

LA TEORÍA DE LAS MAREAS DE GALILEO. EL DIÁLOGO REVISITADO

Pierre Souffrin
Observatorio de la Côte d'Azur

I.- LA TEORÍA GALILEANA DE LAS MAREAS Y LA HISTORIA

En agosto de 1631, Galileo escribe con cierta satisfacción a Diodati, por entonces en París:

“Tras muchas dificultades, he conseguido editar mis Diálogos, aunque dada la materia que trato y la forma en que la conduzco, merecería que se me rogara publicarla por los mismos que han puesto dificultades [...] Es cierto que no he conseguido nombrar el flujo y el reflujo del mar, aunque este sea el tema principal que trato en la obra [...] Creo que si fuese titulado el libro del flujo y del reflujo habría sido más útil...”

Esta carta, entre otras declaraciones del mismo tenor, señala que la teoría de las mareas es el argumento esencial del *Diálogo*, según su propio autor. Puesto que ese lugar central ha sido olvidado, o más bien, ocultado por los autores modernos, conviene exponer alguna justificación histórica.

En primer lugar, está claro que el desafío histórico es aquí de una importancia excepcional. Este desafío no es en primer lugar, *retrospectivamente*, la producción de una teoría de las mareas; el desafío principal, desde la perspectiva epis-



temológica moderna, es la búsqueda de una prueba física irrefutable de la realidad del doble movimiento -diario y anual- de la Tierra exigida por el sistema de Copérnico (para abreviar el argumento obviaré el papel histórico del problema del tercer movimiento de la Tierra en este sistema). Se trata, con estos movimientos de la Tierra, del verdadero talón de Aquiles de la física y del cosmos aristotélicos: en el siglo XVI sus partidarios conseguían integrar las novedades sin sentirse realmente perturbados, tales como la corruptibilidad de los cielos —manchas solares, la nova de 1604, incluso las fases de Venus—, pero si el heliocentrismo llegara a ser demostrado por una prueba física irrefutable arruinaría el edificio entero sin posibilidad de recuperación. Hay testimonios de que Galileo mismo consideró muy pronto el fenómeno de las mareas como un argumento decisivo, la única prueba de la realidad objetiva de los dos movimientos terrestres y que mantuvo esa posición hasta sus últimos años.¹ No quiero sugerir que la adhesión de Galileo al sistema copernicano haya podido depender de tal prueba física: en primer lugar, se basaba evidentemente en su rechazo de la filosofía natural aristotélica y escolástica, y en segundo lugar, como la de Copérnico mismo y los copernicanos de la época, en la coherencia de un conjunto de argumentos cuya fuerza persuasiva tanto como su carácter no rigurosamente probatorio habían sido reconocidos desde el siglo XIV.

Para apreciar la fuerza que podía tener en una polémica un argumento construido sobre una teoría de las mareas, es conveniente saber que el fenómeno de las mareas era visto por los aristotélicos renacentistas como el único fenómeno cosmológico al que el Filósofo no había logrado dar ni la sombra de una explicación. En la encrucijada de los siglos XVI y XVII la explicación teórica de las mareas representaba un desafío tal para la filosofía natural que el filósofo que lo consiguiera podría estar seguro de adquirir inmediatamente una notoriedad y autoridad considerables, y esa puede haber sido la motivación inicial del interés de Galileo por este fenómeno. Hacer de la búsqueda de una prueba del doble movimiento de la Tierra el origen de las investigaciones galileanas sobre las mareas, para darle mayor conformidad con nuestra jerarquía de problemas epistemológicos, implicaría, bien mirado, una intuición previa de que el fenómeno de las mareas podría constituir tal prueba; no alcanzamos a ver cómo tal intuición podría haber precedido a toda idea de solución teórica del problema de las mareas.

La solución propuesta por Galileo se basa en la analogía que establece entre el fenómeno comúnmente observado de las oscilaciones del agua contenida en un recipiente sometido a fases de aceleración y deceleración y las osci-

¹ El Discurso del flujo y reflujo del mar, EN V, 378 ff data de 1616, recogido ampliamente en 1632 en el *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo*, EN VII, 27-526. En lo que sigue se designará por Diálogo (1998) la gran edición crítica: *Galileo Galilei, Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolomaico e Copernicano*, Edizione critica e commento a cura dei O. Besomi e M. Helbing, vol. I Testo, vol. II Commento (Padova, Antenore, 1998).



laciones de los mares sobre la superficie del globo terrestre; al presentar como indisociables el fenómeno evidente de las mareas y el doble movimiento de la Tierra alrededor del Sol, esta solución invertía la jerarquía de los desafíos. La posibilidad de zanjar, sólo por la existencia de un fenómeno evidente, la vieja cuestión del movimiento de la Tierra o de los cielos, se exponía por vez primera sobre bases nuevas, desde las argumentaciones del siglo XIV que habían dejado a los partidarios de ambas tesis igualmente satisfechos con su aparente indecidibilidad en el marco de la filosofía natural. La necesidad del doble movimiento de la Tierra dentro de la explicación galileana de las mareas transformaba radicalmente el problema de la comparación de los grandes sistemas del mundo y le confería un estatuto revolucionario. Este tema es un lugar común de la historia del pensamiento científico; lo que normalmente no se percibe es que esta revolución, para el propio Galileo, se halla más radicalmente anclada en su teoría de las mareas que en cualquier otra argumentación, fases de Venus y satélites de Júpiter incluidos. Esta teoría de las mareas preocupó a sus adversarios y especialmente a la curia papal, probablemente ya desde el primer proceso de 1616, y ciertamente en el de 1633, puesto que entre las ocho presunciones de culpabilidad sostenidas contra Galileo el único argumento de filosofía natural mencionado es la prueba del copernicanismo mediante la teoría de las mareas. En fin, fue esa teoría de las mareas, retomada prácticamente sin cambios del discurso de 1616, la que coronó la gran obra final de su vida, el *Diálogo sobre los dos grandes sistemas del mundo*. Si recordamos que pretendía titular el *Diálogo* como *Sobre el flujo y el reflujo del mar*, siendo disuadido por la prudencia de sus amigos y por las presiones de sus poderosos adversarios, se reconocerá que no solamente sostuvo esta teoría de manera constante sin enmendarla en nada, sino incluso que la consideraba una pieza maestra de su filosofía de la naturaleza.

EL JUICIO DE LA HISTORIA: UNA TEORÍA FALSA

La apreciación de los historiadores ante una teoría tan importante a ojos de Galileo es bastante paradójica. Domina un juicio casi unánime: es una teoría falsa. Por no citar más que a cualificados autores, E. J. Aiton afirma: “*Aunque fundamentalmente falsa, la teoría galileana de las mareas merece atención...*”; para M. Clavelin: “*Trátase de las mareas o de los vientos alisios, la argumentación de Galileo es profundamente defectuosa*”; y para P. Costabel: “*La única prueba formal que proponía del movimiento de la Tierra, a saber, el flujo y el reflujo del mar, no valía absolutamente nada*”. Bajo el peso de este desafortunado error, a menudo los historiadores han descuidado la cuarta jornada del *Diálogo*, pasando la teoría de las mareas y sus consecuencias cosmológicas al debe y el haber de la Historia.



Aunque se considere actualmente la teoría como falsa de forma unánime, hacemos notar que en la introducción a su edición del *Diálogo* (Einaudi 1970) Libero Sosio, que comparte sin duda esa opinión, modera no obstante la conclusión —que tomada al pie de la letra es igual de desoladora respecto a las intenciones de Galileo— precisando que es falsa “*al menos en tanto que teoría de las mareas*”. Esta restricción deja abierta al menos la posibilidad de que la teoría no sea falsa *sino* en tanto que teoría de las mareas. Aunque esta vía vislumbrada no haya sido explorada por Sosio es preciso reconocer que es uno de los escasos comentaristas que ha expuesto alguna reserva al hecho de que por doquier la teoría haya sido calificada como falsa; sin embargo, al no haberla desarrollado, permanece imprecisa y preñada de ambigüedades.

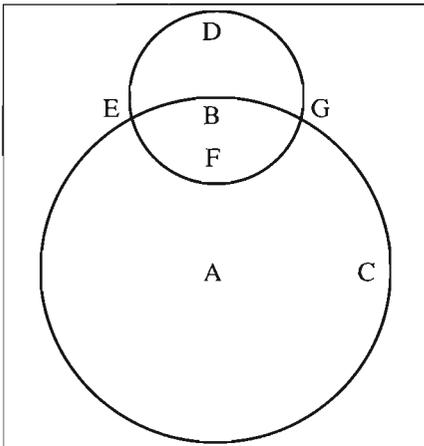
Con escasas reservas, la teoría galileana ha sido considerada como un lamentable error, comprensible en su contexto histórico, pero que merece ser olvidada, por bien de su autor. No deja de chocarnos el que este juicio negativo no haya sido casi nunca apoyado por alguna evidencia, incluso vaga, de su falsedad; el juicio de Finocchiaro, que aventura este atrevido comentario, es típico de la literatura actual sobre el tema: “*Esta explicación causal es errónea, aunque su argumento fundamental no es despreciable, y no está claro dónde yerra su razonamiento*”. Las únicas excepciones que conozco se deben a E. Mach, que mantiene un rechazo radical, y las de E. Strauss y K. Popper, que mantienen un rechazo, digamos, condicional. Volveremos después sobre sus propuestas.

Las escasas reservas expresadas en cuanto a calificar simplemente como falsa la teoría de las mareas, por raras que hayan sido, podrían bastar para sentir la necesidad de reexaminar críticamente tal calificación. Una de dos: o bien las dudas están mal basadas y entonces hay que ponerlo de relieve, o bien tienen algún fundamento sólido cuyas consecuencias habrá que explorar. Hay que reconocer que en esta última hipótesis podríamos extrañarnos de que quienes han tenido suficiente lucidez para exponer sus reservas se hayan quedado ahí.

En cuanto al punto de vista radical de Mach, sorprende el poco caso que le han hecho los historiadores; pues si es irrefutable, lo dice todo sobre la teoría de las mareas y hace vanas las tergiversaciones que acabamos de cuestionar. Ha sido poco citado e incomprendido al citarlo: quizá lo uno aclara lo otro. Es necesario un examen crítico de su posición, y luego mostraré que es refutable en tanto que crítica del modelo de Galileo. Antes de abordar ese empeño conviene describir con mayor precisión el contenido de la propuesta galileana.

LA TEORÍA GALILEANA DE LAS MAREAS: SENCILLA Y SOFISTICADA

Como he indicado más arriba, la teoría se basa en la referencia a los movimientos de un líquido en relación al recipiente que lo contiene cuando este se ve sometido a sucesivas aceleraciones y deceleraciones. Galileo afirma que en la doble



hipótesis de un doble movimiento de la Tierra –un movimiento de rotación uniforme en torno a su centro y un movimiento de traslación uniforme de ese centro a lo largo de una órbita circular alrededor del sol– las grandes masas de agua sobre la superficie se comportan en sus cuencas naturales como el agua en tal recipiente. En efecto, señala, la composición de dos movimientos uniformes de rotación –la diurna y la orbital anual– tiene como resultado que la cuenca de todo lago, mar u océano, tiene un movimiento absoluto no uniforme, al añadirse la rotación diurna al movimiento

orbital en mitad de la noche y suprimirse en mitad del día, mientras que el agua, fluida y libre horizontalmente, no se ve afectada por esa aceleración en cuanto que no está contenida por una orilla. Para facilitar la comprensión de ese resultado Galileo lo explica mediante esta figura, donde para simplificar hace coincidir el plano del ecuador con el de la eclíptica.

El círculo EFDG representa la Tierra, B su centro, y el círculo C con centro en A la órbita anual. Un punto fijo sobre la Tierra recorre el pequeño círculo en un día y el centro B recorre el círculo C en un año, teniendo ambas rotaciones el mismo sentido, desde D hacia E. Galileo muestra mediante la figura que *“cuando [la superficie terrestre] gira alrededor de su propio centro, resultará forzosamente para las partes de esa superficie, por el acoplamiento entre el movimiento diurno y el movimiento anual, un movimiento absoluto unas veces muy acelerado y otras igualmente retardado para las partes de esa superficie [...] Por tanto, si es verdadero (y la experiencia prueba que es muy cierto) que la aceleración y la ralentización del movimiento de un vaso hace ir y venir, y subir y luego descender hasta sus extremos, el agua que contiene, quién no concederá que tal efecto pueda, o más bien deba, ocurrir del mismo modo y necesariamente en el caso de los mares, cuyos recipientes están sometidos a variaciones semejantes?”*

Esta descripción preliminar no es sino una versión muy simplificada de la discusión desarrollada por Galileo, en las páginas que siguen, para dar cuenta de modo cada vez más realistas de las características geométricas y cinemáticas de los movimientos de la Tierra según Copérnico y de las consecuencias de la diversidad topográfica de las costas y fondos marinos sobre las aguas en movimiento. En conjunto, la argumentación de Galileo es finalmente muy sofisticada, compleja, implicando la inclinación de la eclíptica y el movimiento orbital de la luna alrededor de la Tierra respecto a la Cosmografía, los movimientos que llamamos oscilaciones propias de una masa fluida y su concepción del *impetus* respecto a la Física, por no citar sino algunos de los ingredientes que forman parte del arse-



nal explícitamente usado por Galileo en la comparación de su modelo teórico con las observaciones.

En la medida en que el juicio dispensado por la crítica a la teoría de las mareas se articula esencialmente sobre ese modelo simplificado, desarrollaré sobre él mi discusión de tal crítica. Sostengo, y es el fundamento de toda mi discusión, que la esencia de la teoría de Galileo la constituye la afirmación de la existencia de dos fenómenos. El primero es que los dos movimientos de la Tierra conjugados producen como efecto que un punto de la superficie se halla sometido *alternativamente a aceleraciones y desaceleraciones* horizontales absolutas (por ejemplo, paralelamente a la superficie); designaré ese efecto como *efecto Galileo*. El segundo es la tendencia que atribuye al agua de proseguir su movimiento horizontal libremente sin aceleración. Según Galileo, las mareas se deben, en lo que respecta a su *causa primera*, a la conjunción de esos dos fenómenos.

Aunque no carezca de interés atender a los numerosos comentarios que esquivan cualquier justificación de su recusación de la teoría de las mareas, no tomaré en cuenta aquí sino los argumentos de los autores ya citados que han hecho una crítica explícita.

I. LAS REFUTACIONES DE LA TEORÍA GALILEANA DE LAS MAREAS

1. Ernst Mach: el efecto Galileo no existe

En su exposición crítico-histórica de la Mecánica, Mach rechaza la existencia del efecto Galileo, lo que constituye una refutación radical de la teoría galileana de las mareas. Mach creyó que era legítimo pensar que la explicación de Galileo se refería a una composición de movimientos donde el movimiento *circular uniforme orbital* sería reemplazado por un movimiento *rectilíneo uniforme*. Ahora bien, si el movimiento orbital es reemplazado por un movimiento rectilíneo uniforme habrá una fuerza de inercia debida a la rotación diurna, pero no será variable en el tiempo en un lugar geográfico determinado, y por tanto no habrá marea. Esta ausencia del efecto marea cuando el segundo movimiento uniforme es rectilíneo surge justamente de la ausencia de efecto dinámico de un arrastre rectilíneo uniforme (principio de inercia) que Galileo ha expuesto en diversas ocasiones.

No veo qué autoriza a preferir esa interpretación a la lectura estricta del texto que sólo menciona movimientos *circulares uniformes*, salvo cuando en la introducción didáctica Galileo usa la imagen de una barca frenada que habría hecho agua, pero entonces lo esencial es que ese movimiento *rectilíneo* es *no uniforme*, decelerado. Todo en el texto y las figuras, así como el contexto astronómico, implica



claramente que *los dos movimientos* uniformes cuya existencia simultánea requiere Galileo son *rotaciones uniformes*.

La crítica de Mach es justa en la medida en que se aplica al modelo que somete a crítica, pero que no es el de Galileo, y su crítica no es pertinente en tanto que refutación de la teoría galileana de las mareas.

2. E. Strauss y K. Popper: el efecto Galileo existe, pero es muy pequeño

Las pocas páginas que Popper consagra a la teoría galileana en *Conocimiento objetivo* para ilustrar su concepto de *comprensión histórica objetiva* me parecen singularmente instructivas desde el punto de vista epistemológico. Leeré en ellas, empleando una fórmula de Koyré, una especie de *comedia de errores*.

Tras una paráfrasis muy fiel al modelo de Galileo, Popper concluye: “*La teoría de Galileo es plausible, pero incorrecta en esa forma: además de la aceleración constante debida a la rotación de la Tierra –o sea, la aceleración centrípeta– que también crece si [la velocidad orbital] es cero, no hay ninguna otra aceleración y en especial ninguna aceleración periódica.*”

Reconocemos ahí la crítica de Mach, pero Popper prolonga la argumentación con una nota a pie de página bastante singular:

“Uno puede pensar que la teoría cinemática de Galileo sobre las mareas contradice al llamado principio de relatividad de Galileo. Pero tal crítica será falsa, tanto histórica como teóricamente, puesto que tal principio no se refiere a movimientos rotatorios [...] Además hay (pequeñas) aceleraciones periódicas tan pronto como tomamos en cuenta la curvatura del movimiento de la Tierra alrededor del sol.”

Sobre la base de esa misma idea, la de *un efecto real, pero demasiado pequeño para ser significativo* de la curvatura de la órbita de la Tierra, Strauss (en su edición alemana del *Diálogo*) rehusa considerar como causa primaria de las mareas el efecto físico al que sin embargo concede realidad:

“Considero muy probable que, aunque la teoría expuesta por Galilei no sea incorrecta en lo esencial, sin embargo, los fenómenos que de acuerdo con ella se producen son demasiado débiles como para ser observados en relación con la marea lunar [...], así que no se excluye la posibilidad de que la visión galileana sea tenida en cuenta a la hora de aclarar fenómenos secundarios de la marea”.

Lo problemático, de diversas maneras, es evidentemente la consecuencia que ambos autores extraen de la pequeñez que atribuyen al efecto de aceleración



de la curvatura del movimiento orbital, aceleración que el segundo movimiento, el diurno, hará percibir como periódico a un observador terrestre arrastrado por esa rotación. Pues de suponer que sea exacto que la aceleración periódica sea efectivamente pequeña, me parece que la teoría galileana de las mareas debería ser considerada correcta *en principio*, y ello por pequeña que sea tal aceleración, por el mero hecho de su existencia.

II. LA TEORÍA DE LAS MAREAS REVISITADA

Conviene poner de relieve que Galileo no se hallaba en posición de realizar un análisis satisfactorio, ni siquiera cualitativamente, de las aceleraciones y deceleraciones que resultan, para un observador terrestre, de la composición de las dos rotaciones; la descripción cinemática que propone para convencer a sus lectores de su existencia (las adiciones y sustracciones mencionadas) no hace ningún caso al carácter acelerado del movimiento orbital; para tener una precisa apreciación de ello hubiera sido necesario que anticipara los trabajos de Huygens sobre la fuerza centrífuga. Sin embargo, hay una cierta incoherencia, de la que no podemos extrañarnos sin caer en flagrante anacronismo, entre la intuición galileana de la existencia del efecto de los dos movimientos combinados y el análisis cinemático que propone como justificación teórica. Nos hallamos en presencia de una inadecuación entre las propiedades atribuidas a un modelo mecánico bien definido y las justificaciones teóricas propuestas en ausencia de instrumentos conceptuales matemáticos y físicos adecuados. Tales inadecuaciones salpican la historia de la ciencia, y no es arriesgado adelantar que el descubrimiento de un fenómeno físico precede casi siempre a las justificaciones que lo integrarán en un marco teórico coherente. Basta recordar, por ejemplo, el heliocentrismo de Copérnico.

En presencia de contradicciones de este tipo, banales en historia de la ciencia, aunque sea legítimo señalar la distancia entre el modelo físico y su análisis formal, considero que el valor de la teoría debe ser juzgado históricamente según la realidad de los fenómenos atribuidos al modelo físico y no según el valor de la matematización intentada prematuramente. Está claro que no se trata de una tesis gratuita, sino que constituye el fundamento de mi análisis. Las dos cuestiones pertinentes que debe plantearse el historiador de la ciencia sobre la teoría galileana de las mareas son las que voy a tratar a continuación:

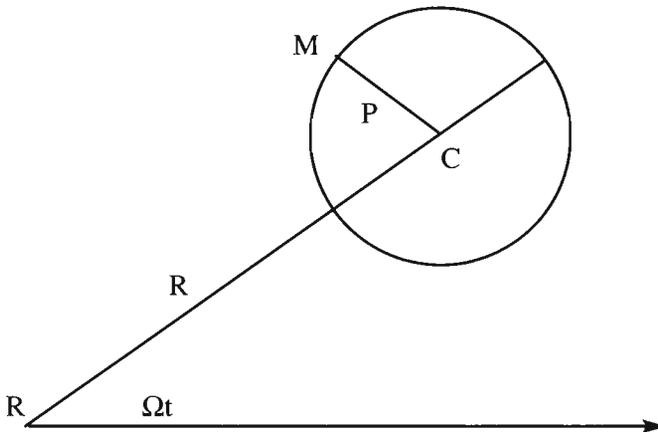
- 1) ¿Existe realmente el efecto Galileo?
- 2) ¿En caso afirmativo cuál es su relación con el fenómeno de las mareas?



1) El efecto Galileo existe

Desde el punto de vista cinemático el modelo de la teoría galileana de las mareas no es sino un caso simplificado (sin ecuante) de los modelos deferente-epiciclo de Ptolomeo, es decir, un paradigma de la astronomía antigua. La teoría de Galileo se basa en la afirmación de que el movimiento de un punto del epiciclo está sometido a una aceleración horizontal (esto es, tangencial) cuyo sentido cambia periódicamente.

La primera cuestión es saber si el efecto Galileo existe o no. Para responder podemos pensar en un dispositivo experimental; sabemos que Galileo pretendía haber construido uno: *“Y por imposible que pueda parecer a muchos que podamos experimentar en máquinas y recipientes artificiales los efectos de semejante propiedad, no es del todo imposible; he construido una máquina, en la que puede comprobarse específicamente el efecto de esa maravillosa composición de movimientos”* (*Diálogo E.N. VII, p. 456*). Realmente no sabemos si la hizo o no. Otro método consiste en sustituir ese experimento por el recurso al cálculo. El problema cinemático es muy sencillo. Con la representación geométrica ilustrada por la figura siguiente, donde **O** representa el centro del movimiento orbital, **C** el centro de la Tierra, **M** un punto fijo de su superficie y las otras notaciones son evidentes



se obtiene fácilmente como expresión de la aceleración absoluta del punto **M**

$$\mathbf{OM}'' = -\Omega^2 \mathbf{OC} - (\omega + \Omega)^2 \mathbf{CM}$$

cuya componente tangencial es $R\Omega^2 \sin(\omega t + \varphi)$.



Este cálculo hace aparecer efectivamente una componente “horizontal” de la aceleración, que cambia de sentido en el afelio y el perihelio; esta componente se debe al movimiento orbital (que es $R\Omega^2$), y debido al movimiento diurno origina en un punto fijo del ecuador una oscilación cotidiana (que es $\text{sen}(\omega t + \varphi)$). No se trata de una explicitación del discurso de Galileo, sino de un cálculo que *nosotros* podemos realizar sobre una propiedad de *su* modelo físico.

El cálculo confirma entonces literalmente, en contra de la opinión de Mach, las proposiciones de Galileo en cuanto a la *existencia* en su modelo de variaciones periódicas de la aceleración en un punto de su “ecuador”. En otras palabras, *el efecto Galileo* existe.

La realidad del efecto Galileo confirma *en principio* la analogía cuantitativa entre las mareas y el movimiento del agua en una barca bruscamente frenada. El fenómeno recibe en el cuadro de la física galileana la siguiente explicación global: la *gravitas* impide al agua ser expulsada por la rotación diurna, y el fondo del mar retiene el agua en la dirección vertical. Lejos de las costas nada obstaculiza el movimiento horizontal del agua, que es *absolutamente* uniforme, por tanto relativamente acelerado respecto a la Tierra; cerca de las costas el agua se precipita por esa aceleración relativa; en el curso de la rotación diurna esa aceleración oscila periódicamente en cada lugar geográfico.

El fenómeno resulta de la existencia conjunta de los dos movimientos circulares uniformes, y que Galileo pueda llamarlos reales, absolutamente y no sólo relativamente, a los movimientos en cuestión surge del hecho de que en el caso de un modelo a lo Tycho Brahe *el efecto Galileo* no existe claramente.

2) El efecto Galileo y la teoría clásica de las mareas

2.1.- La formulación clásica de la teoría elemental de las mareas

Una vez establecida la existencia del efecto es preciso examinar su relación con el fenómeno de las mareas. Para proceder a ese examen podemos atenernos a la presentación moderna de la teoría elemental de las mareas, y precisamente a su forma más simple, llamada *teoría estática*, cuyas notorias insuficiencias no son pertinentes para la discusión de las *causas primeras*. Siguiendo la costumbre de los manuales de Mecánica clásica representamos al astro perturbador como un centro de fuerza inmóvil (el Sol, para simplificar) que induce sobre todo cuerpo una aceleración centrípeta inversamente proporcional al cuadrado de su distancia e independiente de la masa de dicho cuerpo. Esta última singularidad de las acciones gravitacionales, cuya ilustración más conocida es la caída libre idéntica de todos los cuerpos sobre la superficie terrestre, es un elemento absolutamente esencial de la explicación clásica de las mareas, y es indispensable tenerlo en cuenta para comprender esa explicación.



Lo que *a primera vista* diferencia radicalmente la explicación clásica de la galileana es que la acción ejercida por el centro de fuerza sobre el agua marina juega un papel esencial. Ahora bien, tal acción a distancia es absolutamente extraña a la física y a la cosmología de Galileo, y se halla efectivamente ausente, tal como hemos visto, en su explicación. Es probable que esta diferencia la perciban casi todos los comentaristas como una razón suficiente para rehusar toda pertinencia a la teoría galileana de las mareas.

He dicho “*a primera vista*”, pues aunque las mareas son un resultado de la acción del Sol sobre el agua marina, se trata en realidad de ese resultado *visto desde la Tierra*, que se halla igualmente sometida a la acción de ese centro de fuerza. La marea es un movimiento *relativo* del mar y de la superficie terrestre y la teoría clásica toma en cuenta el movimiento de la Tierra del mismo modo que lo hace con el movimiento de las aguas superficiales. El efecto Galileo, que es un movimiento “absoluto” de la Tierra, no es algo *radicalmente extraño* a la teoría clásica del fenómeno. Parece pues necesario avanzar en esta comparación.

Puesto que en las interacciones gravitacionales la intensidad de la aceleración centrípeta debida al centro de fuerza es estrictamente independiente de la masa (y de la naturaleza) de los cuerpos atraídos, no depende sino de sus distancias a dicho centro; siendo la dimensión de la Tierra muy pequeña en relación a la distancia de la Tierra al Sol, está claro que las aceleraciones provocadas por este último serán *casi iguales*, tanto en magnitud como en dirección, para toda masa libre cercana a la Tierra. Por otra parte, suponiendo a la Tierra (suficientemente) sólida, todos los puntos ligados rígidamente al globo (como los de su superficie) no pueden tener sino una sola e idéntica aceleración centrípeta, que se demuestra que es igual a la de una masa situada en su centro²; el agua superficial de los mares, por el contrario, está débilmente ligada al globo y casi libre “horizontalmente”: cualquier masa de dicha agua será acelerada en función de su distancia “real” al Sol. La aceleración relativa de una masa de agua y de la superficie terrestre vecina no se debe, por tanto, sino a *la diferencia de distancias del agua y del centro de la Tierra al Sol*, diferencia muy pequeña en proporción.

Veámoslo cuantitativamente según la teoría clásica, con las notaciones usadas antes. En el sistema absoluto de referencia, la aceleración de una masa de agua “libre” situada en **M** debida al Sol situado en **O**, se escribe así:

$$(1) \quad \Gamma_a = - \frac{k}{r^3} \mathbf{OM}, \text{ donde } r \text{ es la distancia del agua al centro, o sea el módulo de } \mathbf{OM}.$$

² En rigor, la aproximación lineal de la fuerza a distancia a la cercanía correspondiente del centro de la Tierra, es de segundo orden en $\frac{p}{R}$ con las notaciones de la figura.



Para obtener la aceleración del agua en el sistema de referencia ligado a la Tierra, se añade a la aceleración absoluta las intensidades de las fuerzas de inercia de arrastre y centrífugas, o sea, respectivamente:

$$\Gamma_e = - \frac{k}{R^3} \mathbf{OC}$$

$$\Gamma_c = - (\Omega + \omega)^2 \mathbf{CM}$$

de donde para la aceleración *vista desde la Tierra* del agua “libre” en M:

$$(2) \Gamma = \frac{K}{R^3} \mathbf{OM} + \frac{k}{R^3} \mathbf{OC} + (\Omega + \omega)^2 \mathbf{CM}$$

El último término de la derecha es independiente del tiempo y no contribuye a la marea e indica que sólo han de tenerse en cuenta los efectos horizontales. La aceleración generadora de la marea es entonces la componente “horizontal” de Γ , o sea el módulo:

$$(3) \Gamma = - \left(\frac{k}{R^3} - \frac{k}{r^3} \right) R \sin(\omega t + \varphi)$$

Siendo el radio ρ de la Tierra muy pequeño respecto a las distancias casi iguales r y R , podemos desarrollar la diferencia y obtener para el orden más bajo de $\frac{\rho}{R}$ la forma clásica de la aceleración generadora de las mareas:

$$(4) G = 3/2 \rho \sin(2\omega t + 2\varphi)$$

Esta expresión explica y completa lo dicho anteriormente: la aceleración generadora es la diferencia entre dos términos casi iguales; además, parece claro que cada una de esas contribuciones es periódica, con período *diurno*, pero con fases opuestas (el signo -), y en fin, que el *período semidiurno* característico de las mareas clásicas es estrictamente el resultado de su superposición.

2.2- El efecto Galileo en la teoría clásica de las mareas

Respecto a esta presentación standard la teoría galileana sugiere una alternativa. Si suponemos completamente conocido el movimiento orbital, como hace Galileo siguiendo a Copérnico, podemos ahorrarnos las nociones de cambio de sistemas de referencia y de fuerza inercial de arrastre, que la experiencia de la enseñanza muestra que son todo menos triviales...



En efecto siempre podemos decir que la aceleración del agua “libre” en relación a la superficie terrestre es la diferencia entre la aceleración absoluta del agua - que Galileo supone explícitamente nula- y la aceleración absoluta del punto contiguo de la tierra, que es justamente el efecto Galileo. Aunque la primera no puede conocerse sino mediante la ecuación (1), la segunda la conocemos por completo desde el momento en que el movimiento de la Tierra es completamente conocido; en la hipótesis de dos movimientos circulares uniformes, su expresión explícita ha sido ya obtenida, y ésta es:

$$-\Omega^2 \text{OC} - (\Omega + \omega)^2 \text{CM}$$

por lo que restando

$$(5) \Gamma^* = -\frac{k}{r^3} \text{OM} + (\Omega + \omega)^2 \text{CM} + \Omega^2 \text{OC}$$

Si suponemos además que la órbita considerada se debe a la atracción newtoniana del “sol”, la ley fundamental de la dinámica implica la conocida relación:

$$\frac{k}{R^2} = \Omega^2 R$$

de donde la estricta identidad de las aceleraciones Γ y Γ^* dadas por las ecuaciones (2) y (5). Todas las conclusiones deducidas de la fórmula (2) se aplican a los correspondientes componentes de (5), lo que podemos expresar a modo de conclusión final de este debate.

CONCLUSIÓN

Lejos de ser despreciable, el efecto Galileo es uno de los dos componentes de la teoría clásica de las mareas, y su efecto es *casi igual* al efecto de la componente ausente de la teoría galileana de las mareas (la acción del sol sobre el agua); ambos componentes son periódicos, con período *diurno*, en oposición de fases. Operan de manera cuantitativamente sustractiva y el resultado de su acción conjunta es de período semidiurno.

Para ser precisos, la fórmula (3) permite estimar la relación del efecto de ambas contribuciones a la marea newtoniana resultante; obtenemos fácilmente:

$$\frac{\text{Mareas newtonianas}}{\text{contribución galileana}} \approx \frac{\frac{1}{R^3} - \frac{1}{r^3}}{\frac{1}{R^3}} \approx (R/r)^3 - 1$$



Con los parámetros correspondientes a la configuración Tierra-Sol, encontramos que *la marea total*, newtoniana, es al menos *diez mil veces inferior* a la que produciría exclusivamente el efecto Galileo.

Creo que podemos extraer algunas lecciones de este tema. En el plano historiográfico, parece que el proceso imaginado por Galileo ha sido o bien ocultado, o rechazado, o considerado como real pero despreciable, por los historiadores, y que de hecho sería *excesivamente* eficaz tomado aisladamente como generador de mareas. La historia de tal desviación merecería realizarse.

En el plano del análisis histórico, este análisis invita a una reevaluación de la economía interna del *Diálogo*. Sería igualmente instructivo, probablemente, retomar el estudio de la recepción de la teoría galileana de las mareas por los contemporáneos de Galileo, aunque podemos presumir que la imagen de esa recepción estaría sesgada por una opinión perentoria y desafortunadamente negativa. Conviene finalmente reconocer al *Diálogo* la legitimidad del título que se impidió por fuerza que Galileo le diera: *Sobre el flujo y reflujó del mar*.

Traducido del francés por *Sergio Toledo Prats*
Fundación Canaria Orotava de Historia de la Ciencia