

de tratar. Calculando los señores Stone y Croll los efectos de estas variaciones en las desigualdades de duración de las estaciones terrestres, han demostrado que eran mucho mayores que los que proceden de la excentricidad actual. Por ejemplo, cien mil años antes del de 1800, la excentricidad de la órbita era casi el triple de la actual, resultando de aquí una diferencia de veintitrés días de exceso del invierno que caía en el afelio sobre el verano que caía en el perihelio, diferencia que llegaba á veintiocho días en una época dos veces más remota, y remontándose hasta á ochocientos cincuenta mil años más allá del mismo punto de partida, se encuentra una diferencia de treinta y seis días.

Puede convenirse en que tan gran exceso de duración del invierno sobre el verano ocasione un enfriamiento intenso, capaz de producir fenómenos glaciales en grande extensión; tanto más cuanto que el prolongado y frío invierno de la época considerada sucedía á un verano corto, pero muy caluroso, y por consiguiente los fenómenos de evaporación aumentaban de intensidad al mismo tiempo que los de condensación. La hipótesis de Croll—nombre del sabio que la formuló por primera vez—consiste, pues, en explicar la aparición de los períodos glaciales por el efecto simultáneo de las variaciones de la excentricidad terrestre y de los movimientos combinados de la precesión y del perihelio, en las épocas en que dicha excentricidad llega á su máximo. Hácese á esta hipótesis una objeción que únicamente los geólogos son competentes para admitir ó rechazar, á saber, que el período de 10,500 años es muy corto; y que aun considerándolo como subdivisión de un período mucho mayor que comprende tantas veces 10,500 años como lo permite la existencia de una excentricidad considerable, siempre resulta una duración insignificante.

No pretendemos discutir aquí las razones que militan en pro ó en contra de las varias hipótesis propuestas; nuestro objeto ha sido únicamente demostrar la importancia de las perturbaciones seculares experimentadas por el planeta á causa de la gravitación universal, para conocer mejor las cuestiones relativas á la historia de su pasado, y por lo mismo á su historia futura.

CAPÍTULO VI

LAS MAREAS

I

MAREAS OCEÁNICAS. —DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL FENÓMENO

Las mareas son otra prueba manifiesta de la acción de las masas de la Luna y del Sol sobre la Tierra, y también un fenómeno de la segunda categoría, es decir, producido por la propensión de las moléculas del cuerpo atraído á dirigirse á los centros de los cuerpos atrayentes. En este caso es la movilidad de las aguas de los océanos y de los mares la que produce sus oscilaciones periódicas por efecto de la influencia de los dos astros, y en este caso también veremos cómo resulta una reacción que debe alterar, si bien en un espacio de tiempo sumamente largo, la duración de la rotación del globo terráqueo sobre su eje.

El fenómeno de las mareas tiene demasiada importancia para la física terrestre para

que no entremos en algunos detalles sobre sus circunstancias y sobre su causa. Empecemos por describirlas.

Nadie ignora que las costas del Océano ofrecen dos veces al día, con unas 12 horas y 25 minutos de intervalo, el espectáculo de la marea creciente; las aguas suben poco á poco, invaden la playa, cubriéndola á una altura cada vez mayor, y después de crecer seis horas llegan á su máximo.

Apenas llegado el momento de la *pleamar*, cesa el *flujo*, empieza la marea descendente, y el *reflujo* sucede al flujo. El mar se retira entonces de la playa que había invadido y baja poco á poco hasta su punto de partida, resultando entonces la *bajamar* ó *marea baja*. En seguida empieza de nuevo otra marea creciente, seguida de una bajamar y así sucesivamente.

Hay que advertir que el instante de la bajamar no es precisamente la mitad del intervalo que separa dos pleamares consecutivas, porque el flujo dura menos que el reflujo, ó si se quiere, el mar invierte más tiempo en bajar que en subir. Esta diferencia varía según los puertos, y siendo solamente de 16 minutos en Brest, llega en el Havre á 2 horas 16 minutos.

Tal es en conjunto el fenómeno de las mareas. Si no se hubiera pasado de la observación de esta periodicidad de los movimientos del mar, la ciencia no habría penetrado muy profundamente el misterio de sus causas; no habría podido predecir, como lo hace hoy con toda seguridad, la intensidad de las mareas en los diferentes puertos, ni las épocas precisas de las más altas, que tan preciosas indicaciones proporcionan á la navegación.

Antes de pasar á exponer las causas de este fenómeno, precisaremos más los hechos para proceder conforme á la marcha natural de la ciencia.

Hemos dicho que el intervalo que media entre dos pleamares es de 12 horas 25 minutos. De aquí resulta que la pleamar tiene un retraso de 50 minutos cada día, y por consiguiente, el período diario del fenómeno es precisamente igual al día lunar (1), que dura también 24 horas 50 minutos. En otros términos, los retrasos sucesivos de las pleamares son los que presentan los pasos sucesivos de la Luna por el meridiano. Si se anota, pues, la hora del flujo en un puerto, será fácil averiguar la hora en que tendrá lugar otro día. Los marinos, aprovechándose de esta circunstancia, adoptan sus disposiciones en consecuencia, según que quieran entrar dicho día en el puerto ó salir de él.

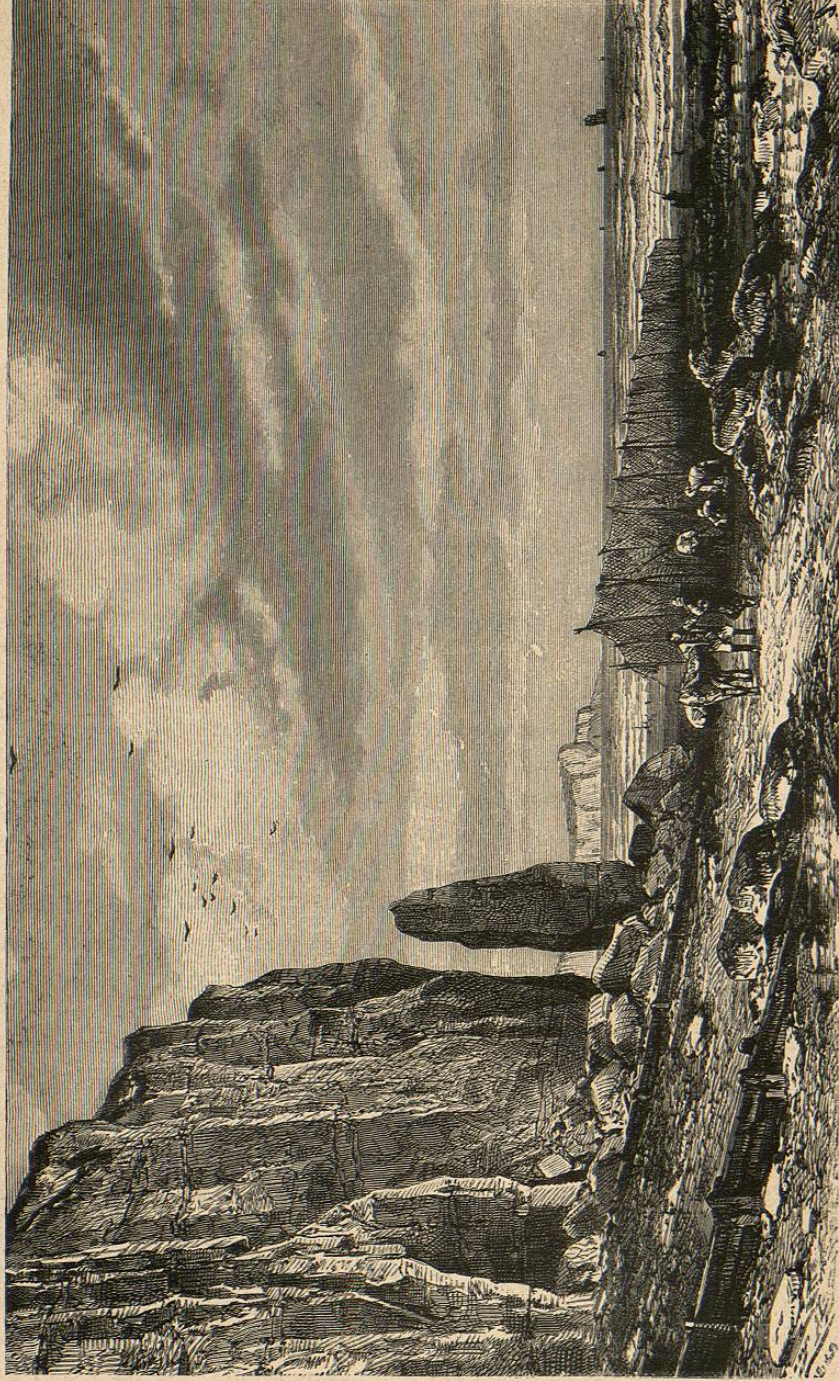
Fijémonos además en otra circunstancia: 50 minutos diarios de retraso dan en unos 14 días y tres cuartos un retraso total de 12 horas, ó sea uno de 24 horas ó de un día en 29 días y medio, es decir, en el período de una lunación.

Así pues, las horas de las mareas en un puerto determinado son las mismas cada quince días, con la diferencia de que las de la mañana vienen á ser las de la noche y recíprocamente. Al cabo del mes lunar, la hora vuelve á ser exactamente la misma.

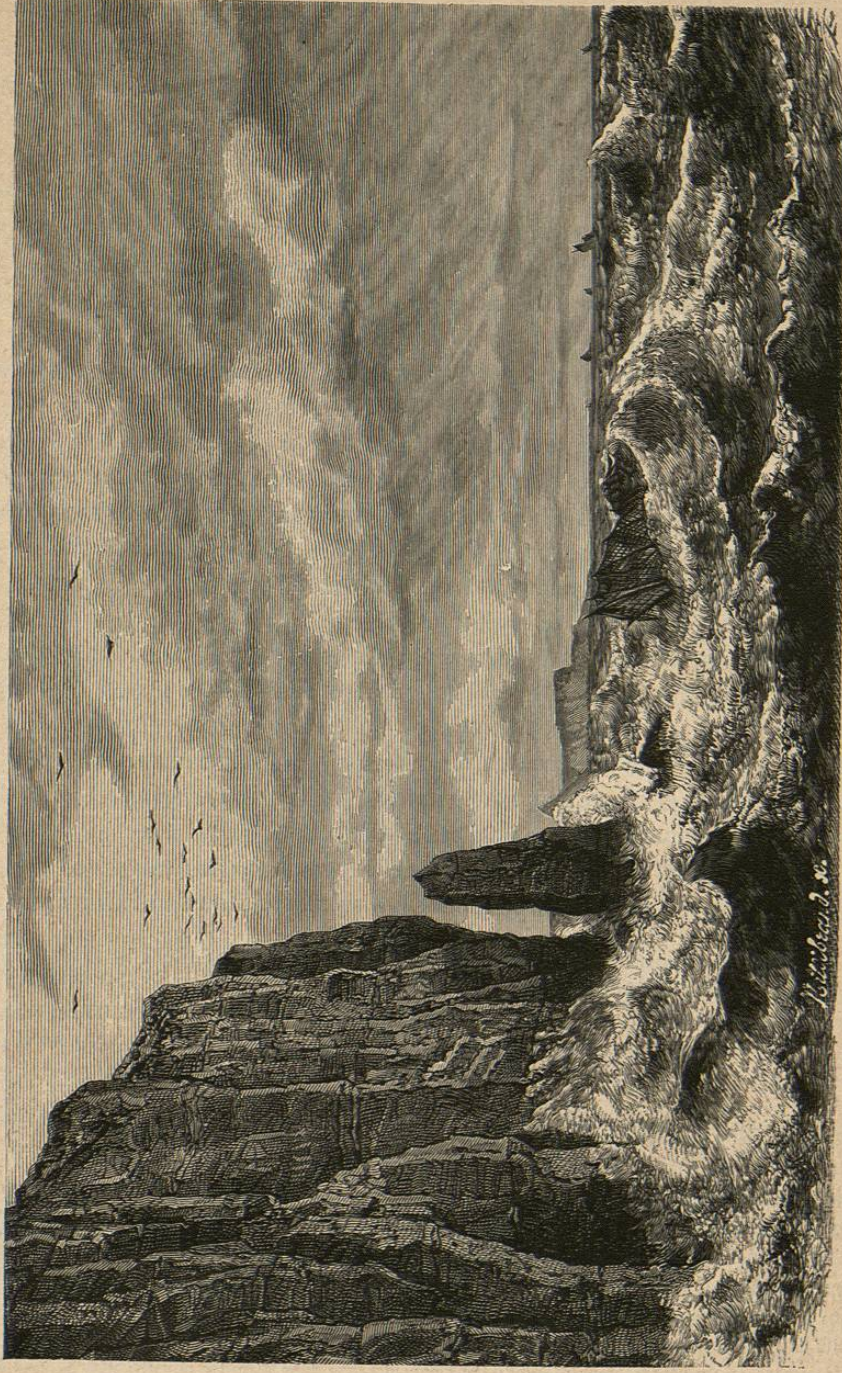
Los hechos que consignamos aquí se refieren solamente á las horas de las mareas y á sus variaciones. Ocupémonos ahora de la intensidad del fenómeno.

Esta intensidad es á su vez muy variable en un mismo mar y en un mismo puerto; pero aun en este caso se presenta una periodicidad notable, que demuestra la conexión que tiene el fenómeno con las posiciones relativas del Sol, de la Luna y de la Tierra.

(1) Intervalo que transcurre entre dos pasos sucesivos de la Luna por el mismo meridiano superior.



UNA PLAYA DURANTE LA BAJAMAR



UNA PLAYA DURANTE LA PLEAMAR

Cerca del novilunio y del plenilunio la pleamar llega á su altura máxima, al paso que la bajamar correspondiente desciende por el contrario hasta su mayor depresión. Estas son las *grandes mareas*, ó mareas de *sizigias*. Desde entonces empieza á disminuir progresivamente la altura de las mareas hasta la época de los cuartos creciente y menguante de la Luna: entonces ocurren las *mareas muertas* ó mareas de las *cuadraturas*. Luego, á partir de estas dos épocas hasta las sizigias, la altura de las pleamares emprende otra vez su marcha creciente.

Mas, á decir verdad, tanto la marea mayor como la menor no ocurren en el día mismo de la fase lunar; en todos los puertos del Océano se nota una diferencia de 36 horas ó sea día y medio. Así pues, la tercera marea que sigue al plenilunio y al novilunio es la más alta, lo propio que la más baja es la tercera que sigue á las cuadraturas. Tanto los períodos cotidianos como los mensuales ofrecen asimismo perfecta coincidencia con los fenómenos luni-solares.

Esta notable coincidencia entre las horas, los períodos de las altas mareas y las posiciones de la Luna y del Sol con relación á la Tierra, fué la que hizo sospechar hace ya mucho tiempo que la causa del fenómeno residía en aquellos dos astros. "*Causa*, dice Plinio, *in Sole Lunaque.....*," Pero ¿de qué clase es su influjo? Tal era el problema cuya solución estaba reservada á la ciencia moderna. Descartes fué el primero que osó rasgar el velo y sondear el misterio, y si el gran filósofo no salió airoso en su tentativa, culpa fué de sus ideas preconcebidas sobre el sistema del Mundo (1).

Pero prosigamos el estudio de los hechos.

La altura de las mareas varía también con las declinaciones de la Luna y del Sol; siendo tanto mayor cuanto más próximos al ecuador están ambos astros. Dos veces al año, el 21 de marzo y el 22 de septiembre, está el Sol en el ecuador mismo. Si hacia la misma época se halla la luna inmediata al mismo plano, las pleamares son las más altas de todas, y llevan el nombre de mareas de *sizigias equinociales*, porque la Tierra está entonces en el equinoccio de primavera ó en el de otoño.

Por el contrario, las mareas más bajas tienen lugar hacia los solsticios, si la Luna llega al mismo tiempo que el Sol á su menor ó á su mayor altura meridiana.

(1) Keplero había sospechado ya que las mareas tenían por causa la tendencia de las aguas del mar hacia la Luna y el Sol. "Si la Tierra cesara, dice, de atraer las aguas á sí misma, todas las del Océano se elevarían hacia la Luna, porque la esfera de atracción de la Luna se extiende á nuestra Tierra y atrae sus aguas." Esta opinión de Keplero, que no la llevó más adelante, era cierta. Es curioso verla combatida por Galileo: este grande hombre se admira, en su cuarto diálogo sobre los *Sistemas del mundo*, de que "entre todos cuantos se han ocupado del maravilloso efecto natural del flujo y reflujo del mar, Keplero, que á la independencia y la penetración del genio reunía el conocimiento perfecto de los movimientos atribuidos á la Tierra, haya prestado oídos con complacencia á esa soberanía de la Luna sobre el Océano, á propiedades ocultas, á verdaderas puerilidades." Para Galileo eran las mareas efecto del doble movimiento de la Tierra, y creía poder explicar las variaciones del fenómeno en virtud de las aceleraciones ó retrasos que sufren los movimientos de la Tierra y de la Luna al recorrer el zodiaco.

La ciencia ha dado la razón á Keplero contra Galileo, y también contra Descartes, que explicaba las mareas apelando á los famosos torbellinos. Según Descartes, "cuando la Luna pasa por el meridiano, el fluido que se halla entre la Tierra y la Luna, fluido que se mueve también á modo de torbellino alrededor de la primera, se encuentra en un espacio más reducido, por consiguiente debe circular más de prisa y además causar una presión en las aguas del mar." Esta explicación, según lo hace notar d'Alembert, adolece de dos defectos; primero, basarse en la teoría de los torbellinos, justamente desechada, y segundo, y más grave, ser contraria á los hechos, porque la presión de que habla debería rechazar las aguas del mar, y estas aguas descender cuando la Luna pasa por el meridiano, y precisamente sucede lo contrario.

A Newton le estaba reservada la gloria de descubrir la verdadera causa de las mareas, como se verá en breve.

Por último, las distancias reales de la Luna y del Sol á la Tierra ejercen también su influencia en la altura de las mareas. En igualdad de circunstancias, la altura de una marea es tanto mayor cuanto más cercanos á la Tierra están ambos astros. Así es que las mareas del solsticio de invierno son más considerables que las del solsticio de verano, y las de las sizigias mayores en el perigeo de la Luna que en el apogeo.

Tales son las circunstancias generales que caracterizan los movimientos periódicos del mar; pero no debemos olvidar que no son las únicas: la fuerza y la dirección de los vientos, la configuración y la orientación de las costas, la profundidad y la extensión de los mares, las circunstancias que dependen de los lugares y de los tiempos, son otras tantas influencias múltiples que complican de un modo singular las mareas.

Así por ejemplo, todos sabemos que los mares aislados, como el Caspio, ó poco extensos y en comunicación con el Océano por estrechos ó pasos angostos, como los mares Negro y Mediterráneo, tienen mareas muy poco perceptibles (1). Las costas opuestas del Atlántico, que se hallan situadas frente á frente, al Oeste las unas y al Este las otras, tienen mareas muy desiguales. Lo propio sucede en las costas orientales de Asia, en las que hay fuertes mareas, al paso que en la otra orilla del Pacífico y en los archipiélagos oceánicos el flujo, muy regular, llega á escasa altura.

Circunscribiéndonos á los puertos de Europa, diremos que la intensidad del fenómeno es sumamente variable en ellos, aun tratándose de dos lugares vecinos.

También hay una diferencia notable entre las mareas de la costa occidental de Europa y las de las islas del mar del Sur, las cuales apenas suben 30 centímetros. En cambio hay otras mareas mucho más terribles, y entre ellas me limitaré á citar las de la bahía de Fundy, en la Nueva Escocia, que, según dicen, se elevan hasta 30 metros de altura.

La razón de estas diferencias depende, en gran parte, de circunstancias locales. Los puertos de la Mancha experimentan grandes mareas, porque el movimiento de las aguas encuentra un obstáculo en la proximidad de las costas, y cuanto más se penetra en el golfo, mayor es la altura de la marea.

Esta se hace sentir en los ríos á una distancia tanto más considerable de su desembocadura cuanto mayores son la anchura y la profundidad. En el momento de la pleamar, las aguas del río refluyen, retroceden en su curso, pero esta marea fluvial sólo se efectúa progresivamente y cada vez con mayor retraso sobre la hora de la marea oceánica. Resultan de aquí curiosos fenómenos, conocidos en Francia con los nombres de *mascaret*, *bore* y *barra de oleada* (2).

El *mascaret* se observa principalmente en la época de las grandes mareas equinociales. Débil en las aguas profundas, como también en los bancos poco cubiertos, lo favorece en su formación un viento de mar moderado, al paso que un viento impetuoso extiende las aguas disminuyendo su altura. Babinet, que ha observado mucho tan cu-

(1) Según las observaciones del sabio y malogrado G. Aimé, que estudió por espacio de dos años las ondulaciones del nivel del mar en Argel, la amplitud de la marea luni-solar llega en dicho puerto los días de sizigias á 88 milímetros. "El lago de Michigán, á pesar de tener 62 000 kilómetros cuadrados, es la superficie lacustre más pequeña en que se ha notado con precisión el regreso regular del flujo y reflujo; según el teniente Graham, la amplitud de la marea es allí de 75 milímetros." (LA TIERRA, t. II, por Eliseo Reclus.)

(2) El nombre de *mascaret* era peculiar del río Dordoña. Arago y Babinet lo aplicaron al mismo fenómeno que se designaba en la desembocadura del Sena con el nombre de *barra de oleada*. En la desembocadura del Amazonas ha recibido el de *pororoca*, onomatopeya del rumor de sus aguas. "Levántase, dice E. Reclus, en tres oleadas sucesivas que llegan en junto de 10 á 15 metros de altura, y las embarcaciones sorprendidas por aquel diluvio repentino corren gran peligro de zozobrar, como en alta mar."

rioso fenómeno, y á quien pertenecen los datos precedentes, ha hecho la siguiente descripción de él:

“Mientras que por lo general, y hasta en la extrema desembocadura del Sena, en el Havre, en Honfleur, en Berville, el mar sube por grados insensibles en el momento del flujo y se eleva gradualmente, en la porción del lecho del río más arriba y más abajo de Quillebœuf se precipita la primera oleada cual inmensa catarata, formando una ola rotatoria tan alta como los edificios de la orilla, ocupando toda la anchura del río, que allí tiene de 10 á 12 kilómetros, derribándolo todo á su paso y llenando instantáneamente la vasta cuenca del Sena. No puede darse nada más majestuoso que esa formidable ola tan formidablemente movable. Cuando se ha estrellado contra los muelles de Quillebœuf, inundándolos con sus salpicaduras, remonta y penetra en el lecho más angosto del río, que corre entonces hacia su origen con la rapidez de un caballo á galope. Los barcos varados, incapaces de resistir la acometida de tan furiosa oleada, corren gravísimo riesgo. Las praderas de las orillas, corroídas por la corriente, empiezan á *derretirse*, según una expresión local, y desaparecen. El lecho del río se desvía sucesivamente de uno á otro de los ribazos peñascosos que lo encajonan, y finalmente, los bancos de arena y de cieno del fondo se agitan y mueven como las olas de la superficie. No hay nada más asombroso que esas temibles *barras de oleada* observadas á la luz del sol más puro, en medio de la calma más completa y sin que se note el menor indicio de viento, de tempestad ó de tormenta. Los ruidos más atronadores anuncian y acompañan esas grandes crisis de la Naturaleza, preparadas por una causa eminentemente silenciosa, la *atracción universal*.”

Basándose Babinet en las investigaciones teóricas de Lagrange y en los recientes experimentos de Russel relativos á la velocidad de las olas en los canales, explica el *mascaret* y todos los fenómenos análogos, atribuyéndolo al obstáculo que opone á la propagación de las mareas la disminución progresiva de la profundidad de los ríos á partir de su desembocadura. “En efecto, dice, en todas las localidades en que el agua vaya siendo cada vez menos profunda, las primeras olas, retrasadas por la falta de profundidad, serán alcanzadas por las siguientes, que marchan por un agua más profunda, y éstas lo serán á su vez por las que las siguen, de suerte que como las olas que van á la cabeza serán vencidas en velocidad por todas las siguientes, estas últimas caerán á modo de cascada por encima de las primeras y producirán esa inmensa catarata cuya forma y efectos he descrito más arriba.” (*Estudios y lecturas sobre las ciencias de observación.*)

Pero ya nos hemos ocupado bastante de los hechos, cuya descripción detallada necesitaría un volumen.

Digamos ahora cuatro palabras acerca de las causas de las mareas.

II

TEORÍA DE LAS MAREAS: TIENEN POR CAUSA LA ATRACCIÓN QUE EJERCEN LAS MASAS DEL SOL Y DE LA LUNA EN LAS AGUAS DEL OCEANO

Consideremos á la Luna aislada y en un momento dado. Reunamos con una línea ideal su centro con el centro de la Tierra: esta línea encontrará la superficie del globo en dos puntos diametralmente opuestos. El uno, más inmediato á la Luna, será el lugar de la Tierra respecto del cual el astro de las noches estará en el zenit; el punto opuesto

tendrá la Luna en el nadir. Además todos los puntos de la Tierra que tienen la misma longitud que los primeros verán pasar en aquel momento la Luna por su meridiano.

La atracción de la Luna sobre las moléculas líquidas más próximas contrabalancea en parte la atracción de la Tierra, y disminuye su gravedad en el sentido de la vertical. Estas moléculas, que por su fluidez é independencia no están adheridas al suelo, á la parte sólida de la Tierra, se elevan, pues, en virtud de esta atracción. Lo propio sucede, aunque en menor escala, respecto de las moléculas vecinas, en todo el hemisferio vuelto hacia la Luna, siendo la atracción tanto más débil cuanto más se alejan dichas moléculas del punto que es como el vértice del hemisferio que mira á la Luna.

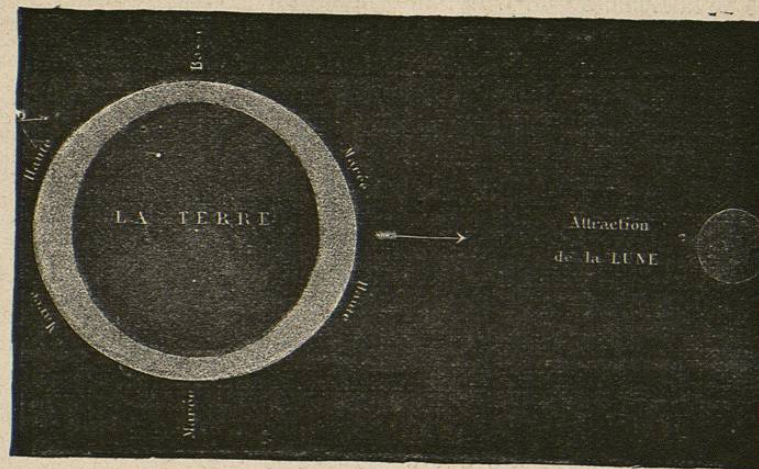


Fig. 130.—Atracción de la Luna sobre las aguas del mar. Marea lunar simple

Resulta de aquí que la capa líquida que cubre este hemisferio se alarga, se hincha hacia el lado de la Luna, y en vez de conservar su forma esférica, adquiere—guardando por supuesto todas las proporciones—la de un huevo, geométricamente la de un elipsoide alargado, cuyo eje mayor sigue la dirección del radio vector que reúne el centro de la Tierra con el de la Luna (fig. 130). Hay pleamar en el vértice y bajamar en todos los puntos que tienen la Luna en el horizonte. Si la Tierra no tuviera movimiento de rotación, esta marea sería permanente y las aguas permanecerían así en equilibrio, ó por lo menos seguirían el solo movimiento de revolución de la Luna; las mareas no tendrían, pues, otro período sino las lunaciones. Mas la Tierra, al girar, presenta á la Luna toda su periferia, de suerte que la onda sigue el paralelo que corresponde á la posición de nuestro satélite.

Hasta aquí no es difícil comprender la pleamar y la bajamar por lo que respecta al hemisferio vuelto hacia la Luna; pero ¿en qué consiste que las aguas se hinchan también en la extremidad del hemisferio opuesto (1)?

(1) Hay en esto una dificultad, aparente tan sólo, pero que se presenta con bastante frecuencia á la imaginación de las personas poco familiarizadas con el análisis matemática. He aquí cómo solventa esta dificultad J. Herschel, en sus *Outlines of Astronomy*:

*Parece natural, dice, que el Sol ó la Luna levanten con su atracción las aguas del Océano sobre las cuales se encuentran; pero también parece absurdo que la misma causa las levante al propio tiempo por el lado opuesto. El error de esta objeción dimana de no considerar la atracción del cuerpo perturbador sobre la masa de la Tierra, y sí sólo como si únicamente ejerciera todo su efecto en la superficie del agua. Si la