

por causas locales. Pero las mareas no dejan de experimentar en su conjunto el retraso general que acabamos de ver y que las observaciones han demostrado en todas partes. Las cosas ocurren en definitiva como si la Luna estuviera situada detrás de la posición que ocupa en el cielo, relativamente al sentido de su movimiento diurno. En lugar de dirigirse las dos protuberancias líquidas en la dirección del diámetro AB de la Tierra ó del radio vector lunar TL, están en *ma*, retrasadas tres horas por ejemplo, ó 45° sobre el paso de la Luna por el meridiano (figura 133) que se ha efectuado en L'; se han dirigido hacia el oriente de la Luna.

“Si nos fijamos, dice Delaunay, en el modo cómo se averigua la porción de la acción lunar que ocasiona el fenómeno de las mareas, veremos que la primera de estas protuberancias está como atraída por la Luna, y la segunda, por el contrario, como rechazada por dicho astro; resulta, pues, un *par* (1) aplicado á la masa del globo terráqueo y con tendencia á hacerle girar en sentido contrario de aquel en que gira en realidad, par que, según esto, debe producir un retraso en la rotación de este globo.”

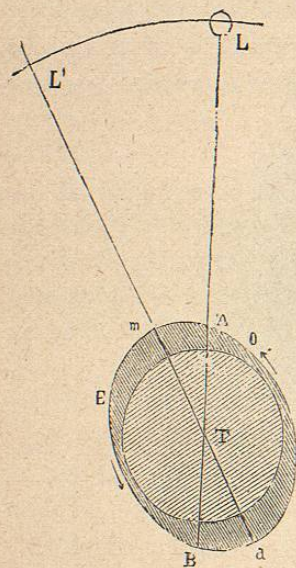


Fig. 134.—Retraso de las mareas lunares

Por lo demás, para comprender el efecto producido, se puede recordar lo que hemos dicho acerca de la causa mecánica de la precesión de los equinoccios. La diferencia está en que aquí se trata de la protuberancia de las mareas y no del ensanchamiento ecuatorial. Ahora bien, ¿es suficiente esta causa de retraso para explicar el exceso de la aceleración secular de la Luna? Sí, responde Delaunay. En virtud de un cálculo aproximado se demuestra que basta para esto que cada protuberancia líquida sobre la cual influye la Luna tenga una masa igual á  $\frac{1}{4.160,000,000}$

de la masa total de la Tierra, ó sea el equivalente de una capa de agua de un metro de espesor que descansara sobre una base circular de 675 kilómetros de radio; semejante capa, aplicada sobre la superficie del globo terráqueo,

ocuparía en él una anchura de unos 12 grados del ecuador. Pues bien, las protuberancias de las mareas son comparables á esta masa.

¿A cuánto asciende el retraso del movimiento de rotación de la Tierra producido por la acción de la Luna en las protuberancias de las mareas? Según los cálculos de Delaunay, á *un segundo* en el espacio de 100,000 años. De suerte que en mil siglos la duración del día sidéreo no aumenta más que la 86,400.<sup>a</sup> parte de su valor. Si el retraso fuese uniforme é indefinido, para llegar á duplicar la duración del día sidéreo sería menester que transcurriesen 8,640 millones de años. ¿En qué época ocurrirá la detención completa?

Debemos decir que esta detención completa del movimiento de rotación de la Tierra es imposible por muchas razones. Desde luego, cuando la velocidad de rotación de nuestro globo quede reducida, á causa de esta disminución progresiva, hasta el punto de ser igual al movimiento de la Luna en su órbita, es decir, cuando la duración del día sidéreo llegue á ser unas 27 veces mayor, entonces nuestro globo seguirá presentando

(1) Dase en mecánica el nombre de *par* á todo sistema de dos fuerzas iguales y contrarias que obran en los extremos de una misma línea recta

á la Luna un mismo hemisferio. Las protuberancias líquidas de las mareas, vueltas siempre hacia nuestro satélite, no tendrán ya el movimiento progresivo que ocasiona actualmente la rotación. Desde el momento, pues, en que cesara la causa del retraso, permanecería constante la duración del día sidéreo.

Delaunay indica otra razón de la imposibilidad de la detención completa: “A medida que transcurre el tiempo, dice, y se requiere un gran número de siglos para que se realicen las circunstancias de que acabamos de hablar, la temperatura de la Tierra va disminuyendo. Las aguas del mar acabarán por congelarse, y desde el momento en que el Océano se haya convertido en hielo, dejará de existir el fenómeno de las mareas, desaparecerá la causa del retraso del movimiento de rotación, y la Tierra seguirá entonces girando con velocidad constante.”

Añadamos para terminar que si el aumento de duración del día sidéreo está establecido por la teoría, como parece estarlo por las observaciones, las anteriores cifras no marcan sino aproximadamente su valor; su determinación exacta sólo puede ser obra del tiempo.

## CAPÍTULO VII

### MASAS DE LOS CUERPOS CELESTES

#### I.

#### AVERIGUACIÓN DE LAS MASAS COMPARADAS DEL SOL Y DE LA TIERRA

Francisco Arago se expresa en los siguientes términos al principio del tomo cuarto de su *Astronomía popular*, consagrado en parte á la atracción universal:

“De cuantos resultados enaltecen á la astronomía moderna, no hay ninguno que llame más la atención de las personas extrañas á las leyes de la mecánica que la averiguación de la masa de los astros: así es que cuando un profesor encargado de analizar las maravillas del firmamento ante un auditorio poco instruído, comete la falta de citar al principio de una lección los valores numéricos de las masas planetarias; si, por ejemplo, dice que va á probar que el Sol, puesto en el platillo de una balanza y sometido al poder atractivo de la Tierra, necesitaría para estar equilibrado 354,936 globos como el nuestro, amontonados en el otro platillo, apodérase del auditorio un vivo sentimiento de incredulidad, y si éste sigue escuchando al profesor, es sólo para juzgar de su habilidad en desarrollar un sofisma.”

No sabemos si entre las personas que compusieran el auditorio hipotético de que habla Arago la incredulidad sería tan general como él supone. Pero de seguro que entre los que, dando fe á la ciencia, admitieran el resultado enunciado, serían en muy reducido número los que, á no preceder cierta iniciación en las ciencias físicas y matemáticas, se hallasen en estado de comprender la posibilidad de semejante demostración. Esta es una dificultad que no tiene nada de sorprendente, y con la que se suele tropezar en otras muchas cuestiones científicas.

En el punto á que hemos llegado en la exposición de los fenómenos y de las leyes de la gravitación, no nos sería difícil hacer ver cómo se puede resolver el problema,

siquiera no empleásemos para ello el rigor con que han procedido los geómetras para calcular las masas de los cuerpos celestes.

Según la teoría newtoniana, la atracción se ejerce entre dos moléculas materiales, en razón directa de sus masas é inversa del cuadrado de sus distancias. La misma ley rige para el Sol y los planetas, porque, conforme lo ha demostrado Newton, las esferas obran en los puntos exteriores del mismo modo que si las masas de todas las moléculas de que se componen estuviesen reunidas en sus centros.

Es por lo tanto obvio que si se pudieran medir las atracciones de dos cuerpos celestes, por ejemplo del Sol y de un planeta, sobre un mismo cuerpo, estas atracciones, ó sus efectos, reducidos á una misma distancia, tendrían las mismas relaciones que las masas de los dos cuerpos, y así se resolvería el problema planteado.

Pero ¿cómo se podrá medir la atracción de un astro sobre otro? Sábese en mecánica que la medida de una fuerza constante, como la de la gravitación, no es otra cosa que la aceleración, es decir, ora la velocidad adquirida por el cuerpo en el cual obra la fuerza al cabo de la unidad de tiempo ó de un segundo; ora (lo que es lo mismo) el doble del espacio recorrido durante esta unidad de tiempo. Hemos visto que así es cómo se procede para medir la gravedad en la superficie de la Tierra. Merced á este mismo método de comparación pudo Newton reconocer la identidad de la gravedad terrestre y de la fuerza que hace gravitar á la Luna alrededor de la Tierra. Partamos, pues, de estos principios para ver cuál es la masa de la Tierra comparada con la del Sol.

Empecemos por determinar la acción de la masa del Sol, para lo cual nos valdremos del método que nos ha servido anteriormente para calcular la caída de la Luna hacia la Tierra. La Tierra gravita alrededor del Sol; la órbita que describe en un año sidéreo, y cuyas dimensiones conocemos, nos permitirá calcular cuál es la atracción solar y cuánto cae la Tierra en un segundo de tiempo hacia el centro del Sol á consecuencia de dicha atracción. Para ello basta valuar en metros la longitud de la órbita y dividir la cifra encontrada por la de los segundos del año sidéreo: el cociente será el arco descrito en un segundo por nuestro globo en la época de su distancia media al Sol. Una relación de geometría bien conocida permitirá en seguida deducir la cifra que representa la caída de la Tierra en un segundo. Pues bien, hechos todos los cálculos, se ve que la atracción del Sol hace caer á la Tierra hacia dicho astro  $0^m,002937$  en cada segundo de tiempo.

Tenemos ya uno de los elementos de la cuestión. Ahora es preciso conocer la atracción de la Tierra sobre un punto material situado á la misma distancia. Sabemos que la caída de un cuerpo grave en el vacío es en París de  $4^m,9047$  por segundo; mas, para que el resultado sea aplicable á un punto exterior, es preciso considerar á nuestro globo como si fuese esférico y toda su masa aplicada al centro de la esfera, y corregir la acción de la gravedad teniendo en cuenta la que procede de la fuerza centrífuga. Demuéstrase que esto equivale á tomar el valor de la caída de los graves en un punto que tuviera por latitud  $35^{\circ} 16'$  y cuya distancia al centro de la Tierra sea igual á 6.364,551 metros (1). En dicho punto la medida de la atracción terrestre es igual al número 9,81645, lo que equivale á decir que, durante el primer segundo de la caída de un cuerpo en el vacío, el espacio recorrido es de unos  $4^m,9082$ .

¿Qué espacio sería éste á la distancia del Sol? Para responder á esta pregunta, basta

(1) Es un paralelo que pasa algo al Sur de Tánger, Orán, Mostagán y Melilla.

recordar que la intensidad de la atracción decrece en razón inversa del cuadrado de la distancia. De un cálculo muy sencillo resulta  $0^m,000000090445$  para la caída en un segundo hacia la Tierra de un cuerpo situado á la distancia media del Sol.

Al llegar aquí, sólo nos resta tomar la relación de los números  $0^m,002937$  y  $0^m,000000090445$  (el primero de los cuales representa la atracción solar y el segundo la terrestre) para deducir la relación de la masa del Sol con la de la Tierra: la división da 324.740.

La masa del Sol equivale, pues, á 324,740 veces la de nuestro globo. A causa de la incertidumbre de los datos, es preferible decir que está comprendida, en números redondos, entre 324,000 y 325,000 veces la masa de la Tierra.

## II

### MASAS DE LA LUNA Y DE LOS PLANETAS

Tenemos ya pesado el Sol, tomando la Tierra por unidad de peso, ó más bien de masa. Vese que el resultado del método adoptado se basa en el conocimiento de las magnitudes relativas del radio del globo terráqueo y del radio medio de la órbita, por una parte; por otra, en el resultado de las observaciones que han permitido averiguar la longitud del año sidéreo; y finalmente, en el conocimiento práctico de la intensidad de la gravedad en la superficie de nuestro globo, intensidad medida por el espacio que los cuerpos graves recorren en un segundo de caída.

Los mismos datos, excepto el último, existen con relación á todos los planetas del sistema solar. El cálculo de sus masas requiere, pues, que se supla de algún modo esta insuficiencia, cosa fácil respecto de todos los planetas que tienen satélites. En efecto, conocidas la dimensión y la duración de las órbitas de estos satélites, es llano calcular la acción de la gravedad del planeta sobre su satélite, su caída hacia él en un segundo de tiempo, como se ha hecho con la Tierra relativamente al Sol.

Así lo hizo Newton con respecto á Júpiter y Saturno, tan luego como hubo confirmado su gran descubrimiento de la gravitación. Averiguó que la masa de Júpiter era la 1067.<sup>a</sup> parte de la del Sol y la de Saturno la 2413.<sup>a</sup> Las observaciones más exactas hechas actualmente han dado cifras diferentes, pero el principio de su cálculo sigue siendo el mismo.

Los planetas que tienen satélites son: Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, es decir, todo el grupo de grandes planetas, por una parte, y además la Tierra y Marte. En cuanto á los que carecen de satélites, como Mercurio, Venus y el innumerable grupo de los planetas telescópicos, no ha sido posible determinar sus masas por el método de que hemos tratado anteriormente. Pero las perturbaciones á que están sometidas dependen de la influencia recíproca de estas masas, y las teorías de la mecánica celeste permiten calcular aproximadamente sus valores, cuando se introducen en las fórmulas los datos de las observaciones (1).

(1) Hace pocos años se creía que Marte no tenía satélites, y se había calculado su masa por el método de las perturbaciones, siendo su acción particularmente sensible en nuestro planeta. Los cálculos de Le Verrier habían asignado á su masa  $\frac{1}{3.000.000}$  de la del Sol. Pero merced al descubrimiento y la observación de sus dos satélites, hechos por el astrónomo americano A. Hall, se ha podido emplear el primer método. M. Simón Newcomb ha deducido también  $\frac{1}{3.090.000}$ , es decir, la cifra dada por Le Verrier, en el límite de las aproximaciones compatibles con las observaciones y los cálculos astronómicos.

Por lo que hace á la Luna, también se ha calculado su masa basándose en sus efectos perturbadores sobre nuestro globo. Ya hemos visto que esta masa produce en la posición del eje de la Tierra el balanceo periódico llamado *nutación*, y también es ella la que, juntamente con la masa del Sol, ocasiona los fenómenos de las mareas. La primera de estas perturbaciones tiene por causa la Luna sola, siendo independiente de la acción del Sol. La segunda es una combinación de las acciones del Sol y de la Luna sobre las aguas del mar, como ya hemos dicho, pero se ha podido averiguar la relación que hay entre ambas fuerzas, y ya es sabido que la fuerza de la Luna es 2,1673 veces la del Sol. Por otra parte, la teoría demuestra que las fuerzas atractivas se hallan en este caso en razón de las masas é inversa de los cubos de las distancias, lo cual, puesto que son conocidas las distancias del Sol y de la Luna á la Tierra, permite averiguar las relaciones de las masas.

Merced á estos diferentes métodos, se ha llegado á calcular la masa de la Luna con precisión cada vez mayor, á medida que se han ido perfeccionando las teorías y las observaciones. La cifra adoptada hoy es  $\frac{1}{81,5}$ , tomando la masa de la Tierra por unidad; y por consiguiente, se necesitarían más de 81 globos semejantes á nuestro satélite para equilibrar el globo terráqueo, y 26.500,000 para igualar la masa del Sol.

Los astrónomos han llevado todavía más adelante sus indagaciones sobre las masas de los cuerpos celestes; han procurado averiguar las de los satélites de Júpiter, valiéndose de procedimientos análogos á los que acabamos de exponer, esto es, basándose al efecto en las perturbaciones que se han podido observar con seguridad en los movimientos de esos pequeños cuerpos.

El resumen de tan importantes averiguaciones se halla en el cuadro siguiente, que comprende: 1.º las masas de los planetas comparadas con la del Sol; 2.º las mismas masas, tomando la de la Tierra por unidad; 3.º las densidades de los planetas y del Sol; 4.º por último, la intensidad de la gravedad en su superficie. Fáltanos ahora decir cómo se deducen de los otros estos dos últimos elementos, ó sean la densidad y la intensidad de la gravedad. Procuremos explicarlo en pocas palabras.

Veamos, por ejemplo, cuál debe ser la densidad del Sol comparada con la de la Tierra, sobrentendiéndose que aquí tratamos de la densidad media, es decir, de la que tendrían uno y otro cuerpo si toda la materia de que cada cual está formado se hallase distribuída con uniformidad en su volumen, en una palabra, si cada uno de ellos fuese homogéneo.

Sea 1 la densidad de la Tierra. Siendo la masa del Sol 324,500 en números redondos, su densidad equivaldría á 324,500 veces la de nuestro globo, si el volumen del Sol no fuese mayor que el de la Tierra. Pero como su diámetro es 108,556 veces el diámetro terrestre, su volumen es  $(108,556)^3$  ó unas 1.279,000 veces tan considerable

como el de la Tierra. Así pues, en lugar de ser la densidad del Sol 324,500, es  $\frac{324,500}{1,279,000}$ ; y este cociente 0,253. Vese por esto que la densidad se obtiene dividiendo la masa por el volumen; resultado que, á decir verdad, se deduce inmediatamente de las definiciones de la densidad y de la masa, pudiendo aplicarse á todos los cuerpos celestes cuya masa, distancia y diámetro se conocen, y por consiguiente á todos los planetas principales del sistema.

Con la misma facilidad puede calcularse la intensidad de la gravedad en cada uno de estos cuerpos, así como en el Sol. Ya hemos visto cómo se deduce la masa, esto es,

averiguando la caída de un cuerpo en un segundo á una distancia determinada. Bastará hacer el mismo cálculo tomando por distancia la de la superficie del astro al centro, es decir, una distancia igual al radio del cuerpo considerado como si fuera esférico. Por lo demás, se ve en general que la intensidad de la gravedad en la superficie de los cuerpos celestes es proporcional á las masas é inversa á los cuadrados de los radios, ley general de la gravitación.

Un cuerpo grave es atraído por la gravedad á la superficie del Sol con una energía que excede 27 veces (exactamente 27,5) á la que ejerce la Tierra sobre un cuerpo situado del mismo modo en la superficie de nuestro globo. Así por ejemplo, un cuerpo que cayera en la superficie del Sol, abandonado á sí mismo en el vacío al cabo de un segundo de caída, adquiriría una velocidad de 270 metros, después de recorrer en el primer segundo un espacio de 135 metros. El cuadro siguiente marca la intensidad de la gravedad en la superficie de cada planeta principal y también en la de nuestro satélite:

MASAS, DENSIDADES Y GRAVEDAD EN LA SUPERFICIE DE LOS CUERPOS DEL SISTEMA PLANETARIO

Nombres de los astros	MASAS	MASAS	DENSIDADES		GRAVEDAD Tierra = 1
	Sol = 1	Tierra = 1	Agua = 1	Tierra = 1	
Sol . . . . .	1	324.479	1,407	0,253	27,474
Mercurio. . . . .	$\frac{1}{4,348,000}$	0,075	7,650	1,376	0,521
Venus. . . . .	$\frac{1}{412,150}$	0,787	5,032	0,905	0,864
Tierra. . . . .	$\frac{1}{324,479}$	1 000	5,560	1,000	1,000
Luna. . . . .	$\frac{1}{26,500,000}$	0,012	3,37	0,602	0,164
Marte. . . . .	$\frac{1}{3,000,000}$	0,109	3,970	0,714	0,382
Júpiter. . . . .	$\frac{1}{1,050}$	309 028	1,312	0,236	2 581
Saturno. . . . .	$\frac{1}{3,530}$	91,931	0,672	0,121	1,104
Urano. . . . .	$\frac{1}{20,574}$	15,771	1,162	0,209	0 883
Neptuno. . . . .	$\frac{1}{17,500}$	18 542	1,201	0,216	0,953

MASAS DE LOS SATÉLITES DE JÚPITER

	LA MASA de la Tierra = 1	LA MASA de Júpiter = 1	LA MASA de la Luna = 1
I.	0,00535	0,000017328	0,4364
II.	0,00716	0,000023235	0,5838
III.	0,02735	0,000088497	2,2880
IV.	0,01318	0,000042659	1,0745

Todas las cifras que en el cuadro precedente sirven para valuar las masas de los cuerpos celestes de nuestro sistema están en relación, ya con la masa del cuerpo cen-

tral, ó bien con la de nuestro globo, lo cual basta para los problemas de mecánica celeste que se les ofrezca resolver á los astrónomos. Mas, por curiosidad, se pueden transformar todos estos números en kilogramos, por ejemplo, ó en toneladas de 1,000 kilogramos, comparándolos á las masas ó á los pesos de los cuerpos terrestres.

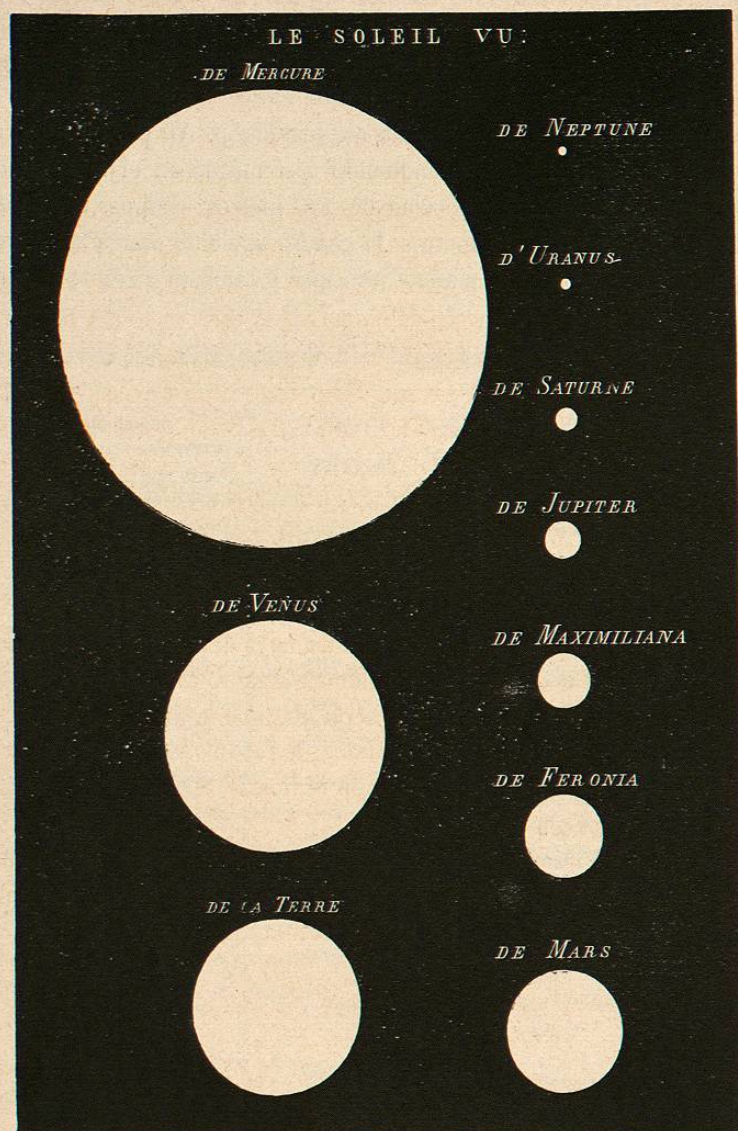


Fig. 135.—El Sol visto desde los principales planetas; comparación de sus dimensiones aparentes

En efecto, conociéndose la densidad media de la materia que forma la Tierra, se puede calcular en kilogramos el peso de nuestro globo. Debe entenderse por este peso la suma total de las pesas que habría que poner en un platillo de la balanza si fuese posible poner en el otro, partícula por partícula, toda esta materia en las condiciones que hemos tenido ocasión de especificar. Ya hemos visto que este peso excedería de 6,000.000,000,000,000 de toneladas.

El peso de la Luna resultaría ser de 72.000,000,000,000 de toneladas, y el del Sol de 1,899.000,000,000,000,000,000,000 de toneladas!

En vano se esforzaría la imaginación por formarse una idea de lo que son semejantes cantidades, las cuales, sobre todo la última, no ofrecen más que un interés, el de hacer patente la enormidad de las masas de los astros cuando se las compara con las de los objetos que nos son familiares.

Es más instructivo comparar la masa del Sol con las masas reunidas de todos los planetas que gravitan en torno suyo obligados á ello por la potencia de su fuerza atractiva. Entonces se ve que esta masa equivale á 740 veces próximamente la de todas las masas planetarias.

No es menos interesante comparar las densidades respectivas de los globos de los planetas y del Sol. Ante todo conviene observar que los cuatro planetas más próximos al astro solar, los más recientemente formados, son también los más densos; al paso que el grupo de los grandes planetas, de Júpiter á Neptuno, se caracteriza por una densidad notablemente menor, inferior á la cuarta parte de la densidad de los primeros. Por lo que hace á la densidad del Sol, excede un poco á la de los grandes planetas. Si éstos se han formado, como la teoría cosmogónica de Laplace lo supone, por el abandono y la condensación de las zonas nebulosas que formaron en un principio la atmósfera del núcleo solar, compréndese que los más distantes estén compuestos de las materias menos densas, las cuales son las que han dado origen á los planetas más antiguos y más grandes del sistema: los más inmediatos al Sol, formados de las zonas más bajas y pesadas, debieron de producir los planetas más densos, como así es en efecto.

Supongamos que toda la materia del Sol, de los planetas y de sus satélites estuviese uniformemente diseminada por el espacio esférico que abarca la órbita de Neptuno; el resultado sería una nebulosa gaseosa homogénea, cuya densidad es fácil calcular. Como la esfera de semejante radio sería de un volumen igual á 300,000 billones de veces el volumen terrestre, la densidad buscada no sería más que la media billonésima parte de la densidad del agua. La nebulosa solar dilatada de tal suerte sería 400 millones de veces menos densa que el hidrógeno á la presión ordinaria, el cual es, como nadie ignora, el más ligero de todos los gases conocidos.

Así pues, la teoría de la gravitación proporciona á la astronomía física muchos datos que arrojan cierta luz, no tan sólo sobre la constitución íntima de los globos, sino también sobre el carácter de la agrupación de la materia primitiva.

### III

#### DESCUBRIMIENTO DE NEPTUNO. — LOS VULCANOS

Si la teoría de la gravitación, al facilitar á los geómetras la evaluación de las masas de los cuerpos celestes, de sus densidades y de la gravedad en su superficie, tiene consecuencias de gran interés para las cuestiones de física astronómica, tiene otras mucho más importantes en lo que se refiere á la astronomía planetaria, esto es, desde el punto de vista del perfeccionamiento de las teorías y de las tablas que representan todas las circunstancias de los movimientos de los cuerpos del sistema. Las masas planetarias son elementos indispensables de estas teorías, y por consiguiente, determinar dichos elementos con mayor precisión es un progreso que influye en el resto de la ciencia. Cuando en diciembre de 1874 se trasladaron á varios puntos numerosas comisiones científicas con objeto de observar el paso de Venus, del cual se dedujo la paralaje del Sol, y por consiguiente la distancia de la Tierra á este astro, no preocupaba tanto á los astrónomos