

Fácilmente se comprenderá también esta similitud.

La atracción lunar se hace sentir á la vez en todas las moléculas de que se compone la Tierra, pero su energía es tanto más escasa cuanto más apartadas se hallan estas moléculas. Si se ejerciese dicha acción en todos los puntos con igual intensidad, resultaría una desviación total hacia la Luna, pero sin ninguna deformación. La desigualdad de atracción hace que las moléculas más apartadas se queden atrás, que disminuya su gravedad hacia la Tierra, y que toda la capa líquida del hemisferio opuesto á la Luna adquiriera precisamente la misma forma que la que está delante de dicho astro.

El problema sometido al análisis matemática indica como forma general del Océano la de un elipsoide alargado en la dirección de los radios de la Tierra que convergen á cada instante en la Luna. Según J. Herschel, la diferencia entre el semi-eje mayor y el semi-eje menor de este elipsoide es $1^m,47$; la del elipsoide formado por la atracción del Sol no pasa de $0^m,58$.

Hay, pues, ola ó marea alta lunar cuantas veces pasa la Luna por el meridiano superior ó inferior, es decir, cada 12 horas 25 minutos, y marea baja siempre que dicho astro se halla en el horizonte de un lugar, esto es, en períodos de duraciones iguales.

Pero no sólo influye la Luna en las mareas; también las hay producidas por la atracción del Sol. La masa enorme de este astro daría lugar á inmensos movimientos si su distancia, 400 veces mayor que la de la Luna, no contrabalancara la intensidad debida á esta masa. Aun cuando las mareas solares son mucho más débiles que las lunares, ora se agregan á éstas, ora las contrarían. Agréganse cuando los dos astros y la Tierra se hallan en la prolongación de una línea recta, lo cual sucede en las sizigias, es decir, cuando hay Luna llena ó nueva (figs. 131 y 132). Las acciones de ambos astros se contrarían cuando la Luna está en cuadratura ó en ángulo recto con el Sol, y en este caso la marea total ó resultante es mínima (fig. 133).

El cálculo demuestra que la acción luni-solar es tanto más intensa cuanto más próximos al ecuador se hallan ambos astros. De aquí resultan las grandes mareas equinocciales.

Por último, la acción varía en razón inversa del cubo de la distancia; y por lo tanto se comprende que las mareas sean más fuertes cuando el Sol y la Luna están más cercanos á la Tierra.

Para darse cuenta del efecto complejo producido por la combinación de las dos acciones simultáneas de las masas de la Luna y del Sol sobre las aguas del Océano, basta examinar separadamente el de cada una de ellas.

Para esto supongamos al globo terráqueo cubierto enteramente por las aguas, y admitamos desde luego que la profundidad del Océano sea uniforme. La acción de la gravitación de la Luna producirá á cada momento tal deformación del nivel general, que la superficie del Océano será la de un elipsoide cuyo eje mayor esté en dirección del radio vector que reúne los centros de la Luna y de la Tierra.

Así también, considerada aisladamente la acción del Sol, producirá un elipsoide del mismo género cuyo eje mayor será más pequeño, puesto que dicha acción es me-

Tierra estuviese absolutamente fija, sujeta en su sitio por una fuerza exterior, y el agua en libertad de moverse, el efecto de la potencia perturbadora produciría sin duda una simple acumulación vertical bajo el cuerpo perturbador. Pero en realidad no es toda su atracción la que levanta las aguas, sino la diferencia de sus atracciones sobre la superficie de mar á ambos lados y sobre la masa central.

nor, y estará en dirección del radio vector que reúne los centros del Sol y de la Tierra.

Estos dos elipsoides cambian de lugar á cada momento, por una parte, á causa del movimiento de rotación de nuestro globo, y por otra, á consecuencia de los movimientos relativos de traslación. Pero también se recomponen á cada instante, de suerte que la forma real de la superficie líquida es la resultante de las que cada uno de ellos produciría separadamente.

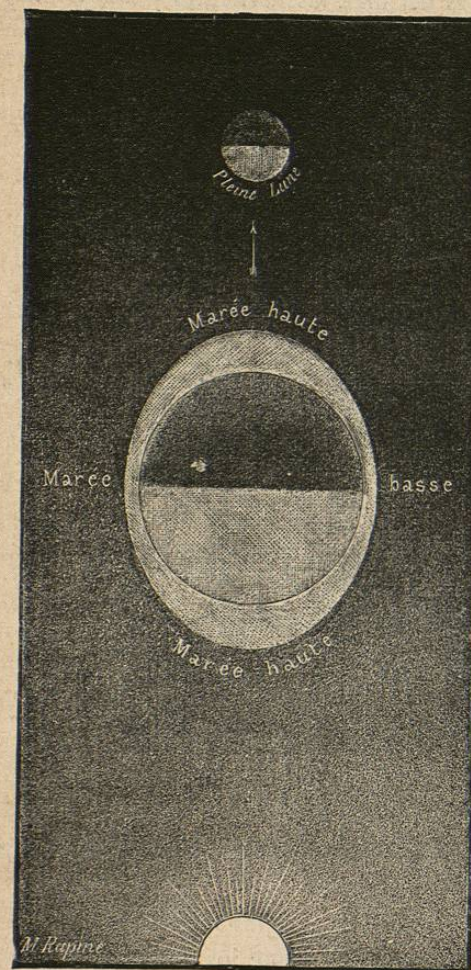


Fig. 131.—Marea luni-solar de las sizigias:
Luna llena

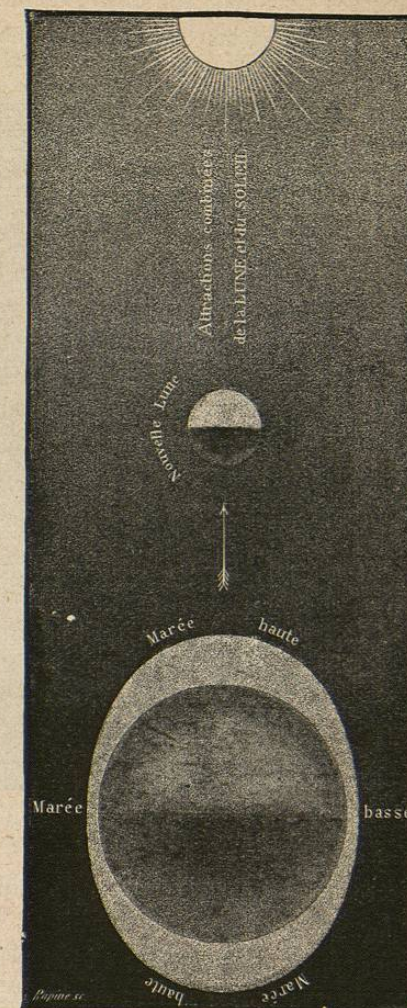


Fig. 132.—Marea luni-solar de las sizigias:
Luna nueva

Ahora es preciso suponer que las dimensiones de cada elipsoide son, así como su posición, continuamente variables. El elipsoide lunar varía con las distancias de la Luna á la Tierra; sus dimensiones son mínimas en el apogeo y máximas en el perigeo. La misma observación debe hacerse con respecto al elipsoide de marea solar, relativamente al perihelio y al afelio.

Por lo que hace á la marea total ó luni-solar, compréndese que experimente variaciones complejas, las más importantes de las cuales ocurren en las sizigias, es decir, cuando los dos elipsoides se agregan por decirlo así, y en las cuadraturas, cuando el uno destruye en parte el efecto producido por el otro.

Si ambos astros están en el ecuador ó inmediatos á él, como sucede en los equinoccios, las grandes mareas ó mareas de las sizigias llegarán á su máximun.

Vese, pues, qué complejidad hay en la combinación de la acción del Sol y de la Luna sobre las aguas del Océano, aun en la hipótesis de que cubrieran enteramente el globo, y en que, por lo tanto, ningún obstáculo retrasase su propagación regular.

Sabido es que esta hipótesis no se realiza en modo alguno en la Naturaleza. Los continentes y las islas, con los accidentes de sus costas, sus formas variadas y lo distinto de su orientación, las desiguales profundidades del mar, las corrientes y los vientos,

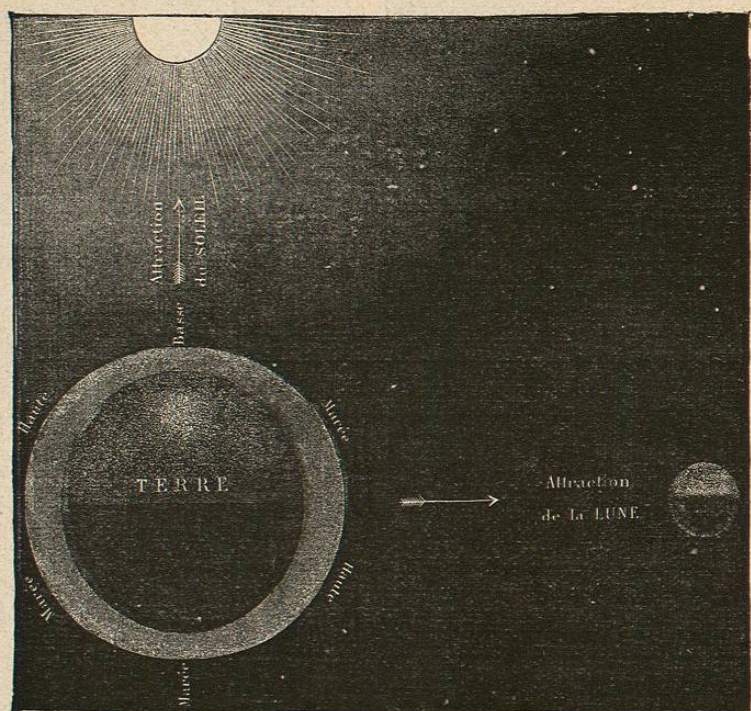


Fig. 133.—Marea luni-solar de las cuadraturas

son otros tantos obstáculos que desvían la onda de las mareas ú ola tidal de su marcha regular.

Sin embargo, basándose en la teoría y comparándola con los resultados de numerosas observaciones, se ha llegado á calcular aproximadamente los fenómenos de las mareas en un gran número de puntos de las costas y á indicar con anticipación las horas de la pleamar y bajamar y sus alturas en cada puerto, haciendo por supuesto abstracción de las causas accidentales que, como los vientos, pueden aumentarlas ó disminuirlas, según la dirección en que soplen.

No hay que confundir las mareas en su movimiento de propagación por la superficie de los mares con una corriente marina de la misma intensidad y de igual rapidez. En los fenómenos de las corrientes hay transporte real y efectivo de las masas de agua, y á decir verdad, son ríos en el seno de la masa líquida. No sucede lo mismo con las mareas. La marea es una onda, una ondulación; la intumescencia de las aguas que constituye la ola tidal se mueve, se propaga, sin que haya corriente efectiva, es decir, transporte de la masa; las oscilaciones no hacen más que pasar de las moléculas á las moléculas siguientes, y únicamente en el caso de que alguna causa extraña á la atracción

luni-solar influya en el movimiento de la marea, las aguas pueden dislocarse en realidad, como sucede cuando un viento de cierta fuerza sopla en la misma dirección que lleva la marea. Finalmente, en los estrechos tienen forzosamente las aguas ciertos movimientos causados por la resistencia que la proximidad de una costa á otra opone á la libre propagación de la ola que llega de alta mar. Tal es, en resumen, el principio de la teoría de las mareas.

Estos movimientos cotidianos é irresistibles están sujetos á leyes inmutables; gracias á la densidad del agua del mar, densidad inferior á la del núcleo sólido cubierto por esta misma agua, están contenidos en estrechos límites. Las leyes naturales bastan para “refrenar el furor de las olas.”

III

LAS MAREAS SUBTERRÁNEAS

En los párrafos anteriores nos hemos ocupado solamente de las mareas oceánicas, es decir, de los efectos de la gravitación sobre las capas líquidas que rodean las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra; pero ¿no experimentan estos efectos las demás capas de que está formado nuestro globo, así las que constituyen su núcleo interior como las que lo envuelven exteriormente?

Ocupémonos ante todo del núcleo interno.

La teoría de la precesión de los equinoccios y de la nutación, tal cual la hemos expuesto más arriba, supone que el globo terráqueo es sólido y está dotado de rigidez perfecta. ¿Es efectivamente así?

Hasta estos últimos tiempos, la mayoría de los geólogos y físicos se basaba en el aumento de la temperatura del suelo con la profundidad de las capas hasta donde la mina y la sonda han permitido penetrar al hombre, para deducir que este aumento continúa indefinidamente en proporción de la profundidad misma.

“En virtud de los experimentos bastante concordantes que se han hecho con el agua de diferentes pozos artesianos, dice Humboldt, parece que el promedio de la temperatura de la costra terrestre aumenta en sentido vertical con la profundidad, á razón de un grado del termómetro centígrado por 92 pies de París (30 metros). Si esta ley fuese aplicable á todas las profundidades, una capa de granito estaría en plena fusión á 4 miriámetros de profundidad (4 ó 5 veces la altura de la cima más alta de la cordillera del Himalaya).”

Según esto, la temperatura interna debe ser tan elevada, que las materias minerales más refractarias se hallarán en estado de fusión ígnea, y por consiguiente, aun teniendo en cuenta la presión enorme que soportan las capas centrales por parte de las capas superiores, así como la elevación de temperatura que corresponde á este cambio de estado, se ha venido á considerar nuestro globo como si estuviera formado de un núcleo líquido, rodeado de una tenue envoltura solidificada. Adoptando la cifra de 40 kilómetros como espesor de dicha envoltura, es decir, la 160.^a parte del radio terrestre, el volumen de la costra sólida apenas sería igual á la 55.^a parte del volumen del núcleo. Tal sería en esta hipótesis la débil separación interpuesta entre el suelo y el océano ígneo que constituye la casi totalidad de nuestro esferoide.

Dadas tales condiciones, compréndese que la atracción combinada de la Luna y del Sol, la cual levanta periódicamente las aguas del mar, no puede dejar de ejercer oscila-

ciones análogas en la masa del océano interior, y por consiguiente habrá mareas subterráneas así como las hay oceánicas.

¿Se han podido comprobar semejantes oscilaciones? ¿Cómo pueden éstas hacerse ostensibles? Si en efecto existen las ondulaciones de estas mareas subterráneas, claro está que á causa de su presión deben comprimir la superficie interna de la película sólida puesta en contacto con el fluido ígneo, y que las variaciones de esta presión deberán tener los mismos períodos que las mareas oceánicas. A. Perry, sabio francés que ha compilado numerosas observaciones de terremotos comparando las épocas de su mayor frecuencia con los movimientos de la Luna, ha llegado á deducir que sus épocas de máximo coinciden generalmente con las sizigias.

En su concepto, las mareas subterráneas deben ejercer por lo menos gran influencia en las conmociones terrestres, ó tal vez sean su causa principal. Elías de Beaumont admitía la probabilidad de esta opinión. Por el contrario, Ampère y Poissón combatían la fluidez del núcleo terrestre, apoyándose precisamente en el argumento de las mareas subterráneas, que á su parecer habrían roto la corteza sólida por efecto de las variaciones de presión y producido cataclismos perpetuos. Humboldt cree que las oscilaciones de las mareas en cuestión son muy pequeñas. "No se debe atribuir á ellas los terremotos, dice, sino á otras fuerzas interiores más poderosas."

El sabio inglés Hopkins, sin negar la fluidez primitiva del esferoide terrestre, la cual explica mejor que cualquier otra hipótesis la forma elíptica de nuestro globo, no cree que el espesor de la corteza sólida sea tan escaso como lo supone gran número de geólogos. Basándose en el valor medido de los fenómenos de precesión y de nutación, asienta que este valor sería mucho más considerable de lo que consignan las observaciones astronómicas, si el espesor de la costra sólida no fuese más que de 40 ó 50 kilómetros. Como en este caso no se ejercerían las acciones perturbadoras del Sol y de la Luna más que en el ensanchamiento ecuatorial, aunque no dejarían de transmitirse al resto de la corteza sólida, tampoco afectarían á la masa del núcleo fluido. La precesión y la nutación serían, pues, mucho más fuertes. Hopkins saca en definitiva la consecuencia de que el espesor de la costra solidificada debe llegar á 800 ó 1,000 millas inglesas (1,280 á 1,610 kilómetros), es decir, $\frac{1}{3}$ á $\frac{1}{4}$ del radio terrestre.

Pero nuestro malogrado compatriota Delaunay ha refutado esta teoría, poniendo por objeción á los cálculos de Hopkins la viscosidad de la masa terrestre en fusión. Gracias á esta viscosidad, el núcleo es solidario de la corteza y debe ser arrastrado con ella en sus movimientos, mientras que el sabio inglés admite que el núcleo fluido es independiente de la corteza sólida. "Las acciones perturbadoras que producen la precesión y la nutación, dice Delaunay, ejercen su influencia en la corteza sólida, propendiendo á hacerla girar alrededor de un eje que se aleja cada vez más del eje en torno del cual giraba en un principio: es un movimiento de rotación sumamente lento que estas acciones tienden á imprimir á la costra sólida, y que debe combinarse con el que posee ya. La cuestión consiste en saber si el líquido interior participa ó no de este movimiento adicional, ó si únicamente afectará éste á la corteza sin arrastrar inmediatamente al líquido consigo. Para mí no cabe la menor duda. El movimiento adicional debido á las causas indicadas es de tal lentitud, que la masa fluida que constituye el interior del globo debe seguir á la costra que lo envuelve como si el todo no formara más que una masa sólida." (*Actas de la Academia de Ciencias*, 1868.)

Así pues, según Delaunay, la consideración de los fenómenos de precesión y nutación no puede proporcionar datos sobre el mayor ó menor espesor de la costra terrestre.

Vese, pues, que todavía andan divididos los sabios sobre la cuestión de la fluidez interior de la Tierra y por consiguiente sobre la existencia de las mareas subterráneas. Puede decirse, sin embargo, que, aun en la hipótesis de Hopkins, mejor dicho, aun en el caso de la solidez completa del globo terráqueo desde la superficie del suelo hasta el centro, existen en realidad oscilaciones análogas á las mareas, si bien son demasiado débiles para que se las pueda percibir. Para que sucediera lo contrario, debería suponerse que el globo es absolutamente rígido y sin plasticidad alguna; pero los experimentos de M. Tresca sobre la licuación de los cuerpos sólidos prueban que en las sustancias conocidas no existe semejante rigidez.

Por lo demás, entre el estado de fluidez que al parecer admiten ciertos geólogos y el estado sólido propiamente dicho hay transiciones, intermedios numerosos. Es muy posible que, á pesar de la elevada temperatura que marcaría la ley de proporcionalidad del calor interno con la profundidad, estén mantenidas las capas internas, á causa de la enorme presión que soportan y ejercen unas sobre otras, en un notable estado de viscosidad. Pero un globo sólido, que no es absolutamente rígido, que está dotado de cierta plasticidad, experimenta á causa de la atracción de ciertos cuerpos exteriores, como el Sol y la Luna, oscilaciones periódicas, deformaciones de la masa, de pequeñísima amplitud ó de extraordinaria lentitud, fenómenos todos asimilables á las mareas (1).

IV

LAS MAREAS ATMOSFÉRICAS

Cuanto acabamos de decir acerca de la acción de las masas del Sol y de la Luna en la parte líquida y en la sólida del globo terráqueo, puede aplicarse sin duda alguna á su envoltente gaseosa ó sea á su atmósfera.

Es, pues, evidente que habrá mareas atmosféricas como las hay oceánicas. Falta saber cuál es la amplitud de las oscilaciones de la masa de aire que rodea á nuestro planeta, y cómo se dan á conocer estas oscilaciones y se hacen perceptibles á los observadores.

Nuestra situación en la superficie del suelo, es decir, en el fondo del océano fluido que constituye la atmósfera, no nos permite observar las variaciones de su nivel del mismo modo que observamos las del nivel del mar. Pero claro está que el efecto producido por la atracción de la Luna y por la del Sol será proporcionalmente análogo al de las mareas del Océano. En los dos extremos del diámetro terrestre dirigido hacia la Luna, la atracción de este astro debe levantar las capas de nivel de la atmósfera, haciendo que en su conjunto adquieran la forma de un elipsoide alongado. Un efecto parecido, siquiera menor, puesto que la acción del Sol es también menor que la de nuestro satélite, ocurrirá en la dirección del radio vector que une los centros de gravedad del Sol y de la Tierra: la forma de la atmósfera será la combinación de estas dos acciones simultáneas. Los pasos de la Luna por el meridiano, las épocas en que la Luna y el Sol están en línea recta, es decir, las sizigias, y por fin, las épocas en que nuestro

(1) M. G. H. Darwin ha publicado en las *Philosophical Transactions* y en los *Proceedings of the royal Society*, 1879, una serie de interesantes memorias acerca de este asunto, en las que estudia en sus efectos las mareas que sufre un esferoide viscoso por parte de la masa de un satélite; el autor saca de su análisis importantes consecuencias sobre la historia antigua del sistema solar, y en especial sobre la de la Tierra y de la Luna.

satélite está en el perigeo, deberán ser los principales períodos del fenómeno, aquellos en que la marea atmosférica llegará á su máximo.

Además, la intumescencia ó hinchazón producida en las capas aéreas recorrerá, como la onda de las mareas oceánicas, toda la circunferencia del globo terráqueo, por efecto de los movimientos combinados de la Luna y de la Tierra.

De aquí resultarán forzosamente variaciones correspondientes en la presión de la atmósfera, conforme podemos conocerlas merced al barómetro. A decir verdad, las oscilaciones del barómetro que proceden de la incesante movilidad de la atmósfera, de la acción del calor y de mil circunstancias locales, hacen muy difícil la averiguación de los efectos debidos á la sola atracción luni-solar. Para reconocer y medir las variaciones dimanadas de las mareas atmosféricas, ha sido preciso comparar un crecido número de observaciones. Habiendo reunido de este modo Laplace cerca de cinco mil observaciones barométricas recogidas por Bouvard relativamente á los días de las sizigias y de las cuadraturas, y á los que preceden y siguen á estas fases, dedujo que el flujo lunar atmosférico no produce en París una variación mayor que $\frac{1}{18}$ de milímetro en la altura de la columna de mercurio. En el ecuador, donde el flujo llega á su máximo, no alcanza á un milímetro según la teoría.

Una oscilación tan débil en la presión de la atmósfera ¿puede ser causa, como se ha sostenido muchas veces, de los cambios de tiempo que, según se dice, acompañan á las fases de la Luna? Cuesta tanto más trabajo creerlo cuanto que semejante coincidencia no existe; pero el pueblo se empeña con obstinada terquedad en que la renovación de la Luna ha de ser el preludio de un cambio meteorológico completo.

Muchos meteorologistas se han esforzado en comprobar la exactitud de dicha creencia, tan difundida hoy todavía: han modificado de veinte modos distintos la ley de esta periodicidad, y el autor de cada sistema ha procurado hallar la confirmación de su propia hipótesis en los registros de observación. La misma multiplicidad de las reglas dadas acerca de este punto por cada uno de ellos parece probar que la influencia lunar dista mucho de ser incontestable. De todos modos, si hay por parte de la Luna una influencia formal sobre el tiempo, no parece que la débil acción ejercida por su masa en la masa de la atmósfera baste para apreciarla (1).

Aparte de la acción directa que las masas de la Luna y del Sol ejercen en la atmósfera, tienen otra indirecta que puede contribuir á los movimientos de la masa gaseosa. La atmósfera descansa sobre una base movable (al menos en los tres cuartos de la superficie del globo), es decir, sobre el Océano, cuya elevación y descenso periódicos son á veces considerables. El flujo sube muy poco en alta mar y las variaciones de nivel deben producir en las capas aéreas un efecto insensible; pero no sucede lo propio cerca de las costas, en donde las circunstancias locales y accidentales ocasionan mareas muy fuertes. También Laplace cree poder atribuir principalmente á la elevación y al descenso periódicos del mar el flujo lunar atmosférico en nuestros climas. Esta era asimismo la opinión de Olbers, quien fijándose en que la pleamar excede á veces de 20 pies en Brest y de 50 en Bristol, añade:

(1) En el corto, pero interesante trabajo que ha escrito Olbers sobre la *Influencia de la Luna en las estaciones* hace constar la insignificancia de las variaciones ocasionadas en la altura del barómetro por las mareas atmosféricas. Sin embargo, añade: "Aun cuando estos efectos son muy débiles, no es con todo imposible que las mareas más fuertes de los plenilunios y novilunios predispongan la atmósfera á mareas más considerables. Por tanto no me atrevo á declarar falsa la observación que algunos físicos pretenden haber hecho, esto es, que hay más tormentas en los plenilunios y novilunios que en los cuartos." (*Anuario de la oficina de longitudes para 1823.*)

"Tan enormes masas de agua ¿no deben ocasionar algunas variaciones en la atmósfera, tanto más cuanto que parecen influir un poco en la electricidad del aire? Y en efecto, los habitantes de las costas creen haber observado que los cambios de tiempo, de la fuerza y dirección del viento y de las nubes dependen de las mareas."

V

LAS MAREAS Y LA DURACIÓN DE LA ROTACIÓN DE LA TIERRA

La Luna describe alrededor de la Tierra una órbita que sería invariable si el Sol estuviese á una distancia que pudiera considerarse como infinita. Entonces, obrando la masa del Sol con la misma intensidad en nuestro globo y en nuestro satélite y siguiendo direcciones paralelas, su acción no ejercería ninguna influencia perturbadora.

Pero no sucede así. La Luna está en sus conjunciones más próxima al Sol que á la Tierra, en una cantidad que dista mucho de ser despreciable, por cuanto excede de la 400.^a parte de la distancia media. Por efecto de esta diferencia de distancia resultan disminuídas la atracción más fuerte del Sol sobre la Luna y la gravedad de ésta hacia la Tierra. Lo propio sucede en las oposiciones: la Luna está entonces menos atraída por el Sol que la Tierra, y por consiguiente el efecto producido es también una disminución de la gravedad de la Luna hacia nuestro globo. En las cuadraturas se da el caso contrario, pero el aumento de gravedad que resulta es mucho menor, de suerte que en definitiva, á causa de la acción del Sol, la Luna está como mantenida á una distancia de la Tierra mucho mayor que si dicha acción no existiese. Así pues, la velocidad de circulación de nuestro satélite resulta alterada, disminuída de este modo.

Sin embargo, esta influencia del Sol no sería observable en el curso de las revoluciones sinódicas de la Luna, porque permanecería constante, si la distancia del Sol á la Luna y á la Tierra fuese invariable. Pero ya se sabe que no es así, que la órbita de la Tierra es una elipse como la de la Luna, y que nuestro planeta dista del Sol en su perihelio casi 1.500,000 leguas menos que en su afelio. Así pues, en el perihelio es más perceptible la perturbación causada por el Sol en la órbita lunar; esta órbita parece dilatarse entonces, al paso que en el afelio se contrae. Dicha perturbación, que se reproduce periódicamente todos los años, lleva el nombre de *ecuación anual*.

Vamos á ver ahora una vez más por medio de qué maravilloso encadenamiento de los efectos y las causas están enlazados todos los fenómenos físicos ó astronómicos que en apariencia son los más extraños entre sí. Acabamos de ver que la masa del Sol es la que produce las perturbaciones ú oscilaciones anuales del movimiento de la Luna; y la razón de estas desigualdades estriba principalmente en la forma elíptica de la órbita terrestre ó en su excentricidad. Pero en un capítulo precedente hemos visto que esta excentricidad no es invariable, que la órbita de la Luna cambia de forma con los siglos; en la actualidad y desde hace centenares de miles de años la excentricidad terrestre disminuye, y en un período muy remoto llegará á un valor mínimo que la aproximará al círculo; luego, tomando este cambio una dirección contraria, la excentricidad irá creciendo de nuevo.

Esta variación secular de nuestra órbita produce otra del mismo período en la Luna. Demuéstrase en efecto que la aceleración y la aminoración del movimiento de la Luna (lo que se llama ecuación anual y que acabamos de describir) no se compensan exactamente; que, si la excentricidad terrestre disminuye, predomina la aceleración, de