-los de serem atirados para fora da Terra; ou calcular qual teria que ser a velocidade de rotação da Terra para que, com a gravidade existente, eles fossem atirados para fora da superfície. Basta utilizar dados de que Galileo dispunha, na época.

Façamos os cálculos com os dados atuais. O raio da Terra é de aproximadamente 6.370 km. A velocidade tangencial da Terra, no seu equador, é de aproximadamente 463 m/s. Supondo a superfície da Terra como perfeitamente esférica, um corpo que se movesse com essa velocidade ao longo da tangente ao equador, iria se afastar, em um segundo, uma distância de 0,017 m do equador (ou seja, 1,7 cm)⁴. Portanto, uma aceleração de 3,2 cm/s² (capaz de produzir uma queda de 1,7 cm em 1 segundo) seria o mínimo necessário e suficiente para reter um corpo na superfície do equador terrestre. Portanto, se a gravidade terrestre fosse muito menor do que é, ou se a rotação da Terra fosse muito mais rápida, os corpos seriam atirados para fora da superfície terrestre.

IV. Crítica e correção de Galileo por Mersenne :

As leis do movimento circular só foram estabelecidas em toda sua generalidade 30 anos depois, por Huygens e Newton. Pode parecer, portanto, que toda a crítica aqui colocada é anacrônica: não se pode criticar Galileo por não utilizar uma teoria que ainda não existia. No entanto, note-se que tomamos acima o cuidado de não utilizar a conhecida fórmula da aceleração do movimento circular uniforme - exatamente pois esta fórmula não era conhecida ainda, na época de Galileo. O raciocínio utilizado acima é do mesmo tipo do que Galileo estava utilizando, apenas empregando unidades e valores modernos.

Podemos mostrar que esta crítica não é anacrônica graças a um fato histórico: o erro de Galileo não passou despercebido na época. Ele foi notado e criticado, poucos anos depois, por um outro defensor de Copérnico e amigo de Galileo: o padre Marin Mersenne. Em sua obra "Harmonie universelle", Mersenne mostra, por um raciocínio equivalente ao utilizado acima, que Galileo estava errado. E este livro foi publicado apenas 4 anos depois da obra de Galileo.

No seu livro, Mersenne expõe primeiramente a argumentação apresentada por Galileo no "Diálogo" e, em seguida, passa a examinar sua validade (MERSENNE, *Harmonie universelle*, livro II, props. 16-18). Através de cálculos bastante simples, Mersenne mostra que um móvel que se deslocasse seguindo a tangente à superfície da Terra (no equador), com a velocidade tangencial da Terra, se afastaria uma polegada, uma linha e 1/9 de linha da superfície terrestre, em um segundo⁵. Ora, no mesmo tempo, um corpo em queda livre cai 144 polegadas

⁴ Galileo faz diversos cálculos desse tipo, em seu livro. O modo moderno mais fácil de fazer esses cálculos é utilizando trigonometria. Se o raio da Terra é R , a distância d ao longo da tangente é $R \tan \varphi$, onde φ é o ângulo que subtende essa distância, medido a partir do centro da Terra. A distância entre a tangente e a circunferência é $D = R(\sec \varphi - 1)$ ou aproximadamente $R(1 - \cos \varphi)$. Portanto, para pequenos ângulos, temos:

$$D = R(1 - \cos \varphi) = R(1 - \cos^2 \varphi) / (1 + \cos \varphi) \cong R \sin^2 \varphi / 2 = d^2 / 2R$$

⁵ O valor calculado por Mersenne é o dobro do valor correto.

(de acordo com as medidas de Mersenne, quase 30% inferiores ao valor atualmente aceito). Portanto, o efeito da gravidade é 133 vezes superior ao efeito devido à rotação e não infinitamente superior, como pensava Galileo.

Em seguida, Mersenne avalia o efeito de uma mudança de velocidade da Terra: se a velocidade da Terra fosse o dobro, essa razão cairia para aproximadamente 30:1 (ou seja: a gravidade seria apenas 30 vezes maior do que o efeito da rotação). Portanto, se a rotação da Terra fosse mais rápida ainda, ocorreria a extrusão dos corpos - a gravidade não reteria mais os corpos em sua superfície. Mersenne também conclui que os corpos que caíssem mais lentamente do que as pedras (corpos mais leves), que descessem menos de uma polegada em um segundo, não conseguiriam retomar à superfície terrestre. E conclui:

Mostramos portanto que não é verdadeiro que, mesmo aumentando-se o movimento tangencial e diminuindo-se o que ocorre pela secante [o movimento de queda], o caminho que o peso deve percorrer para chegar à circunferência seria tão pequeno que qualquer tempo, por menor que fosse, ser-lhe-ia suficiente para atingi-la (...). No entanto, se nossos números se afastam mais da verdade do que as linhas propostas por ele [Galileo], que cada um se permita examiná-los mais exatamente (MERSENNE, Harmonie universelle, voZ. 1, pp. 145-6).

Mersenne estava correto, aqui, e Galileo estava errado. Era preciso mais do que o argumento geométrico de Galileo para responder ao argumento clássico contra a rotação da Terra. Ou seja: Galileo não sabia explicar por qual motivo os corpos não são lançados para fora pela rotação da Terra. Como havia pelo menos um argumento contra a rotação da Terra ao qual Galileo não deu uma resposta satisfatória, não se pode dizer que ele tenha estabelecido uma base física coerente, compatível com a astronomia de Copérnico. Assim, seus contemporâneos poderiam, racionalmente, negar-se a aceitar o movimento da Terra, utilizando o argumento de extrusão por rotação.

É relevante assinalar que a análise que Galileo faz dos fenômenos de rotação constituem uma parte importante de seu livro e não uma mera menção passageira ao assunto. Ao longo de muitas páginas, Galileo continua a discutir os fenômenos de rotação, chegando a muitas conclusões erradas. Galileo determina, acertadamente, que a tendência a atirar os corpos para fora cresce com a velocidade e decresce com o raio. Isso é verdade; sabemos que a aceleração centrípeta é proporcional ao quadrado da velocidade e inversamente proporcional ao raio. No entanto, Galileo não chega a determinar o tipo de proporcionalidade e, por isso, imagina que os dois efeitos (aumento de raio e aumento de velocidade) possam se cancelar. Ele chega a sugerir, por exemplo, que a força necessária para manter um corpo em movimento de rotação depende apenas da velocidade angular do movimento e que a capacidade da Terra de lançar para fora os corpos de sua superfície seria igual à de uma pequena roda que girasse também uma vez em vinte e quatro horas [416]. Ou seja: Galileo não consegue compreender as propriedades do movimento de rotação uniforme, que para nós parece tão simples. É bem possível que o mesmo tipo de confusão possa se passar na mente de nossos estudantes. Valeria à pena fazer um teste.

V. A teoria das marés de Galileo

Outro ponto importante da obra de Galileo em que ele chega a conclusões opostas às que aceitamos hoje é seu estudo das marés. Ao longo de grande parte do "Diálogo", o objetivo de Galileo é responder às objeções *contra* o movimento da Terra. De um modo geral, os argumentos que ele apresenta procuram mostrar que, *apesar do movimento da Terra*, não devem surgir os efeitos que eram previstos pela antiga mecânica e que tudo se passa como se a Terra estivesse parada. O ponto culminante dessa argumentação defensiva de Galileo é a sua famosa apresentação do chamado "princípio da relatividade mecânica" ou "princípio da relatividade de Galileo" (ver MARTINS, 1986). Através desse princípio, Galileo defende que não se pode perceber efeitos do movimento de um sistema [se o movimento for retilíneo e uniforme] através de experimentos feitos dentro do próprio sistema. Assim, o movimento da Terra não produz efeitos observáveis nos fenômenos que ocorrem na própria Terra. Além disso, como já se sabia, Galileo enfatiza que as aparências celestes podem ser explicadas tanto pelo sistema de Copérnico como pelo de Ptolomeu, embora se possa dar preferência ao de Copérnico por ser mais simples.

No entanto, se toda a argumentação de Galileo fosse "defensiva" assim, a única conclusão possível seria que o modelo de Copérnico é tão aceitável quanto o de Ptolomeu. Mas o que Galileo quer mostrar é que o sistema de Copérnico é melhor e é o único verdadeiro. Por isso, um ponto fundamental (e final) do "Diálogo" é a discussão de um fenômeno que lhe parece ser decisivo: as marés. Para Galileo, as marés são um fenômeno decorrente dos movimentos da Terra e que seria impossível de explicar se a Terra estivesse em repouso⁶.

A teoria das marés que Galileo apresenta no quarto dia do "Diálogo", havia sido desenvolvida muito tempo antes. Ela foi divulgada inicialmente sob a forma de uma carta que ele enviou ao Cardeal Orsino, datada de 8 de janeiro de 1616.

Galileo critica várias explicações anteriores das marés - entre as quais, a de um sacerdote jesuíta, Marcantonio de Dominis, que supunha que a Lua atraía a água dos mares⁷. Depois de descartar algumas explicações, Galileo investiga a possibilidade de dar conta das marés por causas mecânicas. Apresenta então sua proposta, sob a forma de uma comparação.

Se tomarmos um recipiente com água e se ele for agitado para um lado e para o outro, a água não se manterá nivelada e horizontal, mas oscilará, subindo de um lado e descendo do outro. Galileo utiliza como exemplo um barco navegando, mas cheio de água: se ele for

⁶ O argumento das marés também já mereceu muitos estudos. Ver, por exemplo: METZ 1980 e 1982, PITT 1988. No entanto, a discussão aqui apresentada é diferente das anteriores.

⁷ A suposição de que a Lua influenciava as marés era muito antiga, proveniente de observações de correlação entre as

fases da Lua e as marés. A idéia de uma força de atração surgiu muitas vezes antes do trabalho de Newton, mas estava

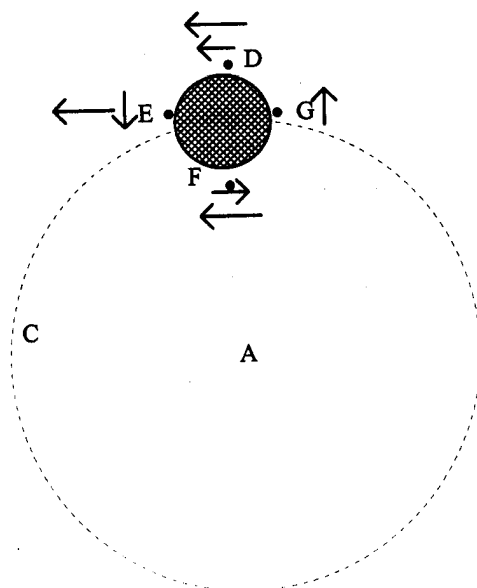
geralmente associada a idéias astrológicas. Talvez por isso tal concepção tenha parecido inadequada a Galileo. Quase ao final de seu livro, Galileo chega a criticar Kepler, admirando-se que ele, "de engenho livre e agudo, e que tinha em mãos os movimentos atribuídos à Terra, tenha dado ouvidos e concordado com o domínio da Lua sobre a água, e a

propriedades ocultas, e infantilidades semelhantes".

acelerado repentinamente, a água irá para trás e subirá nessa parte, descendo, pelo contrário, na proa. Se o navio for retardado ou parado bruscamente, a água subirá na proa e descerá na popa. (GALILEO, *Dialogo dei massimi sistemi*, v. 3, p. 236; *Dialogue concerning the two chief world systems*, p. 424; "Moto progressivo ed ineguale può fare scorrer l'acqua contenuta in un vaso").

Galileo compara esse fenômeno ao que ocorre no Mediterrâneo, afirmando que as partes da Terra também se aceleram e retardam periodicamente. Para mostrar isso, Galileo emprega o seguinte raciocínio:

A Terra tem dois movimentos principais, no sistema de Copérnico: em torno de seu eixo e em torno do Sol. A associação desses dois movimentos faz com que alguns pontos da Terra tenham maior velocidade resultante e outros uma menor velocidade, como se vê pelo diagrama acima: no ponto D, as velocidades de rotação e de translação se somam; em F, elas se subtraem. Ora, como cada parte da Terra está em certos instantes na posição F (ao meio-dia) e em outros instantes nas posições G, D e E (ao anoitecer, meia-noite e ao amanhecer, respectivamente), cada parte da Terra é sucessivamente acelerada e retardada: "(...) na associação desse movimento diário com o anual, resulta um movimento absoluto das partes da superfície terrestre, ora acelerado, ora retardado (...)" (GALILEO, *Dialogo dei massimi sistemi*, v. 3, p. 240; *Dialogue concerning the two chief world systems*, p. 427; "La mistione de i due moti annuo e diurno causa l'inegualità nel moto delle parti del globo terrestre"). Ou seja: a composição dos dois movimentos produz acelerações e retardamento nos movimentos de cada parte da Terra:



Concluamos portanto que, assim como é verdade que o movimento de todo o globo e de cada uma de suas partes seria constante e uniforme se ela tivesse um só movimento, fosse apenas o anual ou apenas o diário, é igualmente necessário que, mesclando esses dois movimentos, resultem movimentos não uniformes para as partes do globo, ora acelerados e ora retardados, mediante as adições ou subtrações da rotação diária à circulação anual. (GALILEO, *Dialogo dei massimi sistemi*, v. 3, p. 240;

Dialogue concerning the two chief world systems, p. 427; "La missione de i due moti annuo e diurno causa l'inegualità nel moto delle parti del globo terrestre")

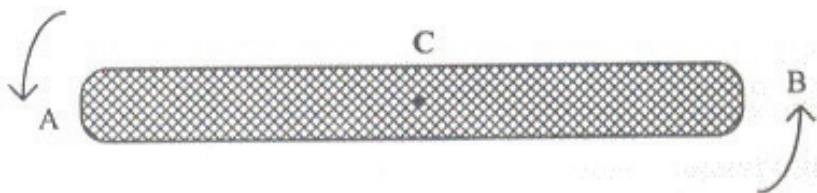
Assim como no barco a aceleração ou retardamento fazem oscilar a água para um lado ou para o outro, da mesma forma o movimento irregular das partes da Terra produz, segundo Galileu, as marés. Portanto, a existência das marés é (para Galileu) uma indicação empírica de que a Terra tem dois tipos de movimento.

VI. Dificuldades da teoria das marés de Galileu

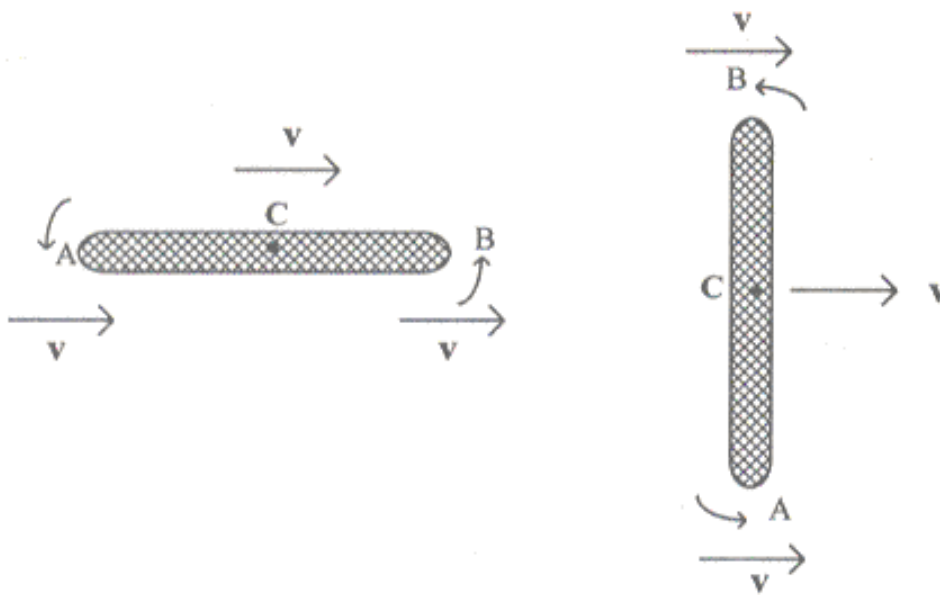
A explicação de Galileu sofre de pelo menos dois defeitos graves: é inconsistente com as observações e é inadmissível de acordo com a mecânica do próprio Galileu.

A inconsistência com as observações é fácil de constatar: as marés deveriam, de acordo com essa explicação, apresentar um ciclo de 24 horas, mas seu ciclo é de cerca de 12 horas. Além disso, a maré alta deveria corresponder a uma hora fixa do dia (pois depende da posição do ponto considerado em relação ao Sol) e no entanto observa-se que seu horário varia.

Por mais que Galileu tente adaptar sua teoria aos fenômenos (e vice-versa), o ajuste é inadequado e por isso seus contemporâneos não aceitaram sua explicação. Sob o ponto de vista histórico, no entanto, o mais interessante é assinalar que essa teoria é inadmissível sob o ponto de vista mecânico, pois viola o princípio de relatividade de Galileu. De fato, imaginemos que tivéssemos, dentro da cabine fechada de um navio, um dispositivo formado por um recipiente alongado, cheio de água, girando horizontalmente em torno de um eixo vertical que passe por seu centro C.



Se o navio estiver parado, toda a situação é simétrica, e a água deve subir igualmente nas duas extremidades A e B do recipiente. Mas, se o navio estiver em movimento de translação uniforme, o que acontecerá? De acordo com o princípio de relatividade de Galileu, tudo deveria ocorrer como se o navio estivesse parado. No entanto, pelo argumento que Galileu utiliza para analisar as marés, o movimento de translação do navio, adicionado vetorialmente ao movimento das extremidades A e B do recipiente, faz com que essas extremidades estejam às vezes aceleradas, às vezes retardadas, pois sua velocidade resultante é variável. Isso deveria produzir oscilações da água do recipiente, e "marés", que nos permitiriam perceber se o navio está parado ou em movimento de translação uniforme.



Vê-se, assim, a incompatibilidade da teoria de marés com o princípio da relatividade que o próprio Galileu expõe tão bem, na segunda parte do mesmo livro.

Sob o ponto de vista lógico, uma das duas coisas deve ser abandonada. Se quisermos abandonar o princípio da relatividade, cairá por terra toda a defesa que Galileu faz de Copérnico contra os argumentos de Aristóteles, Ptolomeu e Ticho Brahe. Se, pelo contrário, aceitarmos o princípio da relatividade, a teoria das marés cai por terra e Galileu já não dispõe de evidências a favor do movimento da Terra.

O argumento de Galileu sobre as marés é, à primeira vista, plausível. Ele é capaz de confundir praticamente todos os estudantes que entrem em contato com o mesmo, pela primeira vez. O raciocínio parece correto. Mas aceitamos o princípio da relatividade e não essa teoria das marés. Qual o erro?

Quando se compõe um movimento de rotação com outro de translação, surge de fato uma velocidade resultante variável. Portanto -e isso Galileu concluiu corretamente - existe uma aceleração presente no movimento. Mas o que ele não percebeu é que essa aceleração é *radial*: é a aceleração presente em qualquer movimento circular.

De fato: retomemos ao argumento de Galileu. As velocidades resultantes nos pontos **D** e **F** são diferentes apenas porque as velocidades tangenciais (devidas à rotação da Terra) são de sentidos opostos. Ora, basta esse fato para perceber que existe uma aceleração. Ou seja: a existência de uma aceleração independe da existência do movimento de translação. Essa aceleração que vai alterando a velocidade (vetorial) tangencial é exatamente a tão familiar aceleração centrípeta. No entanto, ela aparece aqui tão oculta, que mesmo os bons alunos são incapazes de interpretar corretamente a situação.

Galileu não dispunha de uma teoria adequada dos movimentos circulares, por isso lhe foi impossível perceber que sua explicação era incorreta. No entanto, é estranho que ele não percebesse que sua mecânica se tomava *incoerente*, pela incompatibilidade entre o princípio de relatividade e a explicação das marés.

Pode-se concluir que, na própria época de Galileu, seu argumento sobre as marés era inadequado como demonstração do movimento da Terra.

Deve-se adicionar que, pela mecânica Newtoniana, a composição de dois movimentos circulares produziria efeitos periódicos observáveis, pois, neste caso, há duas acelerações centrípetas, radiais, com direções diferentes, cuja resultante varia periodicamente. Mas Galileu não poderia utilizar um argumento desse tipo, por desconhecer os princípios físicos subjacentes a tal tipo de análise.

VII. Conclusão

Sob o ponto de vista histórico, esses dois exemplos aqui analisados mostram que:

-existe pelo menos um argumento contra o movimento da Terra (o da extrusão dos corpos pela rotação) que Galileu tentou responder e ao qual não proporcionou uma resposta satisfatória;

-o fenômeno que Galileu apresentou como uma evidência positiva dos movimentos da Terra (as marés) introduz uma incoerência na mecânica de Galileu; essa evidência é insatisfatória, além disso, por não estar de acordo com os fatos observados mais gerais, relativos às marés.

Assim sendo, Galileu não conseguiu defender o sistema de Copérnico nem derrubar o de Ptolomeu. A revolução copernicana não se completou com Galileu. Se for possível indicar uma época e um nome, deve-se dizer que a revolução copernicana se completou com Newton, 35 anos depois. Mas isso é uma outra história.

Sob o ponto de vista didático, esses dois exemplos mostram a existência de grandes dificuldades conceituais por trás de um assunto "elementar" da mecânica: o estudo do movimento circular uniforme. O conhecimento dessas dificuldades pode auxiliar o professor, que deve ser capaz de compreender as dúvidas (às vezes sutis) dos estudantes e de discutir de forma aprofundada os conceitos envolvidos nesse tema.

VIII. Referências Bibliográficas

- 1 -COPERNICUS, Nicolaus. *On the revolution of the heavenly spheres (De revolutionibus)*. Trad. Charles G. Wallis. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952. (Great books of the western world, 16).
- 2 -GALILEI, Galileo. *Dialogo di Galileo Galilei Linceo dove ne i congressi di quattro giornate si discorre sopra i due massimi sistemi del mondo - tolemaico e copernicano*. In: GALILEI, Galileo. *Opere*. Ed. Pietro Pagnini. 5 vols. Firenze: Salani, 1964.
- 3 - -----*Dialogue concerning the two chief world systems - Ptolomaic and Copernican*. Trad. Stillman Drake. 2. ed. Berkeley: University of California, 1967.
- 4 - GILBERT, William. *On the loadstone and magnetic bodies (De magnete)*. Trad. P. Fleury Mottelay. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952. (Great books of the western world, 28).

- 5 - HALL, A. Rupert. *A revolução na ciência, 1500-1750*. Trad. Maria Teresa Louro Pérez. Lisboa: Edições 70, 1988.
- 6 - KOYRÉ, Alexandre. *Études galiléennes*. Paris: Hermann, 1966.
- 7 - MARTINS, Roberto de Andrade. Galileo e o princípio da relatividade. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* (9): 69-86, 1986.
- 8 - MERSENNE, Marin. *Harmonie universelle*. 3 vols. Paris: CNRS, 1975.
- 9 - METZ, Donald W. On Galileo's method of causal proportionality. *Studies in the History and Philosophy of Science* **11**: 229-42, 1980.
- 10 - ----- . The concept of structure in Galileo: its role in the methods of proportionality and *exsuppositione* as applied to the tides. *Studies in the History and Philosophy of Science* **13**: 111-31, 1982.
- 11 - PITT, Joseph C. Galileo, rationality and explanation. *Philosophy of Science* **55**: 87-103, 1988.