GALILEU E A NATUREZA DOS TUPINAMBÁ

Para demonstrar teoria das marés, Galileu escreveu o *Discurso do fluxo e refluxo do mar*. Em seguida, publicou *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo: ptolomaico e copernicano*. Ele desconsiderou a Lua como razão das marés, fato inequívoco para os tupinambá

AO CONTRÁRIO DE GALILEU *(centro, à esquerda)*, que atribuiu as marés a resultados de forças envolvendo a rotação e translação da Terra, os tupinambá, segundo relato do monge francês Claude d'Abbeville, de 1614, identificaram esse fenômeno como produzido pela ação da Lua.

© COSTA/LEEMAGE/OTHER IMAGES; RITUAL TUPINAMBÁ: REPRODUÇÃO

CONCEITOS-CHAVE

- Não reconhecer a Lua como principal razão das marés, apesar das evidências observacionais, foi um erro cometido por Galileu. À época, um pescador já sabia que período e altura da maré dependem da fase da Lua.
- Em *História da missão dos padres capuchinhos na ilha do Maranhão e terras circunvizinhas*, publicado em Paris, em 1614, 18 anos antes da publicação do *Diálogo* de Galileu, o monge francês Claude d'Abbeville registrou que os tupinambá atribuíam à Lua o fluxo e o refluxo do mar e distinguiam muito bem as duas marés cheias.
- Johannes Kepler, contemporâneo de Galileu, explicou as marés pela ação conjunta do Sol e da Lua. Mas mereceu uma dura crítica de Galileu para quem Kepler "deu ouvidos e seu assentimento ao poder da Lua sobre as águas, às propriedades ocultas e outras mentiras".
- Apenas em 1687 Isaac Newton atribuiu as marés à atração gravitacional da Lua e, com menor intensidade, do Sol, sobre a superfície da Terra.

– Os editores

Por Germano B. Afonso

Durante o século 17, no final da Renascença, uma teoria das marés representava um grande desafio, pois era um fenômeno para o qual o filósofo grego Aristóteles (384 a.C. - 322 a.C.) não havia sequer proposto uma explicação. Além disso, havia uma forte polêmica entre o sistema geocêntrico, estruturado por Aristóteles e melhorado por Cláudio Ptolomeu (83-161), e o sistema heliocêntrico de Nicolau Copérnico (1473-1543), pois do ponto de vista experimental, um sistema não era em nada superior ao outro.

Assim, quem conseguisse formular uma teoria satisfatória para as marés conquistaria notoriedade. Provavelmente, essa foi a principal motivação de Galileu Galilei (1564-1642), em defender com tanto empenho sua teoria do fenômeno das marés, cuja principal causa seriam os dois movimentos circulares da Terra: o de rotação em torno de seu eixo (diurno) e o de translação em torno do Sol (anual) afirmando, com toda a certeza, que o sistema de Copérnico era o correto.

Para apresentar sua teoria das marés, Galileu escreveu, em 1616, o *Discurso do fluxo e refluxo do mar*, na forma de uma carta ao cardeal Alessandro Orsini e publicou, em 1632, o livro *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo: ptolomaico e copernicano*.

O fato de Galileu não considerar a Lua como principal razão das marés, apesar de todas as evidências observacionais, foi seu maior erro.

Naquela época, qualquer pescador sabia que período e altura da maré dependem da fase da Lua. Para concluir que o astro tem relação com o fenômeno, há um passo a seguir, dado por diversos observadores.

No século 7, Beda, o Venerável (674-735), atribuiu as marés à ação da Lua e forneceu métodos para prevê-las em um porto, 900 anos antes de Galileu apresentar sua teoria.

No livro *História da missão dos padres capuchinhos na ilha do Maranhão e terras circunvizinhas*, publicado em Paris, em 1614, 18 anos antes da publicação do *Diálogo*, o monge francês Claude d'Abbeville relatou: "Os tupinambá atribuem à Lua o fluxo e o refluxo do mar e distinguem muito bem as duas marés cheias que se verificam na lua cheia e na lua nova ou poucos dias depois". Isso mostra que, muito antes de Galileu apresentar sua teoria, os indígenas que habitavam o Brasil já sabiam que a Lua é a principal razão das marés.

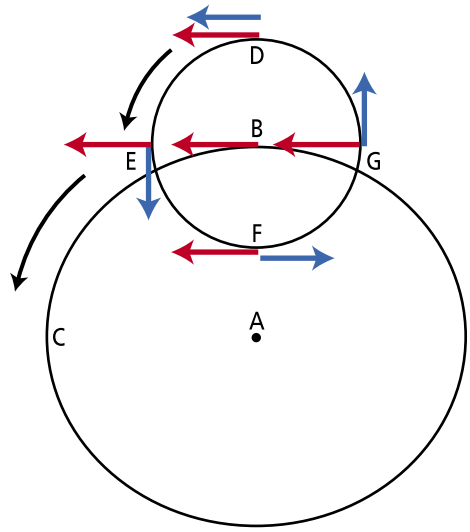
Johannes Kepler (1571-1630), contemporâneo de Galileu, explicou as marés pela ação conjunta do Sol e da Lua. No entanto, Galileu escarnecia de Kepler nestes termos: "Apesar de seu espírito aberto e penetrante, ele deu ouvidos e seu assentimento ao poder da Lua sobre as águas, às propriedades ocultas e outras mentiras". Além disso, Galileu não considerava uma das leis empíricas de Kepler, publicadas em 1609, no livro *Astronomia nova*, onde ficou demonstrado que as órbitas dos planetas são elipses com o Sol em um dos focos, continuando a utilizar órbitas circulares, como Aristóteles, Ptolomeu e Copérnico.

Somente em 1687 Isaac Newton (1643-1727) demonstrou que a razão das marés é a atração gravitacional da Lua e, com menor intensidade, do Sol, sobre a superfície da Terra.

Apesar da nossa familiaridade com as marés, elas permanecem um dos fenômenos astronômicos menos entendidos pelo grande público. Portanto, a seguir, apresentamos as teorias de Galileu e a de Newton, de uma forma simplificada e, depois, comparamos suas explicações para os períodos das marés mais facilmente observados: o diurno, o mensal e o anual.

A Teoria das Marés

Galileu afirmava que a causa principal das marés são os dois movimentos da Terra: o diurno, em torno de seu eixo de rotação, e o anual, em torno do Sol. Para facilitar a compreensão de sua hipótese Galileu utilizou a figura no alto, que completamos com os sentidos das velocidades diurna *(azul)* e anual da Terra *(vermelho)*. Ele fez coincidir o plano do equador terrestre com o plano da órbita da Terra em torno do Sol (eclíptica), fazendo com que os dois movimentos da Terra ocorressem no mesmo plano.



CONCEPÇÃO PROPOSTA por Galileu não teve confirmação observacional, o que significa uma contradição em relação ao método experimentalista que ele recomendou. Kepler identificou marés com resultado da ação Sol/Lua mas recebeu críticas de Galileu. Isaac Newton, com sua gravitação universal, resolveu a questão de forma definitiva.

Os pontos B, D, E, F e G têm a mesma velocidade anual orbital, da direita para a esquerda. Os pontos da superfície da terra D, E, F e G também estão animados de velocidade diurna rotacional em torno do ponto B, sendo que essa velocidade tem sentidos diferentes, dependendo do ponto considerado. Assim, considerando cada ponto da superfície terrestre em relação à velocidade anual, temos:

No ponto F, meio-dia, há uma diminuição da velocidade, pois a velocidade diurna é subtraída da velocidade anual;

No ponto D, meia-noite, há um aumento da velocidade, pois a velocidade diurna é adicionada à velocidade anual;

Nos pontos E e G, nascente e poente, respectivamente, as velocidades são constantes e iguais à velocidade do ponto B (centro da Terra), pois a velocidade diurna é perpendicular à velocidade anual, não interferindo em seu valor, no sentido da direita para a esquerda. O segmento de reta GBE é tangente à circunferência anual no ponto B e paralela à velocidade anual nesse ponto, que representa o centro da Terra.

ERIKA ONODERA (artes)

Portanto, de G para E há uma aceleração e de E para G uma desaceleração, sendo que a maior velocidade é atingida no ponto F e a menor no ponto D.

Galileu demonstrou que da composição desses dois movimentos circulares uniformes, diurno e anual, resulta um movimento disforme, acelerado e retardado, para partes da superfície terrestre. Para ele, essa variação na velocidade resultante provocaria o fluxo e o refluxo das marés, ou seja, a subida e a descida do nível médio das águas dos oceanos, sem necessidade de participação da Lua.

A Solução de Newton

Newton apresentou a razão principal das marés como sendo a força gravitacional, no livro *Princípios matemáticos de filosofia natural*, conhecido como *Principia*, publicado em 1687. De fato, as marés constituem uma prova experimental da lei da gravitação universal de Newton que, de uma maneira superficial, pode ser enunciada como: a intensidade da força de atração entre dois corpos é diretamente proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa.

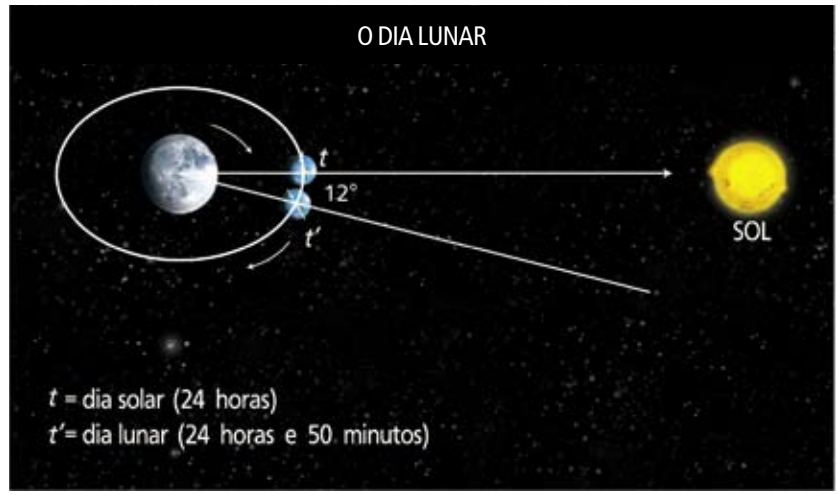
As marés na Terra são um fenômeno resultante, principalmente, da atração gravitacional exercida sobre a Terra pela Lua e, com menor intensidade, pelo Sol.

Tendo em vista que a força gravitacional aumenta com a diminuição da distância, a Lua atrai com mais força o lado mais próximo da Terra e com menos força o lado oposto, sendo que a força de atração do centro da Terra tem um valor intermediário em comparação com as duas porções situadas em lados simetricamente opostos em relação ao centro. Uma vez que os oceanos são líquidos, essas porções são praticamente livres para responder às diferentes forças de atração gravitacional da Lua.

Essas diferentes forças fazem a superfície da Terra inchar externamente em duas direções: no mesmo lado da Terra e no lado oposto, criando duas protuberâncias na superfície terrestre, pois parece que a porção de água mais próxima está sendo puxada e a mais afastada empurrada pela Lua, em relação ao centro da Terra. Essas protuberâncias são deslocadas pela rotação terrestre, produzindo o fluxo e o refluxo das marés.

A força que produz a maré, sendo a diferença da força gravitacional entre uma porção de água na superfície e um ponto no centro da Terra, é inversamente proporcional ao cubo da distância entre a Lua e a porção de água considerado da superfície da Terra. Assim, embora a força gravitacional do Sol seja maior que a da Lua sobre a Terra, a força de maré da Lua é cerca de 2,2 vezes maior que a do Sol, pois embora a sua massa seja menor, a distância à Terra também é menor. Logo, as marés seguem a Lua e não o Sol.

Além da atração gravitacional, que é dominante, devemos considerar outras causas secundárias para uma explicação mais realista das marés, como os movimentos de rotação e translação da Terra, que para Galileu eram a principal causa das marés.



PTOLOMAICOS também criticaram o modelo de Galileu que, observaram eles, se fosse verdadeiro, em determinado lugar o fluxo e refluxo do mar ocorreria uma única vez por dia e sempre à mesma hora. Galileu justificou essa contradição como resultado de causas secundárias das marés.

Teorias e Observações

Os defensores do modelo de Ptolomeu criticaram a teoria de marés de Galileu, imediatamente depois de sua publicação, pois se a parte principal da sua teoria fosse verdadeira, em determinado lugar o fluxo e o refluxo do mar ocorreriam somente uma vez por dia e sempre à mesma hora. Isso levando em conta que a maré depende da posição do lugar considerado em relação ao Sol. No entanto, o fato não está de acordo com as observações, pois muitas pessoas sabiam que há duas marés cheias por dia, em um período de pouco mais de 12 horas, e que o horário da maré cheia varia todos os dias, para o mesmo lugar.

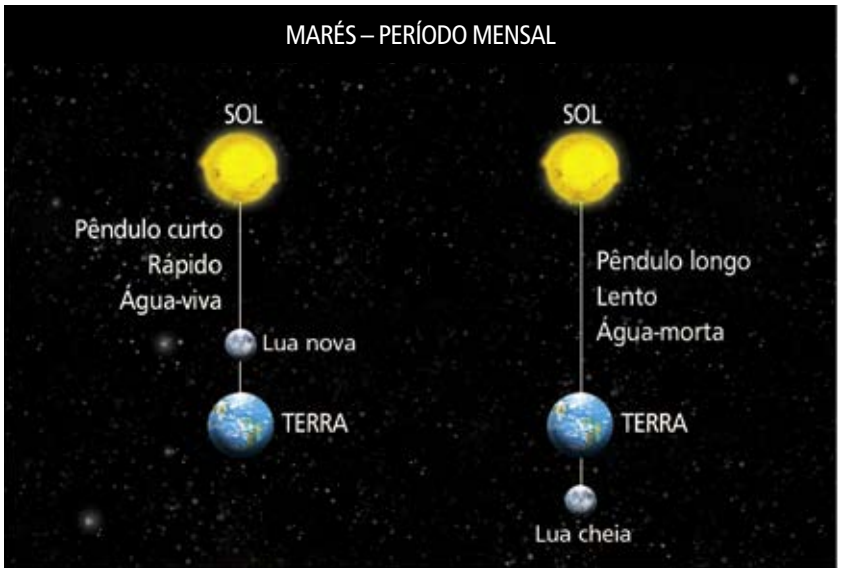
Galileu explicava essas discrepâncias como sendo devidas a causas secundárias das marés, ligadas a condições locais, como profundidade, tamanho e orientação do recipiente da água. Muitos críticos consideraram como não satisfatórias essas explicações de Galileu, chegando mesmo a acusá-lo de má-fé.

A translação da Lua, em torno da Terra, ocorre no mesmo sentido da rotação da Terra em torno do seu eixo. Logo, um ponto abaixo da Lua, na superfície da Terra, necessita girar 24 horas e 48 minutos (dia lunar) para alcançar novamente a Lua, que se adianta em relação ao Sol cerca de 12º por dia.

Segundo a teoria das marés de Newton, tendo em vista que há duas protuberâncias e a rotação

[O AUTOR]

Germano Afonso é pesquisador especialista do CNPq na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Doutor em astronomia pela Universidade de Paris VI, fez pesquisas de forças não gravitacionais em asteróides e satélites artificiais. Ganhou, em 1991, o prêmio Paranaense de Ciência e Tecnologia e, em 2000, o prêmio Jabuti, na categoria "Melhor livro didático", em conjunto com a equipe do Planetário do Pará – UEPA, com o livro *O céu dos índios Tembé*.



da Terra, um ponto sublunar da superfície terrestre, que parte de uma protuberância provocada pela Lua, passa em uma depressão, depois em uma protuberância, depois em uma segunda depressão e depois em uma segunda protuberância, quando encontra novamente a Lua. Isso produz duas marés altas e duas marés baixas em um dia lunar no ponto considerado. Então o intervalo de tempo entre duas marés altas, ou baixas, consecutivas é de 12 horas e 24 minutos. O adiantamento da Lua em relação ao Sol, vistos da Terra, faz com que a mesma seqüência de marés se atrase, em média, 48 minutos por dia.

Período Mensal

Na época de Galileu já se sabia que a altura das marés varia consideravelmente durante um mês sinódico ou uma lunação (29,5 dias).

Para explicar os períodos mensais das marés Galileu utilizou uma analogia do movimento do sistema Terra-Lua com o movimento de um pêndulo, fazendo interferir a Lua como um contrapeso que muda de posição. Galileu sabia que um pêndulo oscila com velocidade maior quanto menor for o comprimento da corda que suspende o peso que, nesse caso, seria constituído pelo sistema Terra-Lua. Como para a lua cheia o contrapeso do pêndulo fica mais distante do Sol que na lua nova, o sistema Terra Lua produziria marés mais intensas na lua nova do que na lua cheia. No entanto, as observações mostram que as marés de água-viva podem existir tanto na lua cheia como na lua nova. Assim, é evidente que essa explicação de Galileu é totalmente contrária ao fenômeno observado.

A teoria das marés de Newton explica a relação das marés com as fases da Lua da seguinte maneira:

À ÉPOCA DE GALILEU já se sabia a altura das marés varia ao longo de uma lunação. Para justificar esse período Galileu fez analogia entre o pêndulo e o movimento do sistema Terra/Lua. Considerou que a oscilação do pêndulo depende do comprimento da corda associada ao peso, neste caso, o sistema binário *(acima)*. Mas observações mostraram que marés de água viva ocorrem tanto na lua cheia quanto nova *(abaixo)*. Raciocínio do pêndulo também foi aplicado à translação *(página seguinte)*.

Os maiores desníveis entre a preamar e a baixa-mar ocorrem duas vezes por mês, nos dias de lua nova e de lua cheia (marés de sizígia ou marés de água-viva). Nessas duas ocasiões a Terra, a Lua e o Sol se encontram alinhados, as marés altas são mais altas e as baixas mais baixas, pois as forças de maré se somam na formação das duas protuberâncias de lados opostos. A palavra sizígia deriva do grego e significa "ficar em uma mesma linha".

Os menores desníveis entre a preamar e a baixa-mar ocorrem duas vezes por mês, nos dias de lua crescente e de lua minguante (marés de quadratura ou marés de água-morta). O Sol e a Lua ficam em ângulo reto em relação à Terra e suas forças de maré não se somam, formando marés menos intensas que as de sizígia.

Período Anual

Para demonstrar o período anual, Galileu utilizou praticamente o mesmo raciocínio de sua teoria principal das marés. Mas, dessa vez, considerando o plano do equador terrestre inclinado em relação à eclíptica e o centro da Terra situado em dois pontos separados em 90º, um no solstício (início da primavera ou do outono) e outro no equinócio (início do verão ou do inverno).

Na figura ilustrativa de Galileu, temos:

AIPA = plano da eclíptica;

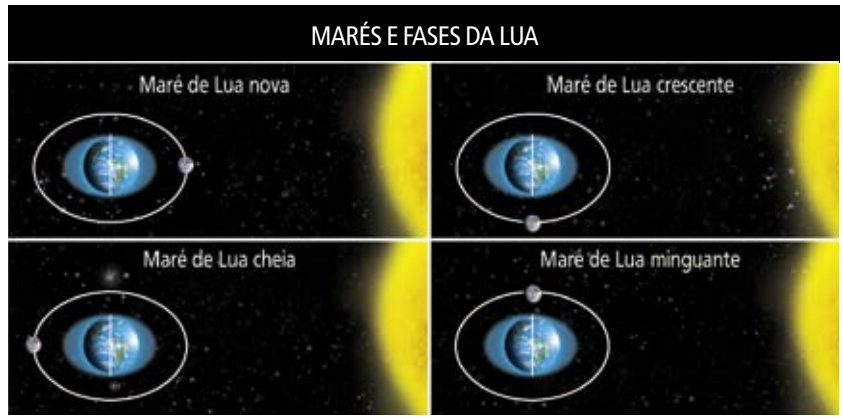
A e I = centro da Terra no solstício e no equinócio, respectivamente;

DGEFD= elipse resultante da projeção do equador terrestre sobre o plano da eclíptica, com centro no ponto A (no solstício) e no ponto I (no equinócio);

CAB e CIB = eixo de rotação da Terra (paralelos) no solstício e no equinócio;

DAE = intersecção do equador terrestre com a eclíptica no solstício. Tangente à eclíptica no ponto que passa pelo centro da Terra (A) em um solstício;

DIE = intersecção do equador celeste com a



eclíptica no equinócio. Perpendicular à tangente à eclíptica no ponto que passa pelo centro da Terra (I) em um equinócio;

DE = comprimento do segmento de reta paralelo à velocidade anual no ponto A (solstício);

SV = comprimento do segmento de reta paralelo à velocidade anual no ponto I (equinócio).

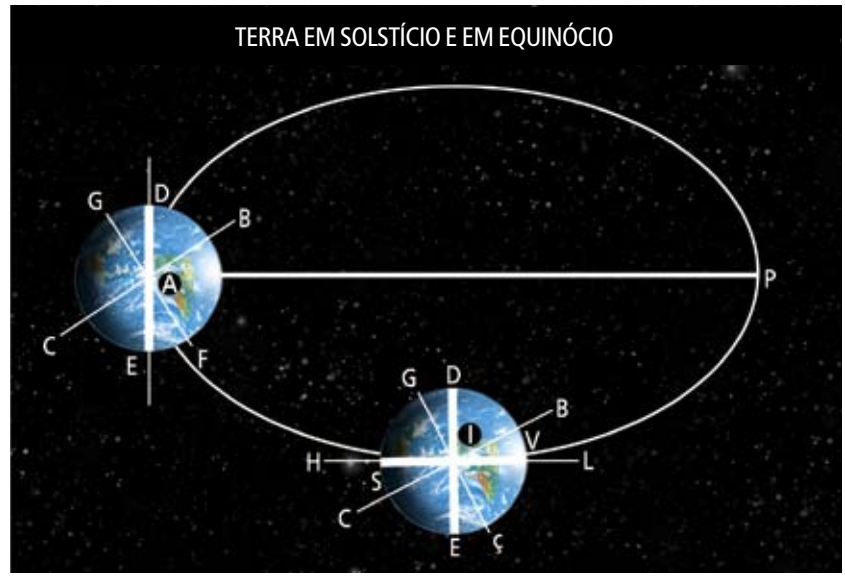
Durante seu movimento anual em torno do Sol, o eixo de rotação da Terra (eixo dos pólos), aponta sempre na mesma direção do espaço sideral, ficando sempre paralelo a si mesmo, ainda que consideremos instantes diferentes de tempo; portanto, ele oscila em relação ao plano da órbita da Terra (eclíptica). Devido à inclinação entre o plano do equador e o plano da eclíptica, durante um ano, também há uma variação na relação da composição da velocidade do movimento diurno e a velocidade do movimento anual, em dois pontos diferentes da órbita terrestre; por exemplo, no solstício e no equinócio, resultando na periodicidade anual do fenômeno.

Galileu mostrou que o comprimento do segmento paralelo à velocidade anual é maior nos solstícios (DE), pois está no mesmo plano da eclíptica que nos equinócios (SV), onde se trata de uma projeção no plano da eclíptica. Dessa maneira, as marés deveriam ser maiores nos solstícios do que nos equinócios, pois nos solstícios a combinação dos dois movimentos, anual e diurno, produziria a máxima aceleração e o máximo retardamento, enquanto que nos equinócios, quando os dois movimentos estão em seu ângulo máximo de inclinação, o efeito dessa combinação é mínimo. No entanto, é o oposto que se verifica nas observações, pois as marés são mais intensas nos equinócios do que nos solstícios.

Além disso, a teoria de Newton mostra que a intensidade anual das marés depende da declinação do astro causador das marés (Lua ou Sol), que é o ângulo de afastamento do astro em relação ao plano do equador terrestre. Quanto menor for a declinação do Sol, maior será a intensidade da força de maré e vice-versa. Portanto, as marés anuais são máximas nos equinócios, onde esse ângulo é nulo, e mínimas nos solstícios, onde esse ângulo é máximo (23,5 graus). Esse fato já era conhecido por Francis Bacon (1561-1626) e Giovanni Riccioli (1598-1671), que criticaram duramente a teoria de Galileu, pela inconsistência com os dados da observação.

Uma Contradição de Galileu?

No princípio da relatividade, apresentada na segunda Jornada do *Diálogo*, Galileu mostra que a rotação da Terra não poderia provocar nenhum fenômeno mecânico, como os descritos pelos seguidores dos ensinamentos de Aristóteles (peripatéticos): a Terra estouraria, os pássaros não



reencontrariam seus ninhos, haveria fortes vendavais, os corpos não cairiam verticalmente etc. No entanto, na quarta Jornada do mesmo livro Galileu pretende que a rotação da Terra provoca o fenômeno das marés. Muitos cientistas, incluindo Ernst Mach (1838-1916), posteriormente, criticaram a teoria de Galileu, por considerarem que é incompatível com o princípio da relatividade. A idéia física principal é que pequenos segmentos de movimento circular podem ser considerados retilíneos, principalmente no caso dos movimentos da Terra, que em uma volta diurna (360º) percorre apenas um segmento de arco menor que 1º do movimento circular anual. No entanto, em nenhum lugar do *Diálogo*, Galileu deixa explícito que o movimento de translação anual é considerado retilíneo e uniforme, o que realmente contrariaria seu princípio da relatividade.

Percebemos que na demonstração das marés de solstícios e de equinócios, embora falsa, Galileu considera explicitamente os dois movimentos, diurno e anual, como movimentos circulares uniformes, resultando da composição deles um movimento circular disforme. Mesmo com a mecânica Newtoniana obtém-se um movimento circular resultante disforme, variando periodicamente e com uma componente tangencial. Assim, parece não haver qualquer incompatibilidade entre o princípio da relatividade e a teoria das marés, na concepção de Galileu.

A teoria das marés de Galileu é considerada falsa, pois ela parte da causa errada e é inconsistente com as observações. É surpreendente que o criador do método experimental em ciências tenha negligenciado dessa maneira as observações do fenômeno. ■

PARA CONHECER MAIS

www.astronomia2009.org.br

Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo ptolomaico e copernicano. Galileu Galilei: Tradução, introdução e notas de Pablo Rubén Mariconda. Discurso Editorial (Fapesp), 2001.

On the tidal time delay of the Earth. A.S Sant'Anna e G.B. Afonso, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 16, págs. 3-14, 1998.

Universo. Enciclopédia de Astronomia. Duetto Editorial, 2008.