$1^s - \frac{1^s}{5} = 0^s.8$. Por otra parte, para más sencillez puede hacerse uso de la pequeña tabla auxiliar que sigue, desde 1 hasta 15.

Arco.	Tiempo.	Arco.	Tiempo.	Arco.	Tiempo.	Arco.	Tiempo.	Arco.	Tiempo.	Arco.	Tiempo,
1′	4^s	6′	24^s	11′	44^s	1″	0^s 07	6″	0^s 40	11″	0^s 73
2	8	7	28	12	48	2	. 13	7	. 47	12	. 80
3	12	8	32	13	52	3	. 20	8	. 53	13	. 87
4	16	9	36	14	56	4	. 27	9	. 60	14	. 93
5	20	10	40	15	60	5	. 33	10	. 67	15	1. 00

CAPITULO III.

DE LA REFRACCIÓN ASTRONÓMICA.

135.—Se sabe que cuando un rayo luminoso pasa oblicuamente de un medio á otro de diversa densidad, se desvía de su dirección primitiva. Este fenómeno, conocido con el nombre de *refracción*, produciéndose en la masa de aire que rodea á la tierra, influye necesariamente en la posición de los astros haciéndonoslos ver en un lugar algo diferente del que ocupan en realidad. La desviación total que sufre el rayo luminoso que emite un astro se produciría de una sola vez al atravesar la atmósfera terrestre, si esta fuera de una densidad uniforme en toda su altura; pero teniendo una densidad decreciente desde la superficie de la tierra, podemos considerarla como compuesta de capas concéntricas, diversamente densas, en cuya hipótesis el rayo luminoso iría experimentando desviaciones parciales y formando, en sus distintas direcciones, una línea quebrada ó poligonal hasta llegar al observador. Atribuyendo á las capas un espesor sumamente pequeño, de manera que pueda suponerse que sus densidades tengan un decremento gradual y continuo, la línea poligonal formada por el rayo luminoso se convertirá en una curva, cuyo último elemento es el que recibe el observador, el cual refiere la dirección del astro á la de la tangente en ese punto de la curva.

Sea $A\,a$ (fig. 39ª) la dirección en que un rayo de luz, que parte de un astro A, entra en a á la atmósfera terrestre. Al atravesar la primera capa sufre la primera desviación, y encuentra á la segunda en b; en este punto vuelve á desviarse, formando el segundo elemento $b\,c$ de la curva; y así sucesivamente hasta el observador O, quien verá el astro en A', siendo $A\,O\,A'$ el efecto de la refracción. Para dar una idea del modo de calcularlo, recordemos las principales leyes á que está sujeto este fenómeno. La primera de ellas indica que el plano $O\,a\,C$ en que se encuentra el rayo después de refractado, coincide con el plano $C\,a\,A$ en que se hallaba antes de refractarse; y la segunda que el seno del ángulo $A\,a\,Z'$ de incidencia, guarda una relación constante con el del ángulo $C\,a\,b$ de refracción.

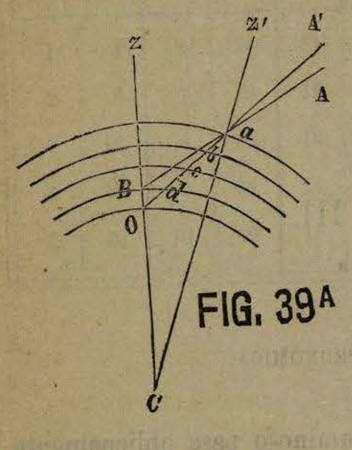

FIG. 39A

Por la primera ley se comprende que todo el efecto de la refracción se produce en el plano vertical determinado por el rayo incidente $A\,a$ y por la línea vertical $C\,Z$ del observador, ó lo que es lo mismo, que la refracción altera únicamente la distancia zenital sin producir variación en el azimut del astro. La alteración consiste en disminuir las distancias zenitales, por lo cual es preciso añadir á las que se observen el valor de la refracción.

Fundados en la segunda ley podremos calcular el valor aproximativo de la refracción, reflexionando para esto que la mayor parte de la desviación se produce en las capas más densas, que son las más inmediatas á la tierra; y que, en consecuencia, podremos admitir que la refracción sería sensiblemente la misma suponiendo que todo el fenómeno se verifica en a, admitiendo que este fuese un punto de una capa próxima á la tierra, y que el rayo refractado siguiese después una dirección rectilínea $a\,O$.

Designando por I el ángulo de incidencia $A\,a\,Z'$, por R el

de refracción $C\,a\,O$, y por n el índice de refracción del aire, tendremos:

$$\frac{\text{sen. } I}{\text{sen. } R} = n$$

Prolongando hasta B el rayo incidente, y llamando r el efecto de la refracción $B\,a\,O = A\,a\,A'$, se tiene además, $I = R + r$. Sustituyendo en la ecuación anterior, desarrollando y teniendo presente que, por ser r sólo de algunos minutos, se puede suponer $\cos. r = 1$ y $\text{sen. } r = r \text{ sen. } 1''$, resulta:

$$r = \frac{n-1}{\text{sen. } 1''} \tan. R$$

El ángulo $Z\,O\,A'$ es la distancia zenital *aparente*, ó afectada por la refracción; designándola por z', y por C el ángulo $Z\,C\,Z'$, se halla $R = z' - C$, con lo cual el valor de r será:

$$r = \frac{n-1}{\text{sen. } 1''} \tan. (z' - C)$$

Siempre que no es muy considerable la distancia zenital, el valor de C es pequeño, y podremos omitirlo para adoptar la fórmula aproximativa:

$$r - \frac{n-1}{\text{sen. } 1''} \tan. z'$$

la cual indica que las refracciones son proporcionales á las tangentes de las distancias zenitales aparentes. Introduciendo en ella el valor del coeficiente de refracción del aire, que es $n = 1.00028$, se encuentra:

$$r = 57''.8 \tan. z' \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

136.—La fórmula anterior suministra con suficiente exactitud las refracciones desde 0° hasta 50° ó 60° de distancia zenital; pero la hipótesis en que está fundada origina errores de importancia para mayores distancias al zenit. Ya para $z' = 80°$ produce un error de unos $7''$, y este crece rápidamente al aumentar z'. A la verdad, el establecimiento de una fórmula que represente con entera precisión las refracciones para cualquiera altura ó distancia zenital, es uno de los problemas que ofrecen más dificultades, originadas en su mayor parte por nuestra ignorancia de la verdadera constitución de la atmósfera y de las leyes que siguen el decremento de densidad y temperatura de sus capas superiores, que no son fácilmente accesibles á nuestra observación. Muchos geómetras distinguidos, como Laplace, Bradley, Bessel, etc., se han ejercitado en una investigación tan interesante, partiendo de hipótesis más ó menos plausibles, y han establecido fórmulas que representan con mucha exactitud las refracciones obtenidas por la experimentación directa, especialmente para distancias zenitales que no excedan de 80°. Para menores alturas respecto del horizonte los resultados de diversas fórmulas dejan de concordar bien entre sí y con los de las observaciones, lo cual también depende de las irregularidades que sufre la refracción misma cuando la luz atraviesa muy oblicuamente la masa atmosférica. Esta última circunstancia ha hecho prescribir la regla general de evitar la práctica de observaciones astronómicas á más de 80° de distancia zenital, ó sea á menos de 10° de altura sobre el horizonte.

No intentaré exponer las investigaciones de todos los astrónomos que se han ocupado de la teoría de la refracción, porque no ofrecen interés desde el punto de vista puramente práctico, y la fórmula aproximativa que he establecido es suficiente para mi objeto, que fué el de dar una idea general del monto de la refracción y de la manera de calcularla. Las diversas Tablas que se han construído, bien sea con los resultados obtenidos por la experimentación directa, ó bien por medio de teorías auxiliadas por la observación, proporcionan los valores de las refracciones con cuanta exactitud puede desearse en la práctica.

137.—Antes de explicar el uso de la Tabla de refracciones que va al fin de este libro, y que es la de Ivory, indiquemos la manera de obtener experimentalmente la refracción que corresponde á cualquiera distancia zenital. Debe advertirse de antemano que cuando las distancias zenitales son pequeñas, la fórmula $r = 57''.8 \tan. z'$, ó cualquiera otra, suministra el valor de r con bastante exactitud; y aun se conviene generalmente en que la refracción, cerca del zenit,

es de tantos segundos como grados tenga la distancia zenital, al menos si ésta no excede de 8° ó 10°. Según esto, si se observa una estrella cuya declinación difiera poco de la latitud del lugar, midiendo sus distancias zenitales tanto en el momento de su tránsito por el meridiano como cuando tenga diversos ángulos horarios, y se anotan las horas exactas de las observaciones, se habrán adquirido los datos necesarios para la determinación de las refracciones correspondientes. En efecto, aun suponiendo que el observador no conozca la latitud de su estación, la medida de la distancia zenital meridiana ζ, combinada con la declinación δ de la estrella, le dará........ $\varphi = \zeta + \delta$ si la estrella culmina al Sur, $\varphi = \delta - \zeta$ si culmina al Norte del zenit; y como por la hipótesis sólo tiene algunos grados la distancia zenital meridiana, podrá conocer el valor exacto de ζ, que es la cantidad angular obtenida después de añadirle la pequeña refracción que le corresponda. En seguida con φ, δ y h como datos, puede aplicarse la resolución del número 124 para obtener, por el cálculo, la distancia zenital verdadera z correspondiente á la hora...... $T = a + h$ de la observación. Como á la hora T se supone también medida directamente la distancia zenital aparente z', se deduce que la diferencia entre el resultado del cálculo y el de la observación representa el efecto de la refracción que conviene á z', y se tendrá: $r = z - z'$.

Variando las circunstancias de la observación de manera que se obtengan valores de z' desde las inmediaciones del zenit hasta cerca del horizonte, se podrá formar por este método una Tabla de refracciones, independiente de toda hipótesis relativa á la constitución de la atmósfera; y quedará el observador en aptitud de corregir sus observaciones ulteriores por la ecuación $z = z' + r$, que suministra la distancia zenital real cuando es z' la aparente.

138.—Ya sea que se suponga formada una Tabla del modo experimental que se ha explicado, ó bien que se tenga calculada por cualquiera de las fórmulas que dan exactamente la refracción, es indispensable tomar en cuenta otros dos elementos que modifican ligeramente el valor tabular de r, y que necesariamente varían de una observación á otra, aun respecto de los mismos valores numéricos de las distancias zenitales aparentes. Estos elementos son la temperatura y la presión *actuales* del aire, que haciendo variar su densidad, influyen en la magnitud de la refracción, puesto que se admite que ésta es proporcional á la densidad de aquel fluido.

Si, pues, se toma por unidad la densidad del aire cuando es P la altura del barómetro y θ su temperatura y la del aire, su densidad á cualquiera otra presión p cuando el termómetro fijo indique la temperatura τ y el libre la temperatura t, será:

$$\frac{p}{P[1+m(\tau-\theta)][1+a(t-\theta)]}$$

siendo a y m respectivamente los coeficientes de dilatación del aire y del mercurio. Designando ahora por ρ la refracción que corresponde á cualquiera distancia zenital con las indicaciones P y θ del barómetro y de los termómetros, y por r la refracción actual para la presión p y las temperaturas τ y t, se tendrá:

$$r=\frac{p\rho}{P[1+m(\tau-\theta)][1+a(t-\theta)]}$$

La Tabla de Ivory, que va al fin de este libro, contiene los logaritmos de ρ para $P=0^{m}.762$ y $\theta=10°$, por lo cual haciendo para abreviar:

$$b=\frac{p}{0^{m}.762} \qquad t=\frac{1}{1+a\,(t-10)} \qquad f=\frac{1}{1+m\,(\tau-10)} \text{......(2)}$$

se tiene que el valor de la refracción para las condiciones atmosféricas *actuales*, es:

$$r=b\,l\,f\rho \text{ .... (3)}$$

A la Tabla de los logaritmos de ρ he añadido otras dos, la primera de las cuales da los logaritmos de b con la presión ó altura barométrica observada p por argumento, y la segunda los logaritmos de l y de f con las indicaciones de los termómetros libre y fijo por argumentos. En consecuencia, toda la operación se reduce á sumar los cuatro logaritmos para obtener el de la refracción que corresponde á los datos z', p, t y τ suministrados por la observación.

Ejemplo.—¿Cuál será la distancia zenital, corregida por la refracción cuando la aparente es $z'=73°\ 24'\ 19''.4$, la indicación del barómetro $p=0^{m}.586$, la del termómetro libre $t=16°.7$ y la del fijo $\tau=20°.0$?

Interpolando el log. ρ para el valor de z', obtendremos:

ρ	2.2869		
b	9.8859		
l	9.9892		
f	9.9992		
		z' =	73° 24′ 19″.4
r	2.1612	r = +	2 24 .9
		z =	73° 26′ 44″.3

A falta de barómetro para tomar en cuenta la presión atmosférica, podría hacerse uso de un hipsómetro, pues hemos visto (Tomo I, número 287) que con las indicaciones de este instrumento se obtiene fácilmente aquel dato. Como en tal caso el valor de p se supone ya reducido á 0° de temperatura, se adoptará $\tau=0°$ para tomar el correspondiente log. f en las Tablas de refracción. El termómetro libre debe colocarse en un lugar descubierto á fin de obtener la verdadera temperatura del aire.