

punto, la Tierra se apoyaba en el aire que llenaba el espacio, y era llevada por él. No hay nada de esto, sino que, por el contrario, es la Atmósfera la sustentada por el globo, el cual se halla á su vez sostenido en la inmensidad por la potencia invisible de la gravitacion universal.

Así pues, la superficie exterior de la Atmósfera es curva, como la del mar; porque, lo mismo que el agua, el aire tiende sin cesar á nivelarse, á colocarse á igual distancia del centro. Á los principiantes en el estudio de la geometría les parece difícil conciliar la idea de superficie esférica con la de nivel: la de que el aire tiene un nivel horizontal como el agua, y que, semejante á un océano aéreo, este nivel tiende sin cesar á equilibrarse, parece desde luego un poco oscura; y sin embargo, no tan solo posee el aire las cualidades de elasticidad y de movilidad en un grado ilimitado, sino que también es sumamente compresible, y proporcionalmente susceptible de una extraordinaria expansion.— Estos son hechos que se deben tener siempre presentes, porque ayudarán á comprender un gran número de

propiedades atmosféricas especificadas en los capítulos siguientes.

¿Cuál es el espesor de esa capa gaseosa que envuelve á nuestro globo de 3,000 leguas de diámetro? Á medida que se eleva, el aire se enrarece cada vez mas, y al llegar á las últimas capas, nada pesa sobre ellas; sin embargo, como la Atmósfera es limitada, es preciso que estas capas no se pierdan en el espacio, y que, dado su enrarecimiento, y el gran descenso de su temperatura, se modifique su estado físico de suerte que la fuerza elástica sea nula. Laplace ha indicado esta condicion indispensable; Poisson la ha especificado, demostrando que todavía sería posible el equilibrio con una densidad limitada muy considerable, con tal que el fluido no fuese expansible, y por último, J. B. Biot, reasumiendo estas condiciones, indica muy bien el estado de las últimas capas atmosféricas no expansibles diciendo que deben ser como «un líquido no evaporable.»—Vamos á examinar en el capítulo siguiente las condiciones mecánicas y físicas de dicha cubierta aérea, á apreciar su forma exterior, y á medir su altura.

### CAPÍTULO III

#### ALTURA DE LA ATMÓSFERA

FORMA DE LA CUBIERTA AÉREA ALREDEDOR DE LA TIERRA;  
SUS CONDICIONES; SU ORIGEN.

Puesto que la Tierra, astro rápido, marcha por la inmensidad, impelida por una velocidad vertiginosa, y llevando adherida á su superficie la capa gaseosa que la ciñe, resulta de aquí que esta capa no se extiende por el infinito en la inmensidad, sino que termina á cierta distancia de la superficie.

¿Hasta qué distancia puede extenderse? Arrastrándola la rotacion del globo en su movimiento diurno, podemos observar desde luego que á cierta altura del suelo el movimiento de la atmósfera es tan rápido que la fuerza centrífuga desarrollada por él lanzaría al espacio las moléculas de aire exteriores, que cesarian de ser adherentes, y por lo tanto, de continuar formando la atmósfera.

Ciertos inventores de aparatos de navegacion aérea han supuesto vagamente que la atmósfera no gira del todo con la Tierra, que elevándose á cierta altura verian al globo rodar á sus piés, y que por lo tanto no tenian mas que esperar á que el meridiano donde se quisiera descender pasara por debajo de la navecilla para encontrarse trasportado á él merced á la rotacion del globo.

En la exposicion de esta hipotesis va en-

vuelta ya su refutacion. Todo cuanto circunda á la Tierra le está sometido. La Luna misma, á pesar de hallarse á 96,000 leguas de distancia, circula en torno nuestro en el sentido de nuestra propia rotacion, aunque con menor velocidad, en razon de su existencia individual, de su peso relativo y de su distancia.

La fuerza centrífuga aumenta en razon del cuadrado de la velocidad. En el ecuador es la 289.<sup>a</sup> parte de la gravedad. Luego (observacion curiosa) si la Tierra girase 17 veces mas de prisa, como  $17 \times 17 = 289$ , los cuerpos no pesarian nada en el ecuador; una piedra, un objeto, separado del suelo por la mano, no volveria á caer en él. Los cuerpos adquiririan tal lijereza, que el que danzara en la superficie se pareceria á esos silfos aéreos impelidos por el viento. Siendo las circunferencias entre si como los radios, resulta que á una distancia 17 veces mayor que la que hay desde la superficie al centro de la Tierra, ó sea á 25,500 leguas de altura, y en igualdad de condiciones, la Atmósfera no podrá ya subsistir; pero por otra parte, hay que tener en cuenta que la gravedad disminuye á medida que el centro de atraccion está mas apartado,

Combinando esta disminucion con el aumento de la fuerza centrífuga, he calculado que la atraccion se equilibra con la gravedad á unas 6 veces y media (6,64) el radio del globo, es decir, á 10,000 leguas sobre la superficie de la Tierra, y que por consiguiente las moléculas aéreas que pudieran hallarse todavia en esos espacios, deben es-

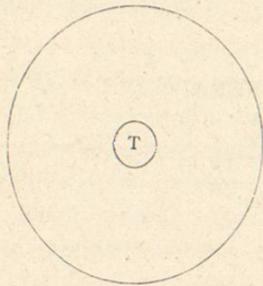


Fig. 5. — LÍMITE TEÓRICO MÁXIMO DE LA ATMÓSFERA

caparse forzosamente. Esa es la distancia á que gravitaria un satélite precisamente en  $23^{\text{h}}56^{\text{m}}$ , duracion de la rotacion de nuestro planeta. Ese es el *límite teórico máximo* de la Atmósfera, la cual está muy lejos de extenderse hasta semejante distancia, como vamos á verlo, aun cuando matemáticamente podria hacerlo, y sólo al llegar á ella la fuerza centrífuga seria bastante grande para oponerse á la existencia de una atmósfera.

Tal vez en esas regiones elevadas, en los mismos limites de las esferas de atraccion de los astros, sus moléculas gaseosas sufran algun cambio. Tal es el límite extremo máximo de la Atmósfera; pero el fluido respirable para el hombre concluye á una altura incomparablemente menor. Á la de 3,300 metros, hasta la cual me he remontado varias veces en globo y que es la del Etna, alcanza cerca de la tercera parte de la masa aérea; á 5,500 metros, sobre la cual ostentan sus erguidas cumbres bastantes montañas, la columna de aire que pesa sobre el suelo ha perdido ya la mitad de su peso; por consiguiente, todo el resto de la masa gaseosa que se estiende á lo lejos por

el cielo hasta desmesuradas distancias, es simplemente igual á las capas aéreas comprimidas bajo ella en las regiones inferiores.

En virtud de estas fuerzas, la forma de la Atmósfera no es precisamente esférica, sino henchida en el ecuador, donde tiene mayor elevacion que en los polos. Es tal la figura de la atmósfera de los cuerpos celestes que la resultante de la fuerza centrífuga y de la fuerza centripeta viene á ser perpendicular á ella. Laplace ha fijado el límite máximo de dicha figura, en el caso de su mayor aplanamiento; el diámetro de la Atmósfera en el sentido del ecuador es una tercera parte mas grande que el diámetro en el sentido de los polos. Es la *línea matemática* hácia la cual tiende la atmósfera terrestre; pero no tiene esa forma exagerada, aunque en realidad sea sensiblemente mas densa en el ecuador que en los polos. Para completar esta figura, añadiré que en la traslacion rápida del globo al rededor del Sol, queda en pos de él una pequeña ráfaga de gases lijeros. Por último, estas formas cambian tambien á causa de las mareas at-

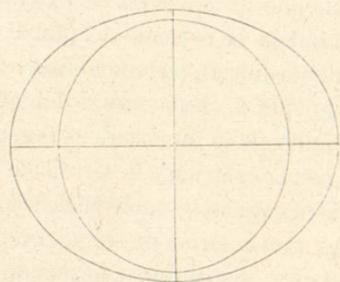


Fig. 6. — LÍNEA MATEMÁTICA DE LA FIGURA DE LA ATMÓSFERA

mosféricas, debidas á la atraccion variable de la Luna y del Sol.

El peso decreciente de las capas atmosféricas nos ofrece el primer procedimiento para calcular un límite mínimo de la altura de la Atmósfera; y así como la mecánica nos acaba de presentar un límite máximo, del mismo modo nos servirá ahora la física para deducir aquel.

Cada molécula de aire ejerce, en virtud

de su peso, una presion sobre las que se hallan colocadas debajo de ella, presion que va agregándose de arriba abajo al peso de cada capa sucesiva, y que, combinándose con la accion del globo terrestre, contribuye á retenerlas en torno de él. En una columna de aire vertical, encuéntrase cerca del suelo las capas mas densas: esta densidad disminuye á medida que uno se eleva, porque la porcion de atmósfera situada debajo del observador no ejerce ya ninguna presion sobre las colocadas á su nivel. El barómetro que mide esta presion se mantiene mas bajo en la cumbre que al pié de una montaña, siendo tan íntima la relacion que existe entre la presion y la altura, que de la diferencia de longitud de las columnas barométricas observadas simultáneamente en dos puntos distintos puede deducirse la diferencia de nivel de ambos.

Cuanto mas disminuye la presion, mas tiende el aire á dilatarse, por lo cual podria sospecharse á primera vista que la Atmósfera debe extenderse á una gran distancia.

Un fisico célebre, Mariotte, ha procurado determinar la ley de la compresion de los gases, y ha averiguado que la cantidad de aire contenida en el mismo volumen, ó en otros términos, la densidad del aire, es proporcional á la presion soportada. En los cursos de física se enseña esta relacion con el nombre de *ley de Mariotte*. Hasta estos últimos años se ha considerado como perfectamente exacta; pero se tropezaba con enormes dificultades para concebir la causa de que la Atmósfera no se extienda muy lejos en el espacio, cuando otras consideraciones indican que es necesariamente limitada y cesa á corta distancia del suelo.

Sin embargo, esta contradiccion aparente era el resultado de haber generalizado con exceso la ley de Mariotte, que en lugar de ser rigurosa, es simplemente aproximada.—M. Regnault ha estudiado las diferencias reales que existen entre la ley teórica y los hechos.

En vista de esta comprobacion, mi an-

tiguo colega del Observatorio de París, M. Emmanuel Liais, ha introducido pequeñas burbujas de aire en un gran vacío barométrico, de una forma especial, y ha observado que las diferencias entre los datos de la observacion y la teoría generalmente adoptada son mucho mayores aun. Disminuyendo sucesivamente la cantidad de aire, se llega á encontrar un límite en el que las partículas, lejos de rechazarse como sucederia si los gases fuesen dilatables hasta el infinito, parece, por el contrario, que adquieren entre sí una adherencia semejante á la de las moléculas de un liquido viscoso. La elasticidad del aire que produce la expansion cesa, pues, á cierto grado de dilatacion, á partir del cual este gas viene á ser como un liquido cualquiera, pero un liquido incomparablemente mas lijero que todos cuantos conocemos.

En virtud del decrecimiento observado en la densidad del aire á medida que se eleva, examinando bajo este punto de vista especial las condiciones físicas del equilibrio, y tomando por elementos tres series de observaciones barométricas, termométricas é higrométricas hechas á diferentes altitudes por Gay-Lussac, Humboldt y Boussingault, J. B. Biot ha demostrado que la altura mínima de la Atmósfera es de 47,800 metros, ó unas 12 leguas. Allí debe de estar el aire tan enrarecido como bajo la campana de nuestras máquinas neumáticas despues de hecho el vacío,—vacío relativo, puesto que no podemos obtenerle absoluto.

Así pues, la altura mínima de la Atmósfera es de 12 leguas, y su máximo de 10,000. Hé aqui dos límites ciertos, però bastante separados entre sí. ¿No existen otros métodos para aproximarse aun mas á la realidad?

En efecto, se ha procurado medir ópticamente la altura de la Atmósfera estudiando la duracion de los crepúsculos, y el tiempo que los rayos solares continúan reflejándose en las regiones aéreas despues de haber traspuesto el horizonte el astro mismo.

Si la atmósfera terrestre fuese ilimitada, desconoceríamos enteramente el fenómeno de la noche: al herir la luz del Sol las capas de aire suficientemente alejadas de la Tierra, podríamos recibirla por la reflexión que estas capas la harían experimentar. Por otra parte, la carencia de toda cubierta aérea tendría por resultado el darnos una noche que se sucedería bruscamente al ocaso del Sol, y la luz del día se ostentaría en todo su esplendor en el momento mismo de su salida. Pues bien, todo el mundo sabe que el crepúsculo de la tarde y el de la mañana prolongan la duración del tiempo en que la luz solar nos ilumina; y por lo tanto se concibe que la observación de estos fenómenos ha debido inspirar desde luego la idea de buscar en ellos la medida de la altura de la Atmósfera.

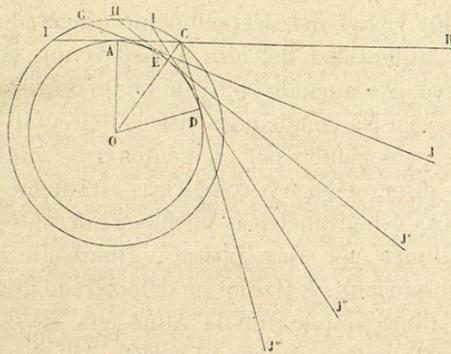


Fig. 7.—MEDIDA DE LA ALTURA DE LA ATMOSFERA POR LA DURACION DEL CREPUSCULO

Supongamos que la Tierra esté representada por el círculo de radio OA, y limitada su atmósfera por la circunferencia FGHIC. Es evidente que cuando el Sol haya traspuesto el horizonte FACB del punto A, no iluminará más que una porción de la Atmósfera: por consiguiente, cuando el Sol esté en J, si imaginamos un cono tangente á la Tierra y que tenga el Sol por vértice, todas las partes de la Atmósfera situadas debajo de JG cesarán de estar iluminadas para el observador colocado en A, y solo lo estará aun la parte CIHG. Mas tarde, cuando el Sol se halle en J', solo aparecerá ilu-

minada la parte CIH; luego, la parte CI; y por último, cuando dicho astro llegue á J'', sobre la parte tangente motivada por la intersección FACB con la circunferencia limitada de la Atmósfera, cesará el crepúsculo. Por lo tanto, cuando el Sol se ha puesto, se debe ver aparecer en el lado opuesto á su ocaso una especie de arco, que se eleva cada vez más, alcanza el zénit, y se amortigua después hasta desaparecer del todo. Tal es la teoría que de los fenómenos crepusculares habían concebido los astrónomos más antiguos. En la óptica de Alhasen (siglo décimo) vemos que el ángulo de descenso del Sol hacia el fin del crepúsculo ó el principio de la aurora es de  $18^\circ$ , valor que aun hoy día adoptan los astrónomos modernos como término medio.

Difícilmente se vé en nuestros climas con claridad el límite de separación entre la parte de la atmósfera iluminada por el Sol y la que no recibe sus rayos directos. Pero Lacaille ha comprobado en su viaje al Cabo de Buena Esperanza todas las fases que, en virtud de esta teoría, acabamos de indicar. «En los días 16 y 17 de Abril de 1751, dice, estando el mar en calma, con un cielo sumamente claro y sereno, que me permitía divisar á Venus en el horizonte como una estrella de segunda magnitud, ví la luz crepuscular terminada en arco de círculo, tan regularmente como era posible. Habiendo puesto mi reloj en la hora verdadera, al ocultarse el Sol, ví dicho arco confundido con el horizonte, y calculé por la hora en que hice esta observación, que el Sol había bajado el 16 de Abril  $16^\circ 38'$ , y el 17,  $17^\circ 13'$ .»

Posteriormente se han hecho otras observaciones, como más adelante veremos.

Compréndese que conociendo el círculo diurno aparente descrito por el Sol en un día dado y la posición del observador en la Tierra, sea posible calcular, por el tiempo transcurrido entre la hora del ocaso y la de la desaparición del arco crepuscular, el ángulo recorrido por el astro radiante sobre el horizonte. Compréndese también que

según los puntos y las estaciones, resulte una duración diferente para el crepúsculo ó la aurora, pues el alejamiento más ó menos grande del Sol y el estado del aire deben influir en la dirección y en la cantidad de luz que, después de múltiples reflexiones y refracciones, llega al observador.

En nuestro Libro segundo estudiaremos el crepúsculo; aquí sólo debemos ocuparnos de la relación que existe entre su duración y la altura de la Atmósfera.

Ahora bien; el tiempo durante el cual continúa el Sol iluminando directamente una parte visible de la Atmósfera de algún punto, después de traspasar el horizonte del mismo, depende del espesor de las capas aéreas que envuelven la Tierra. En efecto, supongamos que hacemos pasar un plano por el punto A de la figura que hemos trazado, por el centro O de la Tierra y por el centro del Sol; este plano dividirá á la Tierra con arreglo al círculo OA. Sea FAB la línea del horizonte del punto A en el mismo plano; por el punto de contacto C del círculo OA y de la línea AB, tracemos la tangente CD á la Tierra. Toda la parte de la Atmósfera visible desde A dejará de estar alumbrada por el Sol cuando este descienda en su movimiento diurno aparente, por debajo de CDJ''. Pero acabamos de ver que se deducía el término de la duración del crepúsculo, cuando el ángulo BCJ'' de descenso por debajo del horizonte era de  $18^\circ$ . Como el ángulo OAC es recto y OA el radio de la Tierra, concéñese ya un lado y los ángulos del triángulo OAC, y por consiguiente, pueden calcularse todos sus elementos. Así pues, considerando á OC como conocido, resulta que se tiene la altura EC de la Atmósfera, diferencia entre OC y el radio OE.

Tal es el método imaginado por Kepler para deducir de los fenómenos crepusculares la altura de la Atmósfera. Los resultados que con él se han obtenido concuerdan con los precedentes para atribuir á nuestra atmósfera, homogénea pero de densidad

decreciente, una altura de 12 á 15 leguas. Siendo el radio medio de la Tierra de 1,591 leguas se vé que dicha altura no es más que la 130ª parte de este radio, es decir, que si representáramos la Tierra por una esfera de 10 metros de diámetro, la Atmósfera se-

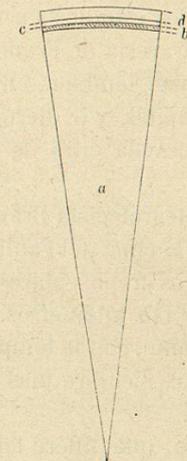


Fig. 8.—CORTE QUE DEMUESTRA EL ESPESOR RELATIVO DE LA COSTRAS TERRESTRE, DE NUESTRA ATMOSFERA Y DE OTRA SUPERIOR.

ría comparable á una capa de vapor adherente á la superficie de este globo, de 38 milímetros de espesor.

La figura 8 demuestra con exactitud esta relación, representando: 1.º el interior incandescente del globo a; 2.º la corteza sólida b, sobre la cual vivimos y edificamos nuestras ciudades; solamente tiene 12 leguas de espesor, como la Atmósfera, atendido á que en razón del aumento de temperatura observado, ó sea 1 grado por 33 metros, los metales se funden á dicha profundidad; 3.º el espesor de la capa aérea c, en la cual respiramos; y 4.º la altura probable de una atmósfera muy ligera d, sobrepuesta á la nuestra, y de la cual vamos á hablar.

Debo añadir, sin embargo, á propósito de la medida de la altura de la Atmósfera por la duración del crepúsculo, que ciertos observadores han obtenido como resultado de análogas investigaciones una elevación muy superior á la precedente, la cual demuestra que las 12 leguas no representan