

Apêndice

A Quarta Jornada do *Diálogo* e a teoria das marés

Na Quarta Jornada, Galileu propõe uma explicação das marés, que ele pensava ser uma prova conclusiva do movimento da Terra. A avaliação unânime dos críticos, intérpretes e historiadores consiste em considerar que a teoria de Galileu é falsa. Entretanto, a partir desse juízo unânime desenvolveram-se duas linhas interpretativas divergentes concernentes ao valor da Quarta Jornada no conjunto do *Diálogo*. Assim, segundo uma primeira perspectiva de interpretação, há um verdadeiro descompasso entre as três primeiras jornadas e esta última, como se o *Diálogo* se concluísse com um enorme fracasso, por meio de um apêndice mal concebido, cujo conteúdo científico é inteiramente desprezível. Essa é a posição, por exemplo, de Clavelin para quem não se deve esquecer “que a Quarta Jornada, por sua vontade de propor provas decisivas tão espetaculares quanto possível em favor do copernicanismo, não está de fato no mesmo plano que as outras jornadas. Seu aporte poderia, portanto, ser dissociado (como efetivamente se produziu) sem que a influência da obra seja de nenhum modo diminuída” (Clavelin, 1996, p. 482). A conclusão de Clavelin é uma consequência de sua adesão a uma perspectiva histórica progressiva, que mede, por assim dizer, a importância de cada uma das jornadas em termos de sua contribuição para a constituição da mecânica clássica. Como os argumentos desenvolvidos na Quarta Jornada não foram assimilados pelo desenvolvimento ulterior da mecânica clássica, seu conteúdo científico resulta, para Clavelin, ser desprezível. Esse mesmo tipo de conclusão é obtido, a partir de perspectivas epistemológicas diferentes, por autores como Shea e Marí. O primeiro, após uma exposição sumaríssima da teoria de Galileu (cf. Shea, 1992, p. 226-40), cujo principal objetivo é o de fazer um recorte da teoria, ressaltando aqueles aspectos que favorecem a perspectiva epistemológica do apriorismo, e cuja acuidade e imparcialidade podem, por isso, ser contestadas, conclui: “Essa teoria abortada das marés é um cadáver no armário da revolução científica. Exposta à plena luz do dia, ela é muito útil para lembrar que a ciência galileana não

era tanto um jogo experimental quanto um desafio platônico. Nesse sentido, essa teoria merece ser célebre” (Shea, 1992, 243). Ou seja, a teoria galileana das marés só tem interesse na medida em que serve para corroborar a tese interpretativa de Shea, segundo a qual Galileu é platônico. Marí, de sua parte, adota uma perspectiva epistemológica oposta à de Shea, pois, para ele, o valor de uma teoria está na correspondência estrita entre a teoria e os dados observacionais, que parecem ser por ele considerados como dados brutos que revelam a realidade do mundo independentemente da interpretação teórica que lhes possa estar associada. Sua interpretação acentua, então, a falsidade da teoria das marés, que lhe parece tão óbvia – de fato, muito mais óbvia do que o era no contexto de sua enunciação –, que não é possível que Galileu não o soubesse. A partir disso, esgueiram-se em seus comentários juízos de valor sobre uma pretensa falta de caráter de Galileu ou, para não tratar a questão em um registro tão *ad hominem*, um suposto aspecto retórico, em sentido negativo, segundo o qual Galileu “sabia” que sua teoria era falsa e o dissimulava. A Quarta Jornada resulta, assim, ser uma espécie de paródia na qual Galileu procura deliberadamente enganar seu público (cf. Galileu, 1994, “Introdução”, p. lxi-lxvi). Evidentemente, os autores citados até aqui estão animados por perspectivas historiográficas e epistemológicas que, por mais questionáveis que sejam, pelo menos indicam o ponto de vista a partir do qual opera a análise interpretativa que preside a conclusão avaliativa da Quarta Jornada. Por fim, cabe ainda alinhar aos juízos negativos da Quarta Jornada aqueles, de resto muito freqüentes, de autores que não adotam qualquer perspectiva crítica racional, seja historiográfica ou epistemológica, e que assentam, por isso, a avaliação da teoria das marés em supostas motivações psicológicas, que tendem a conduzir a posição de Galileu aos limites do paroxismo e do irracionalismo. É o caso de Gillet, cuja posição é claramente resumida por ele mesmo: “Se Galileu não se enganou quando afirmava que a Terra gira, não acontece o mesmo quando procura estabelecer uma teoria das marés. Seu furor de triunfar sobre o ensinamento das Igrejas e da Universidade e talvez um certo desejo de vingança falseiam grosseiramente seu raciocínio. Seu discurso é habilmente tortuoso e sua má fé lhe faz tomar liberdades com a lógica mais elementar” (Gillet, 1998, p. 39).

A outra linha interpretativa é aquela que adota uma perspectiva de recuperação do valor científico da Quarta Jornada, apesar da falsidade da teoria das marés nela exposta. Esse tipo de interpretação está basicamente constituído por duas vertentes. De um lado, estão aqueles que, embora reconhecendo o fracasso do objetivo visado por Galileu na Quarta Jornada, procuram elevá-la ao mesmo nível das demais, produzindo uma reavaliação parcial dos resultados alcançados por Galileu em sua teoria das marés. A outra vertente produz uma reavaliação mais incisiva da Quarta Jornada em termos do próprio objetivo visado por Galileu, a saber, enquanto prova do movimento da Terra. De modo geral, aderem à primeira vertente aqueles autores que se opõem à tendência historiográfica de conceber o desenvolvimento da ciência como linear e progressivo em direção a uma certa

versão que sintetizaria exemplarmente as contribuições científicas de um período histórico dado. Assim, em nosso caso, considera-se, com razão, a versão newtoniana como a versão mais completa da física clássica e a partir daí, agora sem razão, só se consideram como dignos de menção e de estudo aqueles esforços que foram, de um modo ou de outro, incorporados a essa versão. Ora, o caso das teorias das marés é justamente aquele em que as distorções desse modo de proceder mostram-se particularmente dramáticas, porque a concepção atrativista de Newton pareceu a muitos intérpretes e historiadores favorecer exatamente aqueles tipos de explicação das marés aos quais Galileu se opunha. Assim, não é raro encontrar, nos vários autores que trataram do assunto, juízos segundo os quais a explicação newtoniana das marés em termos da lei universal da gravitação e das diferentes forças gravitacionais exercidas primariamente pela Lua (mas também pelo Sol) sobre as diferentes partes dos oceanos e da Terra estava mais próxima daquelas teorias que supunham algum tipo de influência oculta da Lua sobre as águas dos mares e oceanos terrestres do que as teorias estritamente mecânicas de Galileu ou de Descartes. Opondo-se a esse modo de proceder, Sosio alerta que “quem se ocupa da história da ciência sabe bem que o critério de salvar aquilo que está vivo e lançar ao mar aquilo que está morto não responde a uma metodologia sã, que antes o erro se revela por vezes mais produtivo e fecundo que uma verdade encontrada por acaso” (Sosio, 1970, p. lxxii). Isso significa que o estudo do processo evolutivo dos princípios científicos deve ser conduzido, como diz Pagnini, “aproximando-nos às várias tentativas de nossos precursores e aos esforços feitos por eles para revelar aquilo que lhes havia escapado, com seu procedimento pessoal, com os seus desvios, com seus erros, antes, com a utilidade de seus erros, para colocar nosso espírito em condições de juízo menos restritas e mais independentes das contingências momentâneas do estado atual da ciência” (Pagnini, 1935, p. 300). Animados por essa perspectiva geral da importância crítica de uma análise conceitual e histórica dos erros, Sosio e Pagnini são levados, no caso particular da teoria galileana das marés, a insistir, por um lado, sobre a unidade do *Diálogo*, de modo que “as três primeiras jornadas se apresentam como uma preparação lenta e paciente, um trabalho assíduo de fundamentação sobre a qual deverá elevar-se o fastígio da quarta” (Sosio, 1970, p. lxxii). Incidentalmente, essa é também a posição de Drake, para quem a aparente falta de continuidade entre a Quarta Jornada e as demais deve-se ao fato de Galileu ter sido obrigado a alterar o título original da obra e, conseqüentemente, a remanejar as passagens do *Diálogo* que punham isso a claro, das quais, entretanto, teriam ficado significativamente as de [236]-[237] e de [439], onde parece claro a Drake que o “tema organizador” do *Diálogo* é a explicação das marés (cf. Drake, 1983a; 1986b). Por outro lado, embora aceitando a crítica geral de que o erro de Galileu consiste em uma compreensão e aplicação incorretas do princípio de relatividade do movimento desenvolvido na Segunda Jornada e, portanto, que Galileu falha em seu objetivo de provar pelas marés o movimento da Terra, Sosio e Pagnini procedem a uma recuperação dos

acertos de Galileu, que seriam basicamente o de ter chegado “na experiência da água oscilante no vaso... muito próximo da causa física local predominante nos fundos baixos” (Pagnini, 1935, p. 300) e de ter, conseqüentemente, visto que o problema das marés é essencialmente dinâmico e não apenas estático. Ambas contribuições são significativas e permitem recolocar a teoria das marés de Galileu em um lugar de destaque na história das tentativas de compreensão desse fenômeno complexo: “É surpreendente encontrar, nessa teoria falsa, uma boa parte daquilo que vai faltar à teoria ‘correta’ do final do século: avaliação das velocidades fantásticas nas quais se deveria propagar o efeito da maré, se não se levasse em conta o movimento da Terra, variação da intensidade do fenômeno entre as duas extremidades do Mediterrâneo, amplitude muito fraca num mar estreito orientado mais ou menos do norte para o sul como o Mar Vermelho, deslocamento horizontal das águas tanto mais forte em um ponto quanto menos elas af se deslocuem no sentido vertical etc. O simples exemplo da oscilação em um recipiente é revelador: falta apenas o que dá nascimento à oscilação do mar! O modelo seguinte (ou seja, o de Newton) vai enunciar essa origem e esquecer a oscilação (...)” (Maury, 1999, p. 609).

Mais incisiva na recuperação do valor científico da Quarta Jornada é a outra vertente representada por autores como Popper, Burstyn e Souffrin. A idéia central dessa interpretação é a de considerar que Galileu não estava primariamente preocupado em explicar as marés, mas que sua teoria foi desenvolvida com o objetivo claro de provar que a Terra se move. Ou seja, como diz Souffrin, a perspectiva teórica de Galileu “não é em primeiro lugar, retrospectivamente, a produção de uma teoria das marés; a perspectiva principal, do ponto de vista da epistemologia moderna, é a procura de uma prova física irrefutável do duplo movimento – diurno e anual – da Terra” (Souffrin, 2000, p. 115; cf., também, Burstyn, 1962, p. 181; Popper, 1974, p. 172). Segundo esses autores, a maioria dos intérpretes, ao analisar a Quarta Jornada como se ela fosse exclusivamente uma tentativa de explicar as marés, deixou de considerar o pano de fundo, representado pela questão de se a Terra está em movimento ou em repouso, e o sistema de referência teórico, representado pela concepção mecanicista, no interior do qual Galileu desenvolveu sua teoria. Ao contrário, quando se leva em conta que a teoria desenvolvida por Galileu tem o fim de provar o movimento da Terra, “somos levados...a justificar a racionalidade do método de Galileu em vários pontos nos quais ele foi criticado por vários historiadores; e assim somos levados a um melhor *entendimento histórico* de Galileu” (Popper, 1974, p. 174). Um desses pontos é exatamente a freqüente acusação de que haveria uma contradição entre a Segunda e a Quarta Jornadas na consideração galileana de que o comportamento das águas marinhas, no fenômeno das marés, poderia ser considerado como um efeito mecânico terrestre perceptível do duplo movimento da Terra, de modo que a teoria das marés contradiria o chamado princípio da relatividade galileana, segundo o qual nenhuma experiência feita no interior de um sistema mecânico inercial pode

decidir se o sistema como um todo está em movimento uniforme ou em repouso. Para Popper, “essa crítica seria falsa, histórica assim como teoricamente, uma vez que esse princípio *não* se refere aos movimentos *rotacionais*. A intuição física de Galileu – de que a rotação da Terra tem conseqüências não relativistas – era correta” (Popper, 1974, p. 171, nota 19; cf., também, Souffrin, 2000, p. 120, nota 19). O resultado dessa linha interpretativa é, então, que se passa a considerar que Galileu consegue efetivamente dar a prova do duplo movimento da Terra a que se havia proposto na Quarta Jornada. Assim, Burstyn afirma que Galileu “estava certo: não podemos explicar os fenômenos das marés tal como os encontramos sem assumir o duplo movimento da Terra. Isto é, as marés são diferentes numa Terra movente do que seriam se a Terra estivesse estacionária e, portanto, pelo menos em princípio, as marés constituem uma prova do movimento da Terra” (Burstyn, 1962, p. 165). Ou, como o diz Souffrin de modo ainda mais incisivo: a teoria galileana das marés “é uma teoria exata enquanto ela propõe uma prova da realidade do duplo movimento da Terra, exatamente no sentido e nos limites, convém reafirmá-lo, em que se diz que o pêndulo de Foucault constitui uma prova da rotação diurna da Terra” (Souffrin, 2000, p. 139). A recuperação da teoria das marés no contexto da discussão dos movimentos da Terra comporta, então, uma recuperação decisiva e completa da Quarta Jornada e, conseqüentemente, da unidade do *Diálogo*: “Entre os grandes pioneiros do novo pensamento, somente Galileu escreveu polêmicas populares, somente ele tentou provar a partir dos fenômenos terrestres que a Terra se move. Podemos negar-lhe, então, uma participação maior na superação do universo geostático? Podemos negar que sua prova do movimento da Terra, apesar de todos seus erros e obscuridades, foi um sucesso de propaganda? Certamente, a Quarta Jornada do fulgurante *Diálogo* brilha tão luminosa quanto suas três predecessoras e é igualmente significativa para nosso entendimento da física do século dezessete” (Burstyn, 1962, p. 182).

A discussão anterior permite marcar a singularidade da Quarta Jornada na obra de Galileu. Entretanto, para ter uma idéia mais clara do lugar que a teoria das marés nela desenvolvida ocupa na ciência do século XVII, penso que é útil fazer um relato, ainda que breve e esquemático, das principais tentativas de explicação do fenômeno das marés.

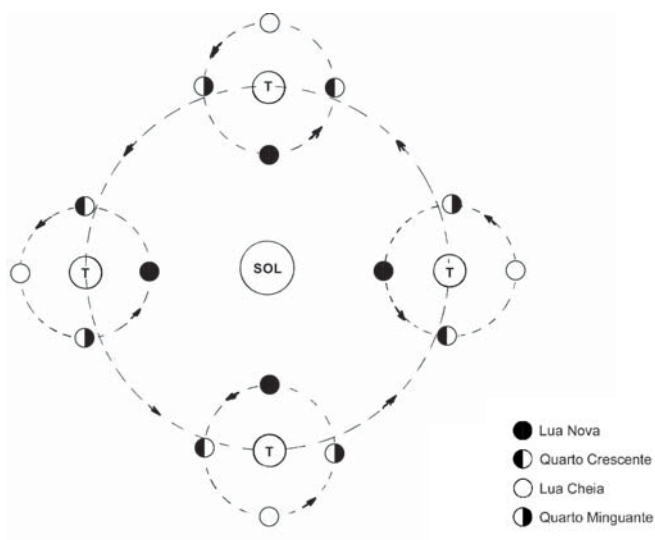
Logo de início, cabe lembrar que a Antiguidade greco-latina não dedicou em geral uma atenção especial às marés, das quais não existe nenhum estudo particularizado nos grandes autores, como Platão e Aristóteles. É bastante plausível que isso seja devido ao fato de que as navegações antigas se concentraram no Mediterrâneo, onde o fenômeno das marés, com algumas exceções, é quase inexistente. É significativo, a esse propósito, que o relato do que parece ser o primeiro contato dos navegantes antigos com o fenômeno das marés se dê fora do ambiente mediterrâneo. Com efeito, Quintus Curcius, em *De rebus gestis Alexandri Magni* (*Dos feitos guerreiros de Alexandre Magno*), Livro IX, caps. 34-37, relata as dificuldades dramáticas da armada de Alexandre, surpreendida pelo flu-

xo e refluxo de grande amplitude na foz do rio Indo (cf. Mach, 1925, Cap. 2, Seção IV, item 7, p. 204-6, que reproduz, na íntegra, o texto de Quintus Curcius). O fenômeno das marés não passou, portanto, despercebido aos antigos e é, na verdade, surpreendente que uma das primeiras tentativas razoavelmente elaboradas de explicação tenha sido a explicação mecânica de Seleuco (c. 150 a.C.), um seguidor de Aristarco que, como este, sustentava a mobilidade terrestre. Aparentemente a teoria de Seleuco consistia basicamente em considerar que, devido à rotação da Terra, o ar é posto em movimento e perturba as águas com uma agitação à qual se associa, para a produção das marés, uma ação perturbadora sobre o ar e deste sobre a água causada pela Lua em seu movimento em torno da Terra. Além do caráter mecânico da explicação, é notável nessa teoria o reconhecimento de um vínculo entre o fenômeno das marés e o movimento da Lua. Todas as teorias antigas, de que temos notícia, reconhecem e popularizam uma conexão de algum tipo entre as marés e a Lua, embora se afastem da explicação mecânica de Seleuco, para adotar explicações de tipo qualitativista. Assim, Posidônio (c. 135-51 a.C.), que parece ter sido o primeiro a distinguir os três períodos diário, mensal e anual das marés, atribui a causa das marés à influência dos astros e particularmente da Lua. Plínio, o Velho (23-79 d.C.), em sua *História natural*, desenvolve uma teoria na qual a causa das marés consiste em uma certa simpatia entre o elemento da água e a Lua. E, finalmente, Ptolomeu (séc. II d.C.), no *Tetrabiblos*, dá um tratamento claramente astrológico ao liame revelado pela experiência entre o movimento da Lua e as marés. Em resumo, pode-se creditar à Antiguidade, primeiro, o estabelecimento de um conjunto básico de observações que estabelecem uma correlação entre as marés e a Lua; segundo, a presença, desde o início, de dois tipos de teorias explicativas: a teoria “mecânica” de Seleuco, que reduz a causa das marés à combinação dos movimentos da Lua e da Terra, e as teorias “qualitativas”, que constituem a grande maioria das teorias do período e que atribuem o fluxo e refluxo do mar a algum tipo de atração ou afinidade entre as águas e a Lua.

As explicações qualitativas tornaram-se dominantes durante a Idade Média e principalmente na filosofia natural renascentista, quando os conceitos de “atração” e “afinidade” foram amplamente associados aos de simpatia e antipatia, produzindo uma gama bastante ampla de explicações, pelas quais a causa das marés era referida seja a uma febre produzida pela Lua nas águas dos mares, seja a uma espécie de aquecimento produzido pela Lua, seja ainda a uma espécie de rarefação. Todas elas têm, entretanto, em comum o fato de encontrar a causa das marés em uma “afinidade qualitativa” ou em uma “identidade oculta de natureza” entre a Lua e as águas terrestres.

As marés passam a ser particularmente importantes a partir do século XVI com o advento das grandes navegações transoceânicas. O problema do fluxo e refluxo do mar ganha assim um alcance prático inegável. São os navegantes, freqüentemente surpreendidos pela variação inesperada do nível das águas ou por

correntes de comportamento aparentemente instável, que reclamam uma melhor compreensão das causas de um fenômeno natural que os põe não raro em dificuldades. São eles também que contribuem decisivamente com seus relatos observacionais para uma melhor descrição das marés nas costas oceânicas da Europa, África, América e Índia e das correntes em estreitos como Gibraltar, Magalhães e Madagascar. Emerge, assim, em compilações como as de Pietro da Medina, *L'arte del navegar (A arte de navegar)*, Veneza, 1554 e Lucas Waghenauer, dito Aurigarino, *Speculum nauticum (O espelho náutico)*, Leiden, 1586 (cf. Shea, 1992, p. 284, nota 1), uma descrição bastante razoável do conjunto de fatos a serem explicados por uma teoria das marés. A descrição consiste basicamente no reconhecimento de que as marés apresentam variações cíclicas segundo três períodos: diário, mensal e anual. Para o período diário, na maior parte dos lugares, a sucessão entre duas marés altas (fluxo) e duas marés baixas (refluxo) obedece a um intervalo de aproximadamente 12 horas e 25 minutos, ou seja, a metade do intervalo de tempo de 24 horas e 50 minutos entre duas passagens consecutivas da Lua pelo meridiano do lugar. Quanto ao período mensal, ele se apresenta, por um lado, como uma decorrência do retardamento do período diário de em média 50 minutos a cada dia, até que, em pouco mais de 28 dias, as marés altas e baixas retornam ao mesmo horário. Por outro lado, há uma variação mensal na amplitude das marés que depende das posições relativas da Lua e do Sol. Assim, quando a Lua e o Sol estão em conjunção (novilúnio) ou em oposição (plenilúnio), a maré se diz de “água viva” ou de “sizígia” e atinge sua amplitude máxima; quando a Lua e o Sol estão em quadratura (quarto crescente ou minguante), a maré se diz de “água morta” ou de “quadratura” e atinge sua amplitude mínima.



do anual, observa-se um ciclo com marés mais altas nos equinócios que nos solstícios.

Entretanto, o progresso na descrição dos efeitos das marés não é acompanhado por um progresso na determinação das causas das marés, pois, embora seja marcante, no decorrer do século XVI, a tendência de passagem de teorias qualitativas a teorias mecânicas, o poder preditivo dessas teorias continua bastante escasso, vale dizer, sem qualquer alcance prático efetivo para os navegantes. Pode-se arrolar as várias tentativas de explicação do século XVI em 4 grupos de teorias. O primeiro grupo é constituído por explicações animistas, das quais é exemplar a de Antonio Ferrari, dito Galateo, que, no *De situ elementorum (Do lugar dos elementos)* de 1558, desenvolve uma analogia entre as marés e a respiração, pela qual o fluxo e refluxo é associado à expiração e inspiração. O segundo grupo está representado exemplarmente pelas teorias de Bernardino Telesio (1509-1588), Francesco Patrizi (1529-1597) e Girolamo Borro (1512-1592). Os dois primeiros autores, com base em uma analogia entre o mar e a água de um recipiente, consideram que a água sobe quando seu calor natural é aumentado pela influência do Sol, Lua e estrelas e desce quando retorna a seu calor natural. Borro, que ensinava na Universidade de Pisa quando Galileu era estudante, invoca o “calor temperado” da Lua que age como uma virtude atrativa, por analogia ao fogo que faz a água de um recipiente elevar-se quando se aproxima do ponto de ebulição. O terceiro grupo está constituído por explicações que combinam inicialmente aspectos qualitativos e mecânicos, mas que posteriormente tornam estes últimos francamente predominantes e essenciais para a explicação das marés. Assim, Julius Caesar Scalinger (1484-1558), invocando uma espécie de simpatia entre a Lua e as águas dos oceanos, considera que as águas se elevam seguindo o movimento da Lua para oeste (fluxo) até que, batendo nas costas da América, são refletidas, causando desse modo o refluxo do mar. Pandolfo Sfrondato, embora abandone a tese da simpatia, que critica asperamente como obscurantista, considera também que as águas do mar são carregadas para oeste, mas agora pela esfera celeste, ou seja, pelo movimento do primeiro móvel, até encontrar as costas da América, o que produz o movimento de reciprocação do fluxo e refluxo do mar. Ambas explicações coincidem, então, em considerar as marés como causadas por uma mudança de direção do fluxo das águas devida ao anteparo físico representado pelo continente americano e ambas parecem ter sido sugeridas pela corrente que flui de este para oeste pelo estreito de Magalhães. A explicação de Bacon está, como veremos, em acordo com esta posição. Finalmente, cabe mencionar uma exceção notável no período representada pela teoria de Andrea Cesalpino (1519-1603), que também foi professor na Universidade de Pisa na época em que Galileu aí estudou. Cesalpino propõe uma explicação, na qual o fluxo e refluxo do mar é considerado como um movimento libratório, cuja causa não deve ser atribuída diretamente ao fluido, mas a seu continente, ou seja, a Terra. Essa explicação surpreendentemente inovadora e claramente mecânica é, entretanto, fruto de idéias astronômicas bas-

tante tradicionais e conservadoras. Com efeito, com o objetivo de escapar à necessidade de postular uma nona e uma décima esferas – a primeira para explicar a precessão dos equinócios e a segunda para explicar o fenômeno imaginário de sua trepidação – Cesalpino atribui à própria Terra o movimento que produz esses fenômenos, ou seja, atribui à Terra um movimento libratório e irregular, cujo efeito terrestre observável seriam as marés. Alguns intérpretes (cf. Ellis, 1876; Shea, 1992) consideram que a teoria de Cesalpino antecipa a de Galileu em um sentido que precisaremos mais abaixo.

Durante o século XVII, assiste-se ao desenvolvimento convergente de duas tendências: de um lado, uma recusa firme de todo tipo de explicação em termos de qualidades ocultas, às quais se associam, não sem razão, as idéias de atração e afinidade, consideradas como conceitos obscuros de uma concepção mágica da natureza, na qual se assentam a astrologia, a alquimia e a medicina judiciária. A preferência recai, por oposição, em teorias racionalistas, isto é, produzidas com o uso metódico da razão e guiadas, de um modo ou de outro, pelo bom senso. De outro lado, durante quase todo o século XVII, há um predomínio claro das teorias ditas mecanicistas com Bacon, Galileu e Descartes até o surgimento e afirmação da teoria de Newton. As marés, em particular, podem ser tomadas como um exemplo típico do avanço, durante a primeira metade do século XVII, da visão mecanicista do mundo, para a qual os fenômenos naturais observáveis podem ser explicados em termos de mecanismos subjacentes, que reduzem as causas à matéria e ao movimento. É verdade que as teorias mecanicistas das marés também tinham, como suas predecessoras, pouco alcance preditivo, mas elas alteraram profundamente o campo conceitual disponível para o tratamento do problema.

Bacon desenvolve sua teoria inicialmente num opúsculo intitulado *De fluxu et refluxu maris (Do fluxo e refluxo do mar)*, escrito em 1611 (cf. Bacon, 1876a). Embora a teoria de Bacon seja eminentemente mecanicista, ela está profundamente assentada na cosmologia tradicional. Com efeito, Bacon é um partidário do geocentrismo e, para ele, o movimento diurno que se observa os corpos celestes fazerem de oriente (este) para ocidente (oeste) é, tal como na cosmologia aristotélica, um movimento real. Entretanto, para Bacon, esse movimento de rotação perpétua não é apenas celeste, mas cósmico, ou seja, está presente desde a sumidade dos céus, nas estrelas fixas, até o ar e a água da Terra. A velocidade desse movimento cósmico diminui progressiva e regularmente à medida que se aproxima do globo terrestre imóvel, de modo que o movimento é máximo no caso da esfera das estrelas fixas e decresce continuamente da esfera de Saturno até a esfera da Lua, para tornar-se mínimo no caso do ar e do oceano. Em suma, o oceano participa do movimento do primeiro móvel que produz nele uma corrente que se desloca lenta e constantemente de oriente para ocidente. Cabe notar, portanto, que o movimento recíproco de fluxo e refluxo do mar, que constitui propriamente o que se chama de maré, possui nesta teoria um caráter derivado, pois, com efeito, na ausência dos continentes, tudo o que se teria seria a simples presença de uma

corrente em direção ao ocidente. É, portanto, a interrupção da corrente pelos continentes o que causa o fluxo e refluxo do mar. Supondo-se, então, o que corresponde esquematicamente à situação geográfica fatural, que a massa de água seja dividida por dois grandes continentes dispostos no sentido norte – sul, a saber, a América, de um lado, e Europa, Ásia e África, de outro, entre os quais se estendem dois grandes oceanos – o Atlântico e o Pacífico –, pode-se concluir, segundo Bacon, que “esses dois obstáculos comuniquem à totalidade da massa das águas uma dupla reciprocidade e que derive disso o ‘quarto’ do movimento diurno, pois, sendo as águas freadas por ambos os lados e sendo duplo o avanço e a repercussão, o movimento acontecerá duas vezes por dia” (Bacon, 1876a, p. 59).

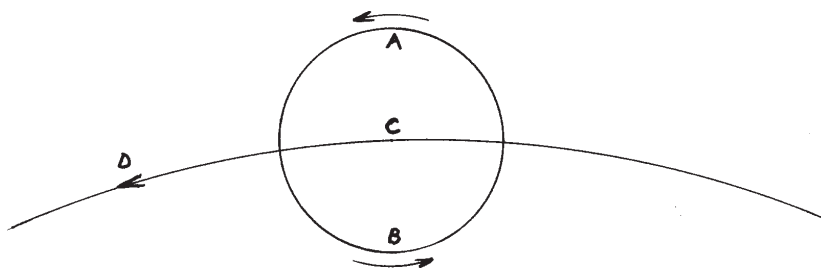
Nove anos mais tarde, tendo tomado conhecimento do *Discorso del flusso e refluxo del mare* (*Discurso do fluxo e refluxo do mar*) escrito por Galileu em 1616, Bacon retorna ao problema das marés, no segundo livro do *Novum organum* (*Novo órgão*), particularmente nos aforismas 36 e 46, aprofundando seu tratamento no bojo de uma crítica à teoria de Galileu, que atribuía as marés ao duplo movimento de rotação e translação da Terra. Assim, no aforisma 36, Bacon apresenta e discute as principais teses sobre as marés, considerando-as, do ponto de vista do método, como exemplos de explicações alternativas a serem submetidas a uma determinação por meio de experimentos cruciais (*instantiæ crucis*). Aqui a tese de Galileu é criticada por não respeitar os dados da observação, ou seja, no caso, o período diário de seis horas entre fluxo e refluxo, mas Bacon também se vê forçado a pôr sua própria tese em acordo com os dados, pois a experiência mostra que os fluxos e refluxos têm lugar ao mesmo tempo nos dois lados do Atlântico sobre as costas da Flórida e sobre as costas da Espanha, de Portugal e da África. Além disso, a refutação completa da doutrina dos “influxos” lunares e a ausência de qualquer menção às fases da Lua fazem que a teoria de Bacon seja incapaz de explicar as variações mensais na amplitude das marés. De qualquer modo, é notável que Bacon continue mantendo uma solução do problema das marés exclusivamente em termos de movimento e composição de movimentos, numa direção que concorda com o mais intransigente dos mecanicismos.

Outra explicação mecanicista das marés é a de Galileu. Desenvolvida originalmente para dar conta do período diário no *Discorso del flusso e refluxo del mare*, escrito em 1616 sob a forma de carta endereçada ao cardeal Orsini, a teoria é refundida e expandida para os períodos mensal e anual na Quarta Jornada do *Diálogo*, com o objetivo claro de mostrar que, dentre os fenômenos periódicos observáveis na Terra, as marés só podem ser explicadas sob uma perspectiva copernicana.

Convém, de início, lembrar que, apesar das diferenças entre os modelos explicativos de Bacon e Galileu, ambos coincidem em um ponto de extrema relevância para a solução futura do problema das marés, a saber, a idéia de que as marés não dependem de qualquer alteração do estado físico da água, como era suposto pelas teorias qualitativas, mas constituem verdadeiramente um “movimen-

to local progressivo”. Em suma, está presente em ambos autores a idéia de que a um impulso inicial a água responde por um movimento de propagação pelo qual o impulso inicial se transmite à totalidade do elemento. Entretanto, opondo-se de resto a Bacon que, como vimos, defendia a imobilidade do globo terrestre, a idéia central da teoria de Galileu é que a origem, ou causa, desse movimento progressivo não reside primariamente na água, mas é impresso nela por alterações no estado de movimento (por aceleração ou retardamento) do recipiente que a contém, ou seja, das cavidades oceânicas ou, em suma, da Terra. Muitos intérpretes (cf., por exemplo, Ellis, 1876, p. 43-4; Sosio, 1970, p. lxxv-lxxvi; Shea, 1992, p. 225-6) viram nessa idéia a marca de uma possível influência ou, pelo menos, antecipação de Cesalpino. Efetivamente, as teorias de Cesalpino e Galileu coincidem na idéia de que as marés são causadas pelo movimento do vaso continente, mas esse é o único ponto em comum, porque, de resto, as teorias são enormemente diferentes.

Tendo, então, como fio condutor essa idéia de que qualquer movimento das águas marinhas é primariamente um movimento do vaso continente, a explicação de Galileu para o período diário das marés consiste em mostrar que as diferentes partes da Terra recebem acelerações e retardamentos periódicos como resultado da composição dos movimentos de rotação diurna e de translação anual da Terra. Suponhamos, então, que a linha CD represente uma parte da órbita percorrida pela Terra em seu movimento anual ao mesmo tempo em que gira sobre seu centro C



de este (oriente) para oeste (ocidente). É fácil ver na figura que, para as partes que estão em A, os movimentos anual e diurno são feitos na mesma direção, enquanto para as partes que estão em B, possuem direções opostas. Resulta disso que, em A e em B, as partes da Terra assumem velocidades respectivamente iguais à soma e à subtração daquelas velocidades que possuem em cada um desses dois movimentos. Assim, cada parte da superfície terrestre é alternadamente acelerada e retardada segundo um intervalo de 12 horas, produzindo nas águas marinhas um fenômeno análogo àquele que se constata em um balde com água oscilante ou em uma barca repleta de água que se move ora mais veloz ora mais lentamente: as águas se acumulam alternadamente para trás e para a frente. Entretanto, cessado o impulso inicial que lhe é comunicado pelo recipiente, a água, que se acumula para

trás, quando o impulso é causado pela aceleração do vaso, ou para frente, quando é causado pelo retardamento do vaso, continua o movimento, agora em virtude de sua própria gravidade, com idas e vindas alternadas até reduzir-se ao estado de equilíbrio.

O modelo galileano é, portanto, razoavelmente complexo e envolve a ação conjunta de duas causas: uma *causa primária e potíssima* das marés, sem a qual o fenômeno simplesmente não teria lugar, que corresponde à aceleração e retardamento das partes da Terra e que depende da composição dos dois movimentos anual e diurno da Terra; e uma *causa secundária*, que reside na própria gravidade da água, a qual, tendo recebido o impulso que lhe é comunicado pelo recipiente, procura conduzi-la ao equilíbrio com alternâncias sucessivas.

A principal crítica ao modelo de Galileu, já formulada em sua época em particular por Bacon (cf. Bacon, 1973, II, § 46), consiste em afirmar que, de acordo com a causa primária suposta por Galileu, o fluxo e refluxo não deveria produzir-se mais que uma vez por dia, o que é claramente contrário à experiência que mostra o fluxo e refluxo ocorrer, na maior parte das regiões, duas vezes por dia. A resposta de Galileu consiste em afirmar que o período diário não depende apenas da causa primária, mas também da causa secundária, à qual está ligada, por sua vez, uma série de condições particulares, ditas causas concomitantes, que correspondem basicamente às condições locais em que se realiza a propagação da “onda” produzida pela causa primária: profundidade do recipiente, tamanho e orientação do recipiente, tipo de costa marinha etc. Em suma, as causas concomitantes, envolvidas na propagação do impulso inicial, alteram de tal modo o intervalo de 12 horas entre os impulsos primários que o período diário dos fluxos e refluxos acaba reduzido em média a 6 horas. Muitos intérpretes consideram a resposta de Galileu evasiva e alguns até o acusam de má fé. Entretanto, a meu ver, é notável o esforço de Galileu para tratar do fenômeno das marés em toda sua complexidade e o aspecto mais marcante de sua explicação do período diário reside exatamente na consideração da componente dinâmica envolvida no movimento de propagação da água e tratada por Galileu no conjunto das causas secundárias e concomitantes. Essa componente importante do problema terá um lugar bastante secundário na teoria de Descartes e desaparecerá da teoria de Newton. Ambas teorias tratarão fundamentalmente das condições estáticas gerais do fenômeno com base em modelos simplificados que eliminam as condições locais particulares.

Ainda mais engenhosa e totalmente sem precedentes é a explicação que Galileu elabora para o período mensal das marés. O problema a resolver é o de encontrar uma causa de disformidade, com período mensal, na disformidade cotidiana – aceleração ou retardamento – do movimento do vaso continente, ou seja, da Terra. É notável, neste caso, a construção da analogia. Galileu utiliza como base da analogia o princípio de correspondência entre o tempo de revolução de um planeta e o tamanho de sua órbita, que havia sido originalmente introduzido, em [144]-[145] da Segunda Jornada, no contexto da discussão em favor da rotação

diurna da Terra. Segundo o princípio, que Galileu considera, em [474], expressar “uma coisa verdadeira, natural e mesmo necessária”, “um mesmo móvel, que é girado por uma mesma virtude motriz, efetua seu percurso por um círculo maior num tempo mais longo que por um círculo menor”. Esse princípio já havia sido confirmado, no contexto da discussão sobre o heliocentrismo das revoluções planetárias realizada na Terceira Jornada em [349]-[354], para a ordenação copernicana dos planetas no sistema solar, pois Saturno, cujo orbe é o maior, faz sua revolução em torno do Sol em 30 anos; Júpiter, em 12 anos; Marte, em 2 anos; a Terra, em 1 ano; Vênus, em 9 meses e Mercúrio, em 80 dias. O mesmo princípio é também confirmado pelas observações telescópicas do período de revolução dos planetas Mediceus (as luas de Júpiter), pois, quanto mais próximo o planeta está de Júpiter, ou seja, quanto menor a sua órbita, menor é o tempo de sua revolução. Entretanto, agora, no contexto da explicação das marés, o princípio será secundado por dois exemplos com o fim de estabelecer uma analogia do movimento do sistema Terra – Lua em torno do Sol, primeiro, com o mecanismo de regulação do tempo nos grandes relógios a engrenagens e, segundo, com as oscilações do pêndulo.

Quanto ao primeiro exemplo, diz Galileu em [474]-[475]: “Nos relógios de rodas, e particularmente nos grandes, para regular o tempo, os seus artífices instalam uma certa haste que gira horizontalmente e às suas extremidades adaptam dois pesos de chumbo; e, quando o tempo seja muito lento, basta aproximar um pouco os mencionados pesos ao centro da haste, tornando as suas vibrações mais freqüentes; e, ao contrário, para retardá-lo, basta afastar os mesmos pesos em direção às extremidades, porque desse modo as vibrações se fazem mais lentas e, conseqüentemente, alongam-se os intervalos das horas. Aqui a virtude motriz é a mesma, ou seja, o contrapeso, os móveis são os mesmos pesos de chumbo, e suas vibrações são mais freqüentes, quando estão mais perto do centro, ou seja, quando se movem por círculos menores”. É notável, neste primeiro exemplo analógico, a assimilação do sistema planetário a uma máquina; de fato, ao exemplo paradigmático de máquina, a saber, o relógio (cf. Daumas, 1964, Vol. II, p. 287-310; especialmente, p. 296). Não se trata, como se vê, simplesmente da imagem metafórica do mundo como uma máquina mas, antes, do uso efetivo de uma analogia pela qual um efeito da natureza, as marés, é referido a um mecanismo subjacente. No segundo exemplo, Galileu completa a analogia, aproximando o movimento do sistema Terra – Lua em torno do Sol ao movimento pendular. Com efeito, assim como o corpo, que se move por círculos menores, realiza suas revoluções em menor tempo, assim também um mesmo peso, quando suspenso por cordas desiguais, realiza em tanto menor tempo suas oscilações quanto menor for a corda que o suspende.

Construída, assim, a analogia, Galileu propõe como explicação do período mensal das marés uma hipotética desigualdade do movimento anual da Terra, cujo suposto mecanismo seria o seguinte: enquanto a Terra mantém uma distância cons-

tante do Sol, a distância da Lua ao Sol varia constantemente no curso do mês, atingindo a distância mínima na Lua nova e a máxima na Lua cheia. Isso significa que o centro do sistema Terra – Lua está mais próximo do Sol na Lua nova do que na Lua cheia. Ora, tal como acontece no movimento de um pêndulo, que é mais lento, quando a distância do peso ao ponto de suspensão é maior, e mais rápido, quando a distância é menor, o movimento anual da Terra sofre variações mensais dependentes do movimento da Lua em torno da Terra, acelerando-se na Lua nova e retardando-se na Lua cheia. A Lua funciona, portanto, como uma espécie de contrapeso, cuja posição é capaz de alterar a velocidade do sistema Terra – Lua em seu deslocamento em torno do Sol, dando origem ao período mensal das marés.

Esta explicação enfrenta problemas incontornáveis de adequação empírica, pois é uma consequência desse modelo que as marés de Lua nova, quando o movimento anual da Terra teria seu máximo de aceleração, deveriam ser máximas e as marés de Lua cheia, quando o movimento anual teria seu mínimo de aceleração, deveriam ser mínimas. Entretanto, a observação mostra que não há diferença significativa entre as marés de sizígias (novilúnio e plenilúnio). Apesar disso, do ponto de vista teórico, é de extrema relevância a idéia central da analogia, segundo a qual a Terra e a Lua são dois pesos de algum modo ligados ao Sol. Evidentemente, existe uma diferença considerável, que corresponde à analogia negativa, entre os casos do mecanismo de regulação do relógio (primeiro exemplo) e do pêndulo (segundo exemplo) e a revolução do sistema Terra – Lua em torno do Sol. Enquanto, no mecanismo de regulação do relógio, os pesos estão ligados por uma haste e, no pêndulo, o peso está ligado ao centro de oscilação por um fio, ou seja, enquanto, nesses dois casos, há uma ligação material rígida, no sistema Terra – Lua – Sol, a ligação entre os três corpos não é material mas, como mostrará posteriormente Newton, gravitacional. Ainda assim, a analogia positiva revela-se significativa, pois, de fato, as diferentes posições assumidas pela Lua, no curso de seu movimento em torno da Terra, exercem uma influência não só no próprio movimento da Lua, mas também no da Terra. Cabe ainda notar que Galileu não extrai de seu modelo qualquer consequência dinâmica, tal como a alteração da circularidade da órbita da Terra ou da Lua, limitando-se às variações de velocidade.

A explicação de Galileu para o período anual é menos engenhosa que a precedente mas tem o mérito de manter a unidade da teoria, porque, tal como fizera para os períodos diário e mensal, Galileu sustenta a tese central de que a causa do período anual deve encontrar-se na composição do movimento anual e do movimento diurno. O mecanismo, descrito de [482] a [485], é complexo; entretanto, pode-se considerar que a explicação consiste basicamente em mostrar que a inclinação do eixo terrestre com respeito à eclíptica (plano do orbe magno) varia no decorrer do movimento anual, determinando uma variação da velocidade absoluta da superfície terrestre. Em suma, “considerando o plano da eclíptica, o equador terrestre o interceptará segundo uma elipse. Ora, a tangente ao orbe magno, que passa pelo centro da Terra, será interceptada em dois pontos pela proje-

ção do equador terrestre; o comprimento do segmento resultante será diferente segundo a Terra se encontre nos solstícios ou nos equinócios; isso significa que, nos vários períodos do ano, haverá uma mudança na relação entre a velocidade do movimento diurno e a velocidade do movimento anual; donde, a periodicidade anual do fenômeno” (Sosio, 1970, p. lxxxv). De acordo com isso, as marés deveriam ser maiores nos solstícios, quando os dois movimentos, anual e diurno, estão na mesma linha, de modo que sua combinação produziria a máxima aceleração e retardamento, do que nos equinócios, quando os dois movimentos estão em seu ângulo máximo de inclinação e o efeito de sua combinação é mínimo. De fato, Galileu extrai essa consequência que, entretanto, é contrária à observação que mostra as marés serem máximas nos equinócios e mínimas nos solstícios.

Cabe, neste ponto, fazer um comentário metodológico geral a propósito da teoria das marés de Galileu. Como vimos, a teoria apresenta sérios problemas de adequação empírica; entretanto, isso não deve levar a supor que Galileu adere a um apriorismo de tipo platônico que despreza os dados da observação, porque os problemas de adequação empírica se devem, em grande parte, ao fato de Galileu tomar o fenômeno das marés em toda sua complexidade. Além disso, o ajuste da teoria à experiência é bastante fluido num assunto como o das marés, em que os dados da observação dependem dos relatos fragmentados dos navegantes e são emitidos sob os mais diversos pontos de vista. Por outro lado, a racionalidade do procedimento de Galileu não pode ser limitada unicamente à exigência do acordo da teoria com os dados de observação, pois há razões de outra ordem que intervem na construção de seu modelo de explicação, dentre as quais duas são particularmente importantes. A primeira e mais fundamental é a recusa teórica – e, de certo modo, até mesmo metafísica – de qualquer influência externa, não mecânica, ao “sistema da Terra”; ou seja, a recusa da idéia, amplamente aceita na época de Galileu, de uma influência da Lua sobre as marés. Metafísica, por um lado, porque, para Galileu, assim como para Bacon, a tese da influência lunar é eminentemente astrológica, sendo afastada juntamente com todas as categorias qualitativas da filosofia natural renascentista por representar uma explicação que se assenta em uma causa oculta. Teórica, por outro lado, porque a recusa da tese da influência lunar conduz Galileu a um tratamento estritamente mecanicista das marés. Como bem o expressa Popper, Galileu “trabalhava com um princípio de conservação do movimento para os movimentos rotacionais e isso parecia excluir as influências interplanetárias. Sem a tentativa de Galileu de explicar as marés nessa base bastante estrita, jamais poderíamos ter constatado que a base era muito estrita” (Popper, 1974, p. 173-4). Ora, é justamente a essa base estrita que se liga a segunda razão, que pode ser dita de economia interna, responsável pela unidade da representação teórica do modelo de Galileu, a saber, a idéia de que as marés, em qualquer um de seus três períodos, são sempre ocasionadas por uma mesma causa assimilável a um mecanismo subjacente de composição dos movimentos anual

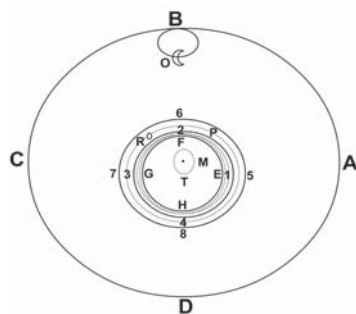
e diurno da Terra. É, portanto, nesse sentido que o valor e a racionalidade da teoria galileiana das marés transcendem o exclusivo confronto com as observações.

Diferentemente de Bacon, cuja teoria não atribui qualquer papel à Lua na produção das marés, e de Galileu, que atribui à Lua um papel bastante secundário na explicação do período mensal das marés, Descartes concede, em sua explicação, um papel central à Lua; de fato, as marés são, para ele, devidas exclusivamente à ação da Lua. A explicação cartesiana é originalmente desenvolvida no Capítulo XII de *Le monde ou traité de la lumière* (*O mundo ou tratado da luz*), cuja publicação foi abandonada por Descartes ao tomar conhecimento da condenação de Galileu em 1633. Entretanto, essencialmente a mesma explicação reaparece em *Les principes de la philosophie* (*Os princípios da filosofia*), Parte IV, seções 49 a 56, publicados originalmente em latim em 1644.

A teoria das marés de Descartes está em estrita dependência de sua concepção da matéria e do movimento. Quanto à matéria, ela é concebida “como uma substância extensa em comprimento, largura e profundidade”, isto é, “sua natureza consiste apenas em que ela é uma substância que tem extensão” (Descartes, 1996, IX, Parte 2, seção 4, p. 65). A principal consequência dessa concepção de matéria para a teoria das marés é a negação do vazio e a adesão de Descartes, contra os atomistas, a uma concepção plenista do universo. Quanto ao movimento, é suficiente lembrar, tendo em vista nosso propósito, que ele é concebido como existindo apenas por contato, sendo suas causas reduzidas às leis do choque entre corpos materiais.

Com base nesse quadro categorial, no qual são centrais os conceitos de matéria e movimento, Descartes procede à construção de “seu Mundo”, que pode ser resumidamente apresentado como segue. O Sol ocupa o centro do sistema do mundo, no qual cada astro está encerrado em seu céu particular. Como o vazio não existe, cada um desses céus particulares está completamente preenchido por matéria que liga mecanicamente, isto é, por movimentos causados unicamente por contato, os astros entre si. A Terra está, então, encerrada em seu céu e a Lua, em sua órbita, gira em torno da Terra, também sem sair desse céu. Entretanto, não é propriamente a Terra ou a Lua que se move, mas a matéria do céu que carrega os astros com seu movimento circular – os turbilhões ou vórtices cartesianos.

Para facilitar a compreensão da explicação cartesiana das marés, utilizaremos a própria figura de Descartes, que representa a Terra encerrada em seu céu, acompanhada da Lua (cf. *id.*, *ibid.*, XI, Cap. 11, p. 74). Na figura, ABCD delimita o céu da Terra, isto é, o vórtice em torno da Terra EFGH. O vórtice contém também a Lua O e é ele que propela a Terra e a Lua em torno de seu centro M, ao mesmo tempo que as transporta em torno do Sol, que se



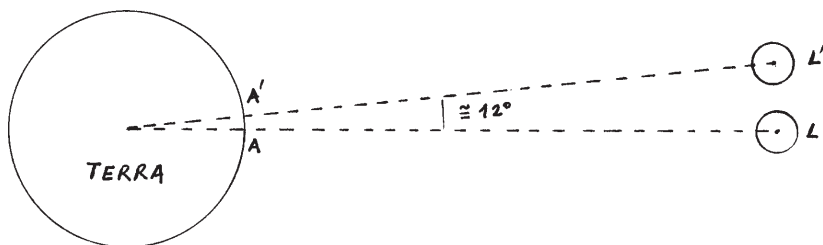
deve imaginar posto na direção de D. Os círculos 1.2.3.4 e 5.6.7.8 representam respectivamente a superfície do mar, que se supõe recobrir completamente a Terra, e o ar ou a atmosfera. Descartes insiste que a matéria do céu preenche não apenas todo o espaço que está entre os círculos ABCD e 5.6.7.8, mas ainda “todos os pequenos intervalos que estão abaixo entre as partes do ar, da água e da Terra” (Descartes, 1996, XI, Cap. 11, p. 74-5), de modo que toda a região ABCD constitui um *plenum* de matéria, onde não existem nem os grandes vazios entre os corpos celestes, nem os pequenos vazios intracorporais.

Isto posto, Descartes explica as marés pela variação periódica da pressão que a matéria do céu, em virtude do movimento da Lua em torno da Terra, exerce sobre as partes da Terra. Assim, a Lua, quando está em B, como na figura, comprime a matéria do céu que, por sua vez, pressiona a água em 2, ao mesmo tempo que desloca a Terra em direção a D, fazendo que o centro da Terra T se afaste do centro do vórtice M, de modo que ao fim de pouco mais de 28 dias, que é o período de revolução da Lua em torno da Terra, o centro desta última realiza o pequeno epiciclo T em torno do centro do vórtice M. Além disso, em virtude desse deslocamento, também a água em 4, pressionada por H contra a matéria celeste em D, resulta achatada. Portanto, achatada em 2 e 4, a água forma as protuberâncias 1 e 3. O modelo de Descartes explica, assim, por que existem, ao mesmo tempo, duas marés baixas em pontos diametralmente opostos e duas marés altas nas mesmas condições. Cabe notar, entretanto, que contrariamente aos testemunhos observacionais, a explicação cartesiana tem a conseqüência de que a maré baixa ocorre na passagem da Lua pelo meridiano do lugar e a maré alta, quando a Lua está no horizonte. Ainda assim, basta fazer intervir a rotação da Terra sobre seu próprio eixo, para chegar à explicação do período diário das marés: “considerando depois que a Terra gira, entretanto, em torno de seu centro (...) aquela parte de seu lado F que está agora em frente da Lua (...) deve encontrar-se em 6 horas em frente do céu marcado por C, onde essa água será mais alta, e em 12 horas em frente do lugar do céu (D), onde a água será mais baixa” (*id., ibid.*, Cap. 12, p. 81-2).

Quanto ao período mensal das marés, Descartes explica primeiro o retardamento na sucessão das marés, que ele considera ser de 12 minutos a cada seis horas, pelo movimento da Lua em torno da Terra: “e assim ela (a Lua) faz avançar pouco a pouco para oriente os pontos 1, 2, 3 e 4 que marcam as marés mais altas e mais baixas, de modo que essas marés não mudam precisamente de seis em seis horas, mas elas se retardam aproximadamente a quinta parte de uma hora a cada vez” (*id., ibid.*, p. 82). Para entender o retardamento diário das marés é preciso, então, levar em conta o deslocamento angular da Lua a cada 24 horas e o tempo necessário para que um ponto A sobre a superfície da Terra tenha de novo a Lua sobre seu meridiano.

Na figura, a distância angular percorrida pela Lua enquanto o ponto A realiza a revolução de 24 horas é de aproximadamente 12° (360° em pouco mais de 28 dias). Para que A tenha novamente a Lua em seu meridiano deve percorrer ain-

da a distância AA' , fazendo-o em aproximadamente 50 minutos. Como Descartes considera que o retardamento é de 12 minutos entre cada maré e como existem quatro marés diárias (duas altas e duas baixas), o retardamento diário vem a ser de aproximadamente 48 minutos. A explicação cartesiana do retardamento é, assim, essencialmente correta.



Quanto à variação mensal na amplitude das marés, Descartes justifica-a pela forma oval do céu da Terra, que se estende mais em direção de A e C que em direção de B e D. Assim, quando a Lua está em B e D, sua velocidade é maior que em C e A e, conseqüentemente, as marés são proporcionalmente maiores. A forma ovalada do céu da Terra é, assim, “a causa de que os fluxos e refluxos do mar sejam bastante maiores, quando ela (a Lua) está em B, onde ela é cheia, e em D, onde ela é nova, que quando ela está em A e em C, onde ela é meio-cheia (quadraturas)” (Descartes, 1996, XI, Cap. 12, p. 83).

Cabe, ainda, lembrar que Descartes não faz, no *Le Monde*, qualquer menção ao período anual das marés que, entretanto, é sumariamente explicado nos *Principes*, como segue: “É necessário também notar que a Lua está sempre bastante próxima do plano da eclíptica, enquanto a Terra gira sobre seu centro segundo o plano do equador, que lhe é bastante afastado, e que esses dois planos se interceptam nos lugares em que se fazem os equinócios, mas que eles são muito afastados um do outro naqueles (lugares) dos solstícios. Donde se segue que é no começo da primavera e do outono, ou seja, *no tempo dos equinócios*, que a Lua age mais diretamente contra a Terra e, assim, torna as marés maiores” (*id.*, *ibid.*, IX, Parte IV, Seção 52, p. 229). Uma vez mais, Descartes recorre exclusivamente à ação da Lua sobre a Terra para explicar o período anual das marés. Tal como para os outros períodos, não há qualquer menção ao Sol.

Completada a explicação geral das marés com base no modelo simplificado que supõe a Terra inteiramente recoberta pelo elemento da água, Descartes introduz a consideração das condições locais que ele considera importantes para explicar “as outras particularidades do fluxo e refluxo”. Contudo, enquanto as condições locais são sumariamente introduzidas no *Le monde*, que se limita a afirmar laconicamente que as outras particularidades do fluxo e do refluxo “dependem em parte da diferente situação das costas do mar e, em parte, dos ventos que

reinam nos tempos e nos lugares em que são observados” (Descartes, 1996, XI, Cap. 12, p. 83), seu tratamento é expandido nos *Principes*, onde descreve com maior detalhe o mecanismo que produz as “diferenças particulares dos fluxos e refluxos”. Descartes inicia, então, sua descrição, chamando a atenção para o fato de que, nas sizílgias (plenilúnio e novilúnio), as águas, que se encontram no meio do oceano e, portanto, nos lugares mais afastados das bordas, são mais infladas às seis horas da tarde e da manhã e, ao mesmo tempo, as águas das bordas são menos infladas ao meio-dia ou à meia-noite. Isso faz que, por um lado, as águas que estão no meio escorram para as bordas (fluxo) e, por outro lado, as águas das bordas escorram para o meio (refluxo). Partindo, então, dessa consequência geral de sua teoria que, como já dissemos, implica que a maré alta ocorre quando a Lua está no horizonte e a maré baixa, quando a Lua passa pelo meridiano do lugar, Descartes passa a considerar o efeito das condições locais, pois “segundo essas costas sejam mais próximas ou mais afastadas, e que essas águas passem por caminhos mais ou menos retos e largos e profundos, elas chegam mais cedo ou mais tarde e em maior ou menor quantidade; e também, que os diferentes desvios desses caminhos, *causados pela interposição de ilhas, pelas diferentes profundidades do mar, pelo desagramento de rios e pela irregularidade das bordas ou costas*, fazem freqüentemente que as águas que vão para uma borda sejam encontradas por aquelas que vêm de uma outra, o que *adianta ou retarda* seus cursos de várias maneiras diferentes; e, enfim, que ela pode também ser *adiantada ou retardada* pelos ventos, algum dos quais sopram sempre regradamente em certos lugares, *em certos tempos*” (*id.*, *ibid.*, IX, Parte IV, Seção 56, p. 231; os grifos são originais). É fácil reencontrar, nessa descrição de Descartes, as causas secundárias concomitantes de Galileu, devidas à propagação da onda primária, e mesmo as causas terciárias, devidas ao regime dos ventos.

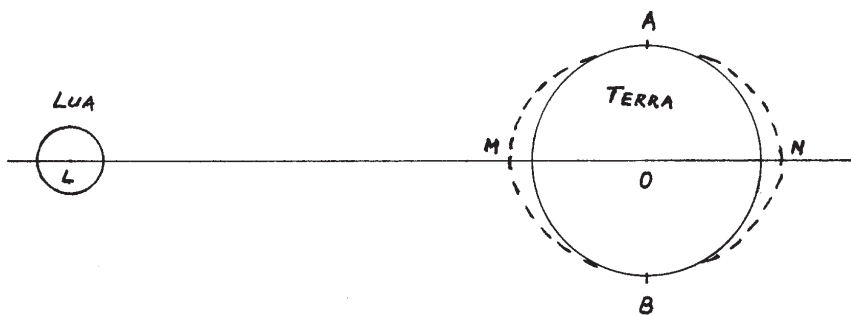
Esse engenhoso modelo, que é talvez o exemplo mais flagrante de explicação estritamente mecanicista, será tão influente a ponto de tornar-se dominante durante a segunda metade do século XVII. Ele continuará, por exemplo, a ser ensinado nas universidades inglesas por muitos anos após a publicação dos *Principia* de Newton que, como veremos, chega à caracterização considerada correta da causa primária das marés.

As marés e o achatamento polar da Terra são duas consequências confirmatórias espetaculares da teoria da gravitação universal proposta por Isaac Newton no *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (*Princípios matemáticos de filosofia natural*), publicado em 1687. Em particular, a explicação das marés teve uma tal importância na época que Edmond Halley (1656-1742) a escolheu como tema principal de sua apresentação dos *Principia* ao rei da Inglaterra no *Discurso ao Rei sobre as marés* no mesmo ano de 1687.

Newton desenvolve a teoria das marés principalmente em três proposições do Livro III do *Principia*, a saber, as proposições 24, 36 e 37, as quais são, de certo modo, consequências dos corolários 19 e 20 da Proposição 66 do Livro I

(cf. Cohen, 1999, p. 238-46). Muito resumidamente, pode-se dizer que o Livro III, que tem por título *O sistema do mundo*, procura mostrar, apoiando-se em observações astronômicas, que o movimento dos corpos celestes é regido pela lei de gravitação universal, ou seja, que todos os corpos se atraem com uma força proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa. O estudo do movimento dos planetas e de seus satélites e, particularmente, da Lua, permite então estabelecer a identidade entre a força centrípeta e a gravidade: nesse sentido, pode-se dizer que a Lua, a cada instante, cai em direção ao centro da Terra pela mesma causa que faz que uma pedra, deixada em liberdade, caia, embora, no caso da Lua, por ser ela igualmente animada de um movimento dirigido segundo a tangente, seu movimento de queda compõe-se com esse movimento pela tangente, resultando, como no caso dos projéteis, em um movimento curvilíneo. Esse resultado, generalizado ao conjunto dos fenômenos astronômicos (movimento dos planetas e dos cometas) e terrestres (forma da Terra, fluxo e refluxo do mar), conduz a uma reorganização e unificação completas dos conhecimentos sobre os mundos celeste e terrestre.

Esquemáticamente, as marés são uma consequência da gravitação universal e do princípio de ação e reação. Supondo-se que a Terra esteja inteiramente recoberta pela água, a forma, que a superfície dessa água terá no equilíbrio sob o efeito da atração gravitacional de um astro perturbador, será a de um esferóide de revolução, cujo eixo passa pelo centro O da Terra e pelo centro L do astro perturbador, no caso, a Lua. Como mostra a figura, a superfície da água, sob a ação da massa da Lua, incha-se nos dois pontos diametralmente opostos, M e N, da reta



que une os centros da Lua e da Terra e esse inchaço, ou seja, as duas cristas de onda da maré, será depois transportado pela superfície terrestre por efeito do movimento diurno da Terra, produzindo o fluxo e refluxo do mar.

Para entender como acontece esse duplo inchaço da superfície da água é preciso, primeiro, considerar que todos os pontos da Terra estão sujeitos simultaneamente à força da gravitação terrestre e lunar, porque, pelo terceiro princípio da dinâmica newtoniana, a cada ação contrapõe-se uma reação igual e contrária: por isso, assim como a Lua atrai a Terra, esta atrai a Lua. Em segundo lugar, a

ação constante de uma força, como é o caso da força gravitacional que age constantemente, traduz-se na produção de uma aceleração. Tomemos agora, na figura, os pontos M, N e O da Terra sobre a linha reta que une os centros da Terra e da Lua e sejam eles tais que M esteja voltado para a Lua, N seja diametralmente oposto e O seja, como já foi dito, o centro da Terra. Chamando g a aceleração devida à atração terrestre, ela será em M de $+g$, em O, de zero, em N, de $-g$. Entretanto, sobre esses três pontos age ainda a Lua, provocando, por reação da Terra, uma aceleração que será $-\psi$ para o centro O, $-(\psi + \Delta\psi)$ para o ponto M e $-(\psi - \Delta\psi)$ para N, onde $\Delta\psi$ é a variação da atração lunar ψ , que se exerce no centro da Terra; evidentemente, a aceleração é maior em M, porque ele está mais próximo da Lua que o centro O, e menor em N, porque ele está mais afastado da Lua que o centro O da Terra. Mas a aceleração lunar $+\psi$ age sobre todos os pontos da Terra rígida e age, portanto, igualmente em M, N e O. Assim, cada um desses três pontos está submetido à resultante das três acelerações:

$$\text{M às acelerações } -(\psi + \Delta\psi) + g + \psi = +(g - \Delta\psi),$$

$$\text{N às acelerações } -(\psi - \Delta\psi) - g + \psi = -(g - \Delta\psi),$$

$$\text{O às acelerações } -\psi + \text{zero} + \psi = \text{zero}.$$

Esse resultado permite concluir que, nos pontos M e N, existem duas acelerações $+(g - \Delta\psi)$ e $-(g - \Delta\psi)$ iguais e de sinais opostos, que concorrem ambas em diminuir de $\Delta\psi$ a gravidade específica g da Terra e, por isso, aptas a produzir nesses pontos os inchaços. Assim, não apenas a água que está do lado da Lua forma uma bossa, mas também a água que está do lado diametralmente oposto. Portanto, de modo geral, a causa principal das marés é a diferença da atração exercida por um corpo externo perturbador, Lua ou Sol, de um lado, sobre o centro da Terra e, de outro lado, sobre um ponto qualquer da superfície da água: se esse ponto está mais próximo do astro perturbador do que o centro, ele é mais atraído do que o centro; se ele está mais afastado, ele é menos atraído do que o centro mas, em ambos os casos, isso produz uma elevação da superfície da água.

É importante ter claro que as marés não são devidas à força de atração mas à *variação* dessa força sobre os diversos pontos da superfície terrestre, pois essa variação da atração permite não apenas explicar, como acabamos de ver, porque existem via de regra duas marés por dia (período diário), mas também porque o efeito do Sol é mais fraco que o da Lua, ainda que o primeiro exerça evidentemente uma atração mais forte sobre a Terra. Com efeito, a massa do Sol é cerca de 27.158.000 vezes maior que a da Lua e a distância do Sol à Terra é cerca de 390 vezes maior que a distância da Lua à Terra. Como, pelo princípio da atração universal, a atração gravitacional se exerce na razão direta da massa e na razão inversa do quadrado da distância, teremos

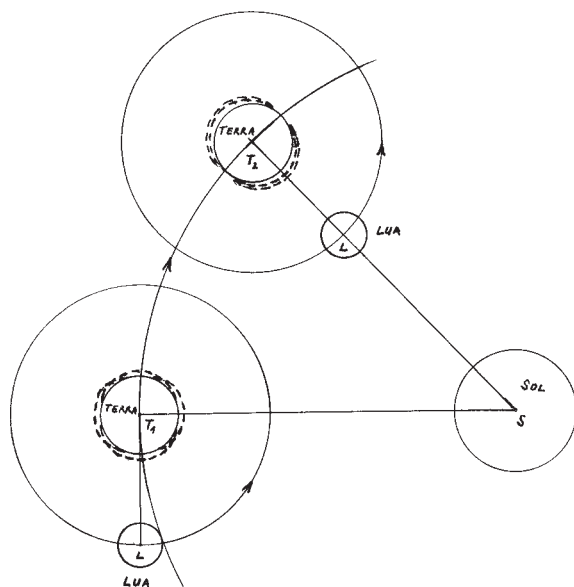
$$\frac{27.158.000}{390^2} = \frac{27.158.000}{152.100} = 178;$$

portanto, a atração gravitacional do Sol sobre a Terra é cerca de 178 vezes maior que a da Lua. Entretanto, como a força das marés corresponde à *diferença* dos valores assumidos pela força de atração gravitacional entre um ponto da superfície terrestre e o centro da Terra, a variação da ação gravitacional se exerce na razão direta da massa e na razão inversa do cubo da distância. De um ponto de vista matemático, enquanto a força gravitacional varia na razão $1/R^2$, sua diferença, obtida tomando-se sua derivada, varia na razão $1/R^3$. Teremos, então:

$$\frac{27.158.000}{390^3} = \frac{27.158.000}{59.319.000} = 0,45;$$

ou seja, a diferença da ação gravitacional do Sol sobre a Terra é 0,45 vezes a da Lua, ou ainda, a ação da Lua sobre as marés é cerca de 2,2 vezes maior que a do Sol.

Determinada a participação de cada uma das luminárias na produção das marés pode-se, por um lado, reiterar a explicação cartesiana do atraso diário das marés pela combinação do movimento da Lua em torno da Terra e da rotação terrestre e, por outro lado, explicar o período mensal com base nas posições relativas do Sol e da Lua. Assim, no primeiro caso, como a Lua gira em torno da Terra enquanto esta faz uma rotação sobre si mesma, é preciso mais do que 24 horas – cerca de 50 minutos a mais –, para que a Lua se encontre novamente na vertical do mesmo meridiano. Ou seja, se a maré for alta ao meio-dia de um certo dia, ela será alta um pouco antes das 13 horas do dia seguinte (cf. p. 859, para a explicação cartesiana). Quanto ao período mensal, podemos representá-lo esquematicamente com o auxílio de uma figura, na qual estão representadas duas posições relativas do Sol e da Lua. Quando a Terra está em T_1 , o Sol e a Lua estão em quadratura e, no caso representado pela figura, a Lua está em quarto minguante. Quando a Terra está em T_2 , o Sol e a Lua estão em conjunção e a Lua é nova. No primeiro caso, a ação gravitacional do Sol e a da Lua sobre as águas opõem-se, resultando uma maré de intensidade mínima. No segundo caso, a ação gra-



vitacional do Sol e a da Lua concorrem, resultando uma maré de intensidade máxima. Como diz Newton: “os dois movimentos, que as duas luminárias excitam, não serão discernidos separadamente mas causarão o que se poderia chamar um movimento composto. Na conjunção ou na oposição das luminárias, seus efeitos serão combinados e o resultado será o fluxo e refluxo máximo. Nas quadraturas, o Sol levantará a água enquanto a Lua a abaixa e abaixará a água enquanto a Lua a levanta; e a mais baixa de todas as marés originar-se-á da diferença entre esses dois efeitos” (Newton, 1999, III, Prop. 24, p. 835). Cabe, entretanto, notar que, em virtude do plano de rotação da Lua em torno da Terra não coincidir com o plano de rotação da Terra em torno do Sol, ou seja, da órbita lunar ter uma inclinação de $5^{\circ} 8'$ com relação ao plano da eclíptica, nem sempre a Lua cheia e a Lua nova coincidem com um alinhamento perfeito da Lua, da Terra e do Sol, de modo que, na maioria das vezes, a Lua atrai ligeiramente mais para seu lado do que o Sol e os efeitos das duas luminárias não podem ser exatamente acrescentados.

Quanto ao período anual, devido a sua complexidade, limitar-nos-emos aqui a indicar os dois principais fatores dos quais ele depende. Primeiro, como os efeitos das duas luminárias, o Sol e a Lua, dependem de suas distâncias da Terra, as marés altas e baixas dependem do perigeu e apogeu da Lua e do periélio e afélio da Terra. As marés máximas anuais dependem, então, da coincidência entre o perigeu da Lua e o periélio da Terra e, por outro lado, as marés mínimas anuais dependem da coincidência entre o apogeu da Lua e o afélio da Terra. Segundo, a declinação desses astros, ou seja, a distância angular entre eles e o plano do equador, altera significativamente a ação de suas forças gravitacionais sobre as águas. Assim, quando esses astros se afastam do equador em direção ao pólo, aumentando sua distância angular, seus efeitos devem diminuir pouco a pouco. Em particular, isso explica as diferenças entre as marés equinociais e solsticiais, porque, nos equinócios (de primavera e de outono), o Sol se encontra no ponto em que o plano da eclíptica intercepta o plano do equador e, desse modo, sua ação gravitacional sobre as águas resulta máxima; mas, nos solstícios (de verão e de inverno), o Sol se encontra em seu maior afastamento angular do equador e, desse modo, sua ação gravitacional sobre as águas resulta mínima. Como, entretanto, o período anual depende da combinação dos dois fatores expostos, o ciclo das marés é razoavelmente complexo e completa-se no intervalo de vários anos.

Finalmente, também Newton leva em consideração os fatores locais, que afetam, por assim dizer, a harmonia teórica da explicação. O primeiro desses fatores que complicam consideravelmente o fluxo e refluxo do mar é a “força de reciprocidade das águas”. Trata-se do ímpeto conservado pela massa líquida, quando cessam os efeitos do Sol e da Lua. A conservação do movimento, devido à inércia das águas, faz que estas continuem seu movimento de vai-e-vem, perturbando então o desenvolvimento das marés, pois o movimento engendrado, por exemplo, por uma passagem da Lua pelo meridiano interferirá sobre a maré seguinte. Outro fator importante diz respeito à situação geográfica das costas, pois os fundos

baixos criam atritos que retardam o avanço das águas, alongando, em geral, o período “normal” de seis horas. Enfim, a “onda primária” da maré pode propagar-se seguindo caminhos diferentes. Assim, uma mesma onda pode dividir-se e chegar ao mesmo porto, ou ao mesmo lugar ao largo, por diferentes vias que se encontram. Ao se encontrarem, essas ondas se adicionam ou se subtraem, aumentando e acelerando ou diminuindo e retardando o efeito da “onda primária”. Esse fenômeno se encontra, por exemplo, na Mancha, onde a onda primária, ao fazer a volta das Ilhas Britânicas, retorna à Mancha, passando pelo Pas de Calais, interferindo com a onda vinda diretamente do Atlântico. Newton discute detalhadamente, na Proposição 24 do Livro III do *Principia*, as marés do porto de Batsha, na antiga Indochina e atual Vietnã. Batsha está situada na parte noroeste do Golfo de Tonkin, na embocadura do Domea, que é o braço principal do rio Tonkin. A particularidade das marés de Batsha consiste precisamente na existência de uma maré alta e baixa a cada 24 horas ao invés de duas como previsto pela teoria. Em sua explicação, Newton faz intervir pela primeira vez o que depois se chamou de princípio de interferência (cf. Cohen, 1999, p. 240). Em suma, a explicação consiste em mostrar que “uma maré é propagada a partir do oceano através de diferentes canais até o mesmo porto e passa mais rapidamente por alguns canais do que por outros; neste caso, a mesma onda, dividida em duas ou mais ondas que chegam sucessivamente, pode compor novos movimentos de tipos diferentes” (Newton, 1999, p. 838).

Esta exposição das principais teorias das marés do século XVII permite algumas considerações finais. Em primeiro lugar, pode-se apreciar a enorme distância conceitual entre a explicação newtoniana das marés baseada na atração gravitacional e as explicações qualitativas baseadas em alguma modalidade de predomínio ou influência da Lua sobre as águas, explicações estas duramente criticadas, não sem razão, por Galileu. Com efeito, o que Newton propõe como causa das marés é uma propriedade universal da matéria e não uma causa particular que procura estabelecer algum tipo de vínculo essencial entre a Lua e o elemento da água. Além disso, o caráter matemático da teoria newtoniana e a assimilação das marés a um mecanismo, cujo funcionamento pode ser plenamente caracterizado em termos mecânicos, são indícios claros de que a explicação de Newton, longe de retomar as formas qualitativas das explicações da filosofia natural renascentista, representa a realização da mecanização da imagem do mundo preconizada pelas explicações de Galileu e Descartes, apesar das diferenças existentes nas teses mecanicistas desses três autores.

Em segundo lugar, não se pode deixar de notar que Descartes e Newton supõem tacitamente o movimento de rotação da Terra na explicação do atraso diário de aproximadamente 50 minutos nas marés. Evidentemente, essa suposição não tem o mesmo caráter que a de Galileu: para este, trata-se de mostrar que as marés são uma prova do movimento da Terra, por meio de uma argumentação que vai do efeito para a causa; para aqueles, o movimento de rotação da Terra é ape-

nas uma causa secundária, assumida hipoteticamente para explicar um efeito particular das marés. Ainda assim, é significativo que aquilo que, na época de Galileu, exigia-se que fosse provado – a saber, o movimento da Terra – pudesse, pouco tempo depois e apesar da condenação da Igreja, constituir-se numa hipótese tácita e consensual do patrimônio científico adquirido do século XVII.

Finalmente, é preciso levar em consideração os limites da explicação newtoniana das marés, principalmente porque essa consideração permite trazer à tona o valor da contribuição de Galileu. Cohen, em sua apresentação do *Principia*, formula clara e diretamente o limite da análise newtoniana, dizendo que “Newton fracassou em entender que a análise das forças gravitacionais da maré é apenas uma parte do problema, correspondendo a outra parte a um entendimento da natureza das respostas a essas forças da maré e dos efeitos da rotação da Terra” (Cohen, 1999, p. 240). Em outros termos, a limitação da explicação gravitacional das marés consiste basicamente em que Newton propõe uma teoria “estática” das marés que leva em consideração somente o aspecto de equilíbrio das forças gravitacionais envolvidas, negligenciando o aspecto “dinâmico”, representado basicamente pela “inércia e (pelos) ‘atritos’, que têm, entretanto, forçosamente um papel primordial nas velocidades colocadas em jogo pela rotação da Terra” (Maury, 1999, p. 609). Em suma, as marés oceânicas são um fenômeno complexo produzido pelo embricamento de dois conjuntos de fatores causais: de uma lado, as forças gravitacionais do Sol e da Lua geradoras de um efeito primário de maré; de outro lado, as respostas específicas das águas oceânicas sob as condições delimitadas pelo movimento de rotação da Terra e pela situação geográfica local. Burstyn insiste nesse embricamento causal, para ressaltar o aspecto positivo da contribuição de Galileu: “Nossa explicação corrente vê as marés como um fenômeno ondulatório primariamente local, a resposta das bacias oceânicas de tamanhos, formas e profundidades variáveis às forças geradoras das marés da Lua e do Sol. A maré, em qualquer bacia oceânica dada, é peculiar àquela bacia e é a resultante das oscilações de período-fixo devidas às forças geradoras das marés e às oscilações de período-livre devidas à configuração da própria bacia. Em outras palavras, embora o oceano seja posto em movimento pelas forças geradoras das marés que variam periodicamente, uma vez posto em movimento, ele tende a oscilar por sua própria inércia com um período que pode diferir daquele das forças geradoras das marés. Mas esta é substancialmente a concepção de Galileu do fenômeno das marés, embora seu fracasso em entender a atração gravitacional tenha conduzido a idéias incorretas sobre as forças de geração das marés e seus períodos” (Burstyn, 1962, p. 164). A situação pode, então, ser resumida como segue: Galileu erra na determinação da “causa primária e potíssima” das marés, enquanto Newton a estabelece corretamente; Newton erra, ao negligenciar os efeitos do movimento de rotação da Terra, enquanto Galileu os intuiu corretamente no conjunto de “causas secundárias” das marés. Em certo sentido, portanto, Galileu tem razão: as marés podem ser tomadas como uma prova do movimento da Terra,

pois só se pode dar uma explicação completa das marés, fazendo intervir a rotação terrestre.

Estas três considerações finais são suficientes para estabelecer o valor da Quarta Jornada no conjunto do *Diálogo*, porque, para além dos erros e acertos que lhe são peculiares, ela representa a parte mais ousada do pensamento científico de Galileu, fazendo intervir até os limites de suas possibilidades a conceituação mecânica do movimento e a concepção cosmológica copernicana do florentino. Reveladora das deficiências do quadro conceitual estrito no qual está inscrita, a teoria das marés é o exemplo máximo da obstinação de Galileu na defesa do copernicanismo diante do desafio instrumentalista subjacente à condenação de 1616.