

LOEDEL-DE LUCA
ELEMENTOS
DE
COSMOGRAFÍA



Editorial ESTRADA

ENRIQUE LOEDEL PALUMBO

Doctor en Ciencias Físicomatemáticas. Profesor de la asignatura en el C. S. de S. de la U. N. de La Plata y de física en el C. N. y en la Facultad de Ciencias Físicomatemáticas de la misma Universidad. Profesor y Director interino de práctica pedagógica en matemáticas y física en la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación de la Universidad N. de La Plata.
Ex profesor de geografía matemática de la misma.

Y

SALVADOR DE LUCA

Profesor de cosmografía y matemáticas en el Colegio Nacional de la Universidad Nacional de La Plata. Profesor de matemáticas en el Colegio Secundario de Señoritas de la misma Universidad.

ELEMENTOS DE COSMOGRAFÍA

Responde a los programas de enseñanza media

TERCERA EDICIÓN

(Reimpresión de la primera edición, aprobada por el Ministerio de J. e Instrucción Pública)



ANGEL ESTRADA & Cía. S. A. - EDITORES
BOLÍVAR 466 — — BUENOS AIRES

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

*Ateneo, 1946
nota 356 - \$525*

164 x 231

*Régimen Legal de la Propie-
dad Intelectual. Ley 11.723*

PRÓLOGO

Estos ELEMENTOS DE COSMOGRAFÍA no son otra cosa que un resumen de nuestra obra COSMOGRAFÍA O ELEMENTOS DE ASTRONOMÍA aparecida a principios del corriente año.

El objeto de esta publicación ha sido poner en manos del alumnado un libro poco voluminoso y que les permita cumplir satisfactoriamente con las exigencias de los programas vigentes sin mayor esfuerzo. Creemos sin embargo, que aquellos jóvenes mejor predispuestos para estas disciplinas, saldrán beneficiados si adoptan para su estudio la obra no resumida.

*Con el fin de responder a los nuevos programas hemos agregado en el apéndice las fórmulas fundamentales del triángulo de posición, aun cuando, desde el punto de vista didáctico, consideramos preferible la solución aproximada de los problemas pertinentes, que se logra de una simple ojeada, utilizando la figura 38, para $\varphi = 35^{\circ}$, o la de la contratapa para cualquier otra ~~titutid~~ *latitud*.*

Para facilitar la tarea a los estudiantes, hemos señalado con un asterisco, cerca de un centenar de párrafos no exigidos por el programa vigente.

LOS AUTORES.

Julio de 1940.

2081

LIBRO PRIMERO
LA ESFERA CELESTE

NOCIONES PRELIMINARES

1. ASTROS. — Llamamos astro (del lat. *astrum*, del gr. *astrom*) a todo cuerpo, luminoso o no, aislado en el espacio, o lo que es lo mismo, sin apoyo ni contacto con otros.

Buen número de tales cuerpos son visibles a ojo desnudo, pero la mayor parte se revelan mediante la ayuda de instrumentos ópticos, anteojos y telescopios. En las últimas décadas, la aplicación de la extrema sensibilidad fotográfica, ha permitido registrar la existencia de muchísimos astros imperceptibles para los más pòtentes telescopios utilizados por el hombre.

El conjunto de todos los astros y del espacio continente forman el Universo, el cual, en razón de lo limitado de nuestros medios, sólo puede ser explorado en parte. En la actualidad, dichos medios permiten al hombre conocer objetos situados a distancias tales, que sólo pueden ser medidas en centenares de miles de años luz, y hasta en millones de tales unidades. Abstracción hecha de la Tierra, los astros más familiares al hombre, son el Sol y la Luna, clasificándose los demás por características afines, en *estrellas*, *nebulosas*, *planetas*, *satélites* y *cometas*, pudiéndose agregar a la nómina, los corpúsculos que dan lugar a los meteoros pasajeros llamados *bólid*os y *estrellas fugaces*.

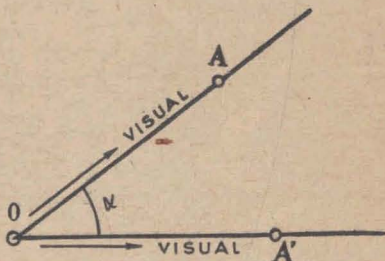


Fig. 1. — Distancia angular.

2. VISUAL, DISTANCIA ANGULAR, DIAMETRO APARENTE.

— Llamamos *rayo visual* o simplemente *visual*, a toda semirrecta con origen en el ojo del observador. Las visuales dirigidas a dos puntos distintos A y A' desde O, forman un ángulo α (fig. 1), llamado distancia angular de los puntos dados con respecto a O.

Diámetro aparente de una esfera, es el ángulo comprendido entre dos generatrices opuestas del cono circunscrito a la misma con vértice en el ojo O, del observador (fig. 2).

Al semidiámetro aparente, o sea, el ángulo AOC, lo designamos bajo la denominación de *radio aparente* de la esfera.

Designando por δ (delta), el diámetro aparente de la esfera C , vista desde O , podemos calcularlo en función del radio r , y de la distancia d que separa a su centro del punto O .

El triángulo OAC , rectángulo en A , permite establecer:

$$\operatorname{sen} \frac{\delta}{2} = \frac{r}{d}. \quad [1]$$

Esta relación expresa que: *el seno del semidiámetro aparente, es directamente proporcional al radio de la esfera, e inversamente proporcional a la distancia entre su centro y el ojo del observador.*

Tratándose de astros, cuya forma es aproximadamente esférica en la mayoría de los casos, el valor de δ , debido a la gran distancia que los separa de la Tierra, es muy pequeño, por lo cual y sin

cometer error apreciable, puede reemplazarse en la [1] el valor

$$\operatorname{sen} \frac{\delta}{2}, \text{ por la longitud del arco } \frac{\delta}{2},$$

con lo cual:

$$\frac{\delta}{2} = \frac{r}{d} \quad \therefore \quad \delta = \frac{2r}{d} \quad [2]$$

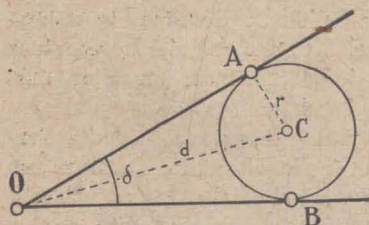


Fig. 2. — Diámetro aparente.

La fórmula [2] nos permite enunciar las leyes siguientes:

PRIMERA LEY: *El diámetro aparente de un astro, visto desde la Tierra, es sensiblemente proporcional a su diámetro real.*

SEGUNDA LEY: *El diámetro aparente de un astro, visto desde la Tierra, es inversamente proporcional a la distancia que lo separa de ésta.*

3. ASTROS FIJOS O ESTRELLAS. CENTELLEO. — 1. En el párrafo 1 nos hemos ocupado de los astros en general, citando en su nómina a las estrellas. Estos astros aparecen a nuestra vista los unos tras los otros, después de las puestas del Sol, a medida que las sombras van siendo más densas, acabando por dibujar en el telón oscuro de la noche un fantástico puntillado luminoso.

Desde tiempos remotos, se han formado con las estrellas agrupaciones características, conocidas bajo el nombre de constelaciones. Estas han conservado sus formas a través de los siglos, como lo demuestran las observaciones actuales comparadas con las de HIPARCO (fig. 3), obtenidas hace más de 2.000 años. Este gran observador midió distancias angulares entre estrellas importantes del cielo, y sus resultados son casi los mismos que los determinados en la actualidad.

Al no variar en forma apreciable las distancias angulares entre tales astros, las constelaciones conservan sus figuras, con lo cual,

el Cielo que contemplamos en la actualidad, presenta a la vista el mismo aspecto que ofreció al hombre en épocas remotísimas del pasado.

En esencia podemos asignar a los astros fijos o estrellas, los caracteres propios que siguen:

a) Aproximada constancia de sus distancias angulares.

b) Carencia de diámetros aparentes sensibles, puesto que siempre aparecen como puntos luminosos, aun ante los potentes instrumentos de la óptica moderna.

e) Parpadeo pronunciado en la luz que nos envían. Este fenómeno se conoce también bajo el nombre de centelleo.

d) Espectros luminosos propios. Creemos muy importante este carácter de las estrellas, por cuanto los astros errantes que se estudian en el parágrafo siguiente, reproducen siempre el espectro del Sol en el análisis de su luz (con ligeras variantes), lo que demuestra que son iluminados por dicho astro. Sin embargo, los cometas suelen presentar espectros propios superpuestos al espectro solar, como se verá en el capítulo V del libro V.



Fig. 3. — Hiparco de Rodas, creador de la astronomía matemática (160 a 124 a. de J. C.).

* 2. CENTELLEO. — Ya dijimos al hablar del carácter c) de las estrellas o astros fijos, que el brillo parpadeante de los mismos, constituye el fenómeno del centelleo que podemos apreciar en el Cielo noche tras noche.

Debido a tal fenómeno, alcanzamos a divisar ciertas estrellas de poco brillo, que de presentar luz fija, no alcanzarían a percibirse. Además, por el centelleo, parecen ser más numerosas las estrellas visibles a simple vista. El centelleo, es en realidad una variación rápida e irregular de la luz proveniente de las estrellas, que en ocasiones viene acompañado de un cambio de color y hasta de un velocísimo movimiento oscilatorio del astro alrededor de su

posición media. De ahí que al fenómeno en conjunto, lo dividan los astrónomos en otros tres fenómenos parciales.

a) *Centelleo dinámico*, que es el que afecta la intensidad luminosa del astro.

b) *Centelleo cromático*, relativo a las variantes en coloración.

c) *Centelleo paraláctico*, que da lugar a las oscilaciones aparentes del astro.

Cuando las estrellas están en las cercanías del horizonte, aparecen las tres formas enunciadas del centelleo, mientras que en las vecindades del cenit (ver par. 13), sólo es perceptible el centelleo dinámico. En cuanto a la intensidad del fenómeno, en uno y otro caso, se ha podido observar que es más pronunciada en invierno y sobre todo en las regiones frías del planeta.

Según RESPIGHI, debe considerarse al centelleo como un fenómeno cuya causa fundamental es la rotación de la Tierra, y donde las corrientes atmosféricas actúan como elementos perturbadores.

4. **ASTROS ERRANTES.** — En oposición a los astros fijos o estrellas, existe otra categoría de astros, *Sol**, *Luna*, *planetas* (entre ellos los llamados asteroides) *satélites* y *cometas*, cuya distancia angular entre dos cualesquiera de ellos, o entre uno de ellos y una estrella, experimenta variaciones pronunciadas, apreciables a veces en breve lapso. Vemos a estos astros desplazarse entre las estrellas en forma más o menos rápida, siendo más veloces los cercanos a la Tierra, en particular la Luna.

Si concentramos nuestra atención en el Sol, a lo largo del año, veremos al astro del día seguir en sus salidas, y preceder en sus puestas, a distintos grupos de estrellas, y si midiéramos sus desplazamientos con respecto a éstas, obtendríamos aproximadamente una velocidad angular de 1° por día, en el sentido llamado *directo* de poniente a levante. En la Luna, dicha velocidad angular alcanza a casi 13° por día, o sea, más de 30' por hora, por cuya razón, es fácil notar su desplazamiento con respecto a las estrellas, en un breve intervalo de tiempo.

En forma análoga, y con velocidades angulares variables, pasan de un grupo a otro de estrellas, los demás astros mencionados como errantes. Los diferenciamos de los astros fijos, por los caracteres que pasan a enunciarse:

a) *Sus distancias angulares a cualquier otro astro son variables.*

b) *Sus diámetros aparentes son sensibles.* En el Sol, la Luna y grandes cometas, dicha condición se aprecia a ojo desnudo; en los planetas, se la puede comprobar con la ayuda del telescopio.

c) *Su luz es fija y sin parpadeo acentuado.* Ciertos planetas, los de menor diámetro aparente, suelen presentar un cierto centelleo

* El Sol, a pesar de ser clasificado entre los astros errantes por sus movimientos, participa del carácter d) de los astros fijos, por ser una estrella (par. 3).

en determinadas circunstancias, pero muy débil comparado al de la mayor parte de las estrellas.

5. CIENCIAS ASTRONOMICAS Y COSMOGRAFIA: SU IMPORTANCIA Y OBJETO. — La Astronomía (del gr. *astrom*, astro y *nomos* ley), es la ciencia natural que se ocupa de los astros en todo cuanto concierne a sus movimientos, formas, distancias, posiciones, volúmenes, masa, composición físicoquímica, y fenómenos que originan, en especial, sobre nuestro planeta.

Puede afirmarse, sin lugar a dudas, que la astronomía es la más antigua de las ciencias de la naturaleza, desde que según versiones más o menos autorizadas, los arios y los chinos estudiaban fenómenos relacionados con la vida sobre el planeta, desde unos 150 siglos antes de la era cristiana. Por otra parte, son muchas las crónicas que describen episodios relacionados con fenómenos celestes desde tiempos remotos. Tal la ejecución de *HI* y *HO*, mencionada por SCHU-KING, por orden de

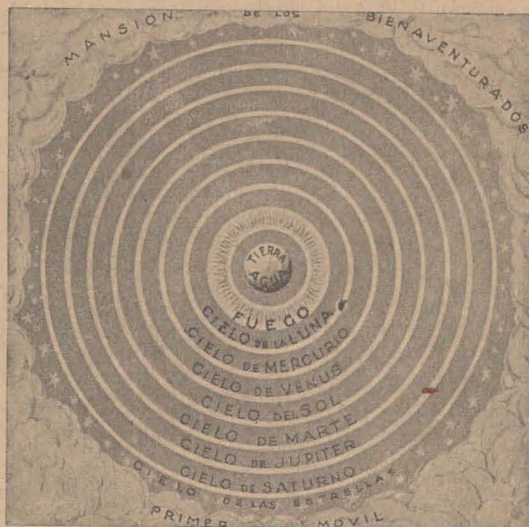


Fig. 4. — Esfera de los griegos.

un emperador chino, al no prever aquellos astrónomos un eclipse de Sol, que según parece se produjo hacia el año 2150 a. J. C., y que sembró el terror en las poblaciones afectadas.

La Cosmografía (del gr. *kosmos*, mundo y *grapho*, describir), no es más que una síntesis de la Astronomía, que comprende como ramas principales, las siguientes:

- a) ASTRONOMÍA DE POSICIÓN (geometría del Cielo).
- b) MECÁNICA CELESTE (dinámica del Cielo).
- c) URANOGRAFÍA (descripción del Cielo).
- d) URANOMETRÍA (medidas en el Cielo).

e) ASTROFÍSICA (física y química de los astros).

f) COSMOGONÍA (origen del Universo).

El conocimiento de estas disciplinas, no sólo explica la gran variedad de fenómenos debidos a los astros e íntimamente ligados a nuestras actividades sobre la Tierra, sino que pone de manifiesto la insignificancia de ésta ante el concierto astral del Universo.

El estudio de las nebulosas y sus fantásticas dimensiones, así como el de los materiales que contienen, revelados al espectroscopio, introduce en nuestro espíritu la convicción de la unidad de la materia que ha gestado al Universo, y nos la muestra con sus transformaciones multiformes en el tiempo y en el espacio.

LA ESFERA CELESTE. MOVIMIENTO APARENTE DIURNO

6. ESFERA CELESTE. — Es evidente que el Universo presenta apariencias esféricas desde cualquier punto que se le contemple. Lo que llamamos *Cielo*, *firmamento* o *bóveda celeste*, es visualmente una semiesfera hueca con su base a ras de tierra, y una especie de aplánamiento

en su parte más alta (cenit). Si imagináramos transparente al globo terráqueo, otra semiesfera de igual base se haría perceptible a nuestra vista, integrando con aquélla, la totalidad de la esfera celeste. Sintetizando, podremos decir que: *esfera celeste, es la esfera de radio arbitrario con centro en el ojo del observador, sobre la cual se proyectan los astros.*

Los griegos primitivos, por observación directa del Cielo, y en su afán de explicar las salidas y puestas diarias de los astros, imaginaron a éstos como sujetos a esferas huecas de cristal que



Fig. 5. — Claudio Ptolomeo (siglo II de nuestra era).

giraban alrededor de la Tierra en un tiempo cercano a 24 horas.

La esfera exterior contenía a los astros fijos o *estrellas*, y las interiores al *Sol*, la *Luna* y cada uno de los planetas conocidos en la antigüedad, *Mercurio*, *Venus*, *Marte*, *Júpiter* y *Saturno*, en conformidad con la ubicación asignada en la figura 4. Creían los grie-

gos, que la desigualdad en los tiempos empleados por las distintas esferas en sus rotaciones diarias originaba sutiles rozamientos, traducidos en los delicados sonidos de la "música celestial" de los espacios, imperceptible al oído humano por su extrema suavidad.

TOLOMEO, el portavoz de los astrónomos griegos que le precedieron en la antigüedad, afirma en el "ALMAGESTO", como tercer principio fundamental de su sistema astronómico, que *"la Tierra es el centro de la esfera celeste"*.

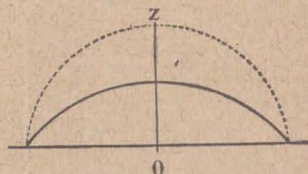


Fig. 6. — Aplastamiento aparente de la esfera celeste.

El color azulado del Cielo, es el que corresponde al aire visto a través de capas de gran espesor. Dicho color va tomando diversos matices, desde el azul claro hasta el índigo oscuro, a medida que nos elevamos, como podrá apreciarse en una ascensión aeronáutica, o desde la cima de un monte.

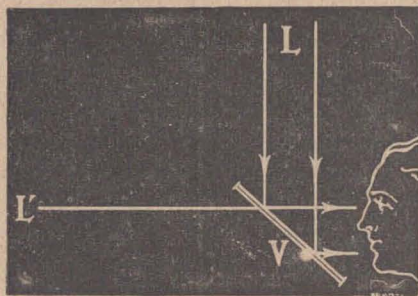


Fig. 7. — En las cercanías del horizonte el Sol y la Luna parecen agrandarse.

*** FORMA APARENTE DE LA BOVEDA CELESTE.**—Causas puramente subjetivas hacen que la bóveda celeste se nos presente algo achatada en el cenit, el cual parece encontrarse de ese modo más cercano a nosotros que la línea del horizonte (fig. 6). Por esta razón, el Sol y la Luna parecen de mayor tamaño cuando su altura es pequeña, pues el grandor que atribuimos a un objeto lejano depende de la distancia a que lo suponemos colocado. Si se mide el diámetro aparente del Sol o de la Luna al encontrarse estos astros en las

proximidades del horizonte, se encuentra que dicho diámetro es aproximadamente el mismo (en realidad algo menor) que cuando pasan por las proximidades del cenit. Esta deformación aparente de la bóveda celeste, proviene, pues, de una errónea apreciación de la distancia.

Experimentalmente puede probarse que el tamaño que le atribuimos al Sol o a la Luna en distintas posiciones, es consecuencia únicamente de una ilusión óptica. Basta para ello una lámina de vidrio de caras paralelas, con la cual podremos ver a la Luna en cualquier punto del horizonte, aunque ella se encuentre próxima al cenit (figs. 7 y 8)*. Si se dispone la lámina de vidrio (fig. 7), de modo que la

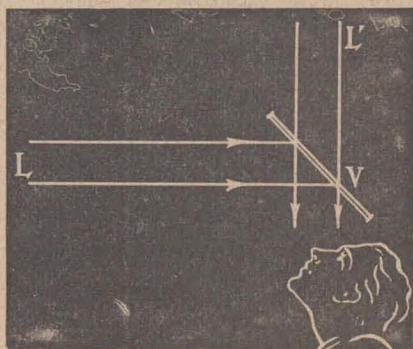


Fig. 8. — En las proximidades del cenit el Sol y la Luna parecen de menor tamaño.

* Experimento ideado por uno de los autores (Loedel).

imagen L' coincida, p. ejm., con el punto lejano de un camino o de una calle, nos parecerá el disco luminoso sumamente grande. Si inversamente (fig. 8), proyectamos la imagen de la Luna en las proximidades del cenit la veremos pequeña.

7. MOVIMIENTO DIURNO DE LA ESFERA CELESTE. ROTACION DE LA TIERRA. — Si desde un lugar cualquiera de la Tierra contemplamos durante la noche al Cielo estrellado, notaremos al cabo de un breve espacio de tiempo, que aquél, como un todo

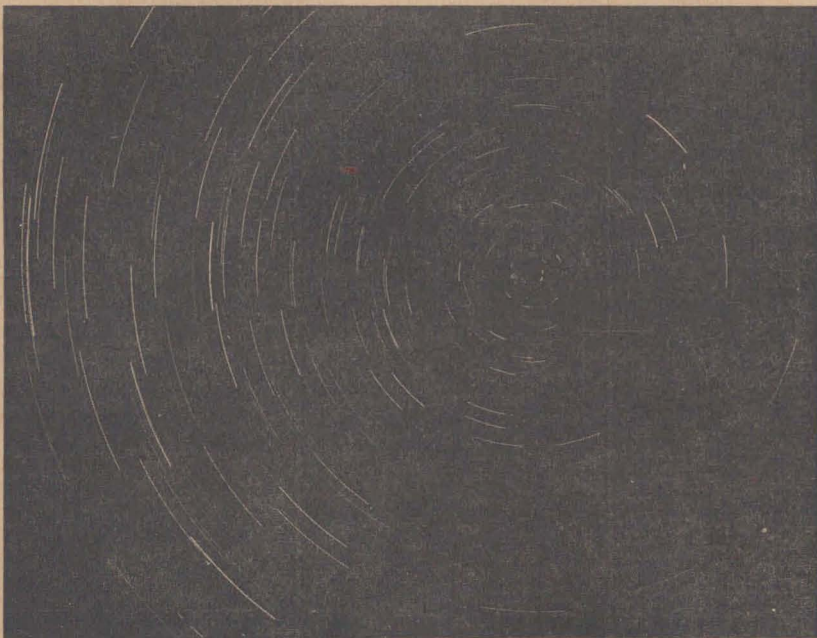


Fig. 9. — *Movimiento diurno de la esfera celeste.* Fotografía del casquete celeste Sur, tomada por los autores desde la azotea del C. N. de La Plata, con la ayuda del fotógrafo del establecimiento, Sr. Fresneda. Exposición: 1 hora, por lo cual los arcos son de 15° .

sólido, se desplaza en la dirección y sentido en que lo hace diariamente el Sol, y también la Luna (fig. 9).

A ese movimiento de conjunto, al que no se sustrae astro alguno del Universo, lo llamamos movimiento diurno, y puede ser explicado por una de las dos hipótesis antinómicas que siguen:

PRIMERA HIPÓTESIS: *Los astros del Cielo describen órbitas diarias de igual dirección y sentido alrededor de la Tierra, permaneciendo ésta inmóvil en el espacio.*

SEGUNDA HIPÓTESIS: *La Tierra rota diariamente alrededor de su eje en la misma dirección, pero en sentido opuesto al del movimiento diurno, permaneciendo fija la esfera celeste.*

Más adelante, en el libro III, demostraremos que de dichas hipótesis es verdadera la segunda, con lo que se podrá afirmar que: *el movimiento diurno de la esfera celeste con todos sus astros de Oriente a Occidente (sentido retrógrado), es consecuencia inmediata de la rotación de la Tierra de Occidente a Oriente (sentido directo).*

Desde este aspecto, el movimiento diurno de los astros no es más que un *movimiento aparente*.

DEFINICIONES RELATIVAS A LA ESFERA CELESTE

8. EJE DEL MUNDO. — La rotación diaria de la Tierra en el sentido llamado directo (Oeste a Este), origina, según se ha dicho, el movimiento aparente diurno de la esfera celeste en el sentido opuesto o retrógrado (Este a Oeste) del cual participan todos los astros, ya sean fijos (estrellas) ya sean errantes. Los primeros se mueven en un solo cuerpo con la esfera celeste en el tiempo en que la Tierra cumple su rotación, que es de 23 horas 56 minutos, aproximadamente (día sideral). Los errantes participan de ese movimiento y acusan además los propios, desplazándose entre las estrellas.

En este movimiento diurno, los astros parecen describir circunferencias, más o menos amplias, cuyos centros están sobre una misma recta llamada eje del mundo, que no es más que una prolongación en ambos sentidos del eje de rotación de la Tierra, pudiéndose considerar a éste, de polo a polo, como un segmento de aquél (fig. 10).

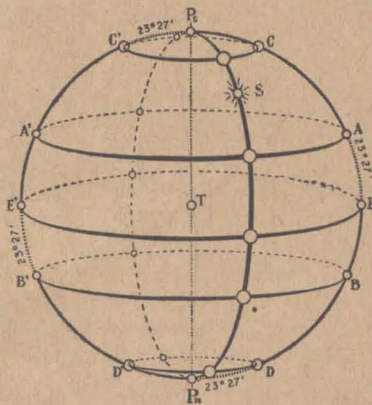


Fig. 10. — Polos, Ecuador, paralelos y círculos horarios de la esfera celeste.

9. POLOS CELESTES. — El eje del mundo parece interceptar a la esfera celeste en dos puntos diametralmente opuestos, P_s y P_n , (fig. 10), llamados polos celestes. El primero se denomina *Sur, austral* o *antártico*, y el otro, *Norte, boreal* o *ártico*.

La estrella más cercana a P_s , o sea, la *Polar Sur*, es σ (sigma) del *Octante* separada de aquél por una distancia angular de $50'$. La *Polar Norte* es la célebre estrella α (alfa) de la *Osa Menor* alejada $61'$ de P_n .

NOTA I. En las figuras indicamos a los puntos por pequeños círculos. Con esta notación podemos apreciar si dos líneas de la esfera celeste que se cruzan, se cortan o no.

10. **ECUADOR CELESTE.** — Es la sección producida sobre la esfera celeste por un plano normal al eje del mundo $P_s P_n$, trazado desde el centro T de dicha esfera, que lo es también de la Tierra. Es un círculo máximo designado en la figura 10 por EE' , cuyo plano coincide con el del Ecuador terrestre.

NOTA II. *En lo sucesivo, consideraremos infinito al radio de la esfera celeste. En tal supuesto la longitud del radio de la Tierra es insignificante, y podemos suponerla nula. Bajo este aspecto, la Tierra se reduce a un punto T , centro de la esfera celeste.*

El Ecuador divide a la esfera celeste en dos hemisferios (o semiespacios) $EE'P_s$ y $EE'P_n$ denominados *Sur*, *austral* o *antártico* el primero, y *Norte*, *boreal* o *ártico* el segundo. Cualquier astro de la esfera celeste, es *austral*, *boreal* o *ecuatorial*, según que esté ubicado en uno de estos hemisferios, o sobre el Ecuador, común a ambos. Las estrellas y nébulas permanecen siempre en el mismo hemisferio, no así los astros errantes, Sol, Luna y planetas, que en épocas son australes, y en épocas boreales, ubicándose por momentos sobre el mismo Ecuador celeste.

11. **PARALELOS CELESTES.** — Son círculos menores de la esfera celeste, intersección de la misma con planos paralelos al del Ecuador, o lo que es lo mismo perpendiculares al eje del mundo. Entre ellos son dignos de mención especial, los llamados *tropicos de Capricornio* y *Cáncer* situados a $23^{\circ}27'$ al Sur o al Norte del Ecuador celeste, y los *círculos polares antártico* y *ártico* que distan $23^{\circ}27'$ de los polos celestes P_s y P_n , o $66^{\circ}33'$ del Ecuador, al Sur o al Norte, respectivamente. En la figura 10, AA' es el trópico de Capricornio, y BB' el de Cáncer. Los círculos polares vienen designados por CC' , el antártico, y DD' , el ártico. Cada astro, en su movimiento diurno, recorre en el sentido retrógrado un paralelo celeste.

12. **CIRCULOS HORARIOS, O DE DECLINACION.** — Un astro (o punto) cualquiera S del Cielo, determina con los polos P_s y P_n un plano que intercepta a la esfera celeste según un círculo máximo $P_s SP_n$ llamado círculo horario o de declinación del astro S (fig. 10).

El eje del mundo $P_s P_n$ divide al círculo $P_s SP_n$, en dos semicírculos horarios o de declinación, interesando de ellos aquel que contiene el astro.

Se supone que el semicírculo horario de un astro lo acompaña en su movimiento diurno, con lo cual uno cualquiera de aquéllos, rotando alrededor del eje del mundo, barre en un día la esfera celeste.

13. **VERTICAL DE UN LUGAR: CENIT, NADIR, PLANOS VERTICALES.** — Se llama vertical de un lugar a la dirección que toma en el mismo un hilo tendido bajo la acción de un peso (plo-

mada), o en otros términos, a la dirección de la gravedad en dicho lugar.

Las verticales de dos puntos cualesquiera de la Tierra, concurren aproximadamente al centro de la misma, formando un ángulo de 1° si los puntos están separados por una distancia de 111 km. 111 m.

El radio terrestre que pasa por un lugar del planeta, coincide sensiblemente con la vertical del mismo.

Cenit y nadir (voces árabes), son los puntos diametralmente opuestos, donde las semirrectas ascendente y descendente que integran la vertical, parecen interceptar a la esfera celeste.

En la figura 11, z es el cenit, y n el nadir, de un determinado lugar de la Tierra.

Dos lugares antípodas tienen la misma vertical, pero el cenit del uno es nadir del otro y recíprocamente.

Plano vertical es el que contiene a la vertical del lugar, la cual lo divide en dos semiplanos, de los cuales cada uno determina sobre la esfera celeste un *semicírculo vertical*.

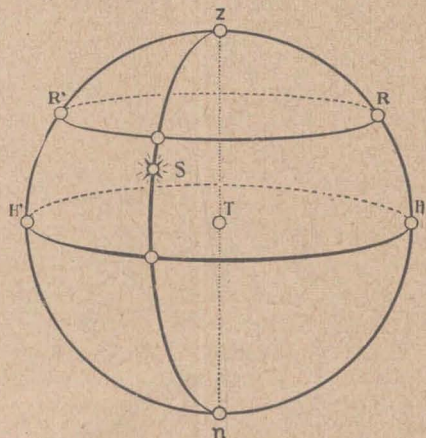


Fig. 11. — Vertical, semicírculo vertical, horizonte y almicantera.

Por cada astro S del Cielo pasa un semicírculo vertical zSn determinado por la vertical zn del lugar y el astro.

14. HORIZONTES; DISTINTAS CLASES. ALMICANTARADAS. — Todo plano normal a la vertical zn de un lugar, es un *plano horizontal*.

Entre dichos planos interesan:

1º *El horizonte matemático*, que toca a la superficie de la Tierra en el lugar de observación.

2º *El horizonte racional*, trazado por el ojo del observador.

3º *El horizonte astronómico o geocéntrico*, llevado desde el centro de la Tierra.

Por ser los horizontes normales a la vertical del lugar, serán también paralelos entre sí. En la figura 11 se ha trazado en HH' el horizonte astronómico que es el que utilizaremos de continuo.

La intersección de la esfera celeste con cualquier horizonte distinto al astronómico, es un círculo menor RR' llamado *almicantárada*.

Además de los estudiados, existe, debido a la esfericidad de nuestro planeta, otra especie de horizonte, llamado *vulgar*, *ordinario* o *aparente* (fig. 12), que es la línea según la cual parecen interceptarse la esfera celeste y la superficie llana de la Tierra.

Podemos definirlo con más propiedad, considerándolo como la línea de contacto con la Tierra del cono circunscrito a la misma con vértice en el ojo O del observador.

El horizonte vulgar se amplifica con la altura h , por lo cual, a medida que nos elevamos, se divisan en las llanuras y en el mar objetos cada vez más distantes. La figura muestra dicho

horizonte en la circunferencia NN' para la altura $h = OL$.

Se llama *depresión de horizonte*, al ángulo α complemento del semiángulo al vértice del cono circunscrito. Su valor es, pues:

$$\alpha = 90^\circ - \frac{\beta}{2}.$$

El valor de α , utilizado para medir con una primera aproximación la longitud del radio de la Tierra, crece con la altura h .

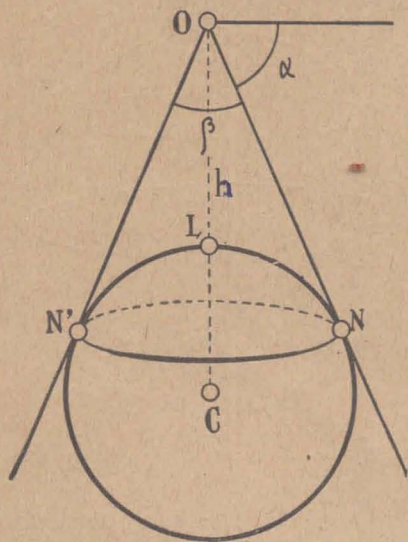


Fig. 12. — Horizonte vulgar o aparente. Depresión de horizonte.

ficie de la esfera, la posición de uno cualquiera de sus puntos.

Para formar un sistema, se elige en primer lugar uno de sus círculos máximos QQ' (fig. 13), como *círculo o plano fundamental*, y sobre la circunferencia que lo limita se toma un punto O , que servirá de *origen*. El *eje fundamental* del sistema es el diámetro PP' normal al plano QQ' , y uno de sus polos P , será el *polo principal*. Por convención, el cenit para el horizonte y el Polo Norte para el Ecuador se consideran polos principales.

Llamaremos *círculo normal*, a todo círculo máximo perpendicular al círculo fundamental. Por cada punto A de la superficie de la esfera pasa un círculo normal, que es dividido por el eje PP' , común a todos ellos, en dos *semicírculos normales*, de los cuales interesa al que contiene al punto (en fig. 13, el PAP').

A las coordenadas esféricas de un punto cualquiera A , las designaremos bajo los nombres de *abscisa esférica*, a la una, y

15. COORDENADAS ESFERICAS. — Las líneas de la superficie esférica, análogas a las rectas del plano, son las circunferencias de sus círculos máximos. Las coordenadas esféricas sirven para fijar sobre la super-

ordenada esférica, a la otra, por las analogías que presentan con las coordenadas cartesianas ortogonales de igual denominación.

Llamamos *abscisa esférica de un punto A de la superficie de la esfera*, al diedro comprendido entre los semicírculos normales del origen O y del punto A.

Dicho diedro es medido por su sección normal ángulo OTA' , y ésta por el arco de circunferencia OA' del círculo fundamental.

Se cuentan las abscisas esféricas de 0° a 360° en un sentido determinado y a partir del origen O. Dicho sentido podrá ser el directo o el retrógrado (ver parágrafo 18), según se convenga. En algunos casos suelen medirse de 0° a 180° en sentidos positivo y negativo.

Ordenada esférica de un punto A de la superficie de la esfera, es el ángulo comprendido entre el radio TA que pasa por el punto (en el caso de los astros, visual) y la proyección TA' de dicho radio (o visual), sobre el plano fundamental.

Dicho ángulo ATA' , está medido por el arco de circunferencia AA' del semicírculo normal del punto A.

Las ordenadas esféricas se miden de 0° a 90° , a partir del plano fundamental. El valor positivo corresponde al sentido que conduce al polo principal, dado por la flecha en la figura.

Si en general designamos por X e Y a los valores de la abscisa y ordenada esférica del punto A, tendremos:

$$X = \text{arc. } OA'; \quad Y = \text{arc. } AA'.$$

Los diversos sistemas de coordenadas esféricas adoptados sobre la superficie de la Tierra, o de la esfera celeste, suelen llevar nombres relacionados al plano fundamental elegido, y en cada uno de ellos se asignan denominaciones especiales para la abscisa y la ordenada esférica. Se elige siempre como origen a un punto convenientemente determinado, de la Tierra o de la esfera celeste, según el caso.

16. ALTURA. — Se llama altura de un astro (o de un punto cualquiera), al ángulo comprendido entre la visual dirigida al astro (o al punto) y la proyección de la misma sobre el hori-

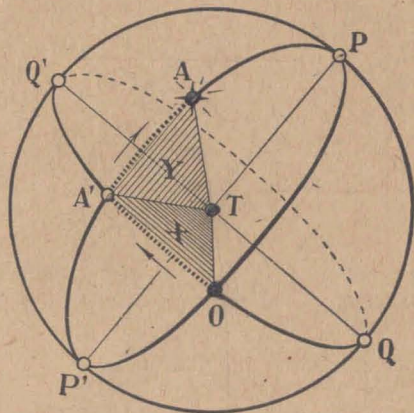


Fig. 13. — Abscisa esférica X y ordenada esférica Y del astro A.

los pasos
esférica de
0 a 360°
los ord de
0 a 90°
p. 12

zonte. En la figura 14, la altura del astro A será, designándola por h :

$$h = \text{ang. } AOA'.$$

Para todo punto del horizonte, será: $h=0$, y para el cenit, $h=90^\circ$.

17. EL MERIDIANO, CULMINACION DE LOS ASTROS. — Se llama *meridiano* (del lat. meridianus, de meridies, el mediodía),

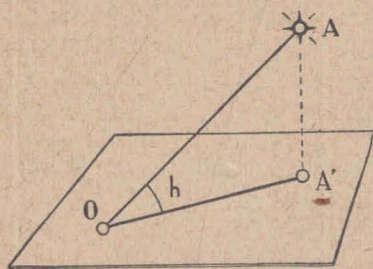


Fig. 14. — Altura h del astro A .

de un lugar terrestre, al plano vertical que contiene al eje del mundo. Dicho plano intercepta a la esfera celeste según un círculo máximo $zP_s nP_n$.

El meridiano, por contener a la vertical zn (fig. 15), es normal al horizonte HH' y en consecuencia plano de simetría de todas las almicantáradas (14). El eje del mundo $P_s P_n$, divide a cada uno de ellos en dos *semimeridianos*

opuestos, $P_s z P_n$ y $P_s n P_n$, de los cuales el primero, por contener al cenit, es el *semimeridiano del lugar*. Durante el movimiento diurno, los astros en sus trayectorias pasan dos veces por el meridiano de un lugar. En uno de esos pasos, llamado *paso o culminación superior*, el astro cruza el semimeridiano del lugar, y en el otro denominado *paso o culminación inferior*, atraviesa el semimeridiano opuesto.

En la figura 15, el astro A aparece en culminación superior por hallarse sobre el semimeridiano del lugar, $P_s z P_n$, y el B en culminación inferior por haberse ubicado en el semimeridiano $P_s n P_n$,

opuesto al del lugar. En particular, el Sol llega a su culminación superior a mediodía y a la inferior a medianoche.

En el instante de la culminación superior, el astro adquiere la máxima altura sobre el horizonte del observador, como puede observarse con el Sol a mediodía.

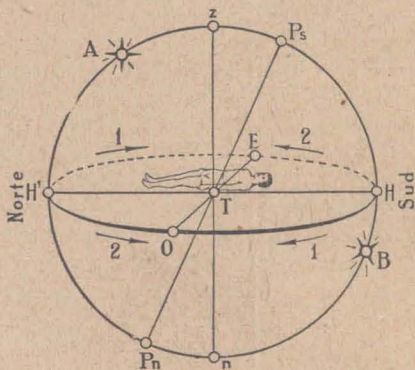


Fig. 15. — Orientación.

18. LA MERIDIANA; ORIENTACION. SENTIDO DIRECTO Y SENTIDO RETROGRADO. — El meridiano $zP_s nP_n$ (fig. 15), intercepta al horizonte HH' del lugar, según una recta HH' llamada

meridiana. Esta recta, base de toda orientación, proporciona el rumbo Norte-Sur, llamándose *Punto Norte*, a la proyección esférica H' del polo celeste P_n , sobre el plano del horizonte, y *Punto Sur* a la proyección H de P_s sobre el mismo.

El rumbo Este-Oeste se traza sobre el horizonte normalmente a la meridiana. Si suponemos a un observador ubicado sobre ésta en la forma que lo muestra la figura 15, es decir, con la cabeza hacia el Sur, dicho observador verá a los astros del Cielo desplazarse de su derecha (Levante), a su izquierda (Poniente) ubicando entonces el Punto Este en E , y el Oeste en O^* . El sentido Sur-Norte pasando por el Oeste, de las flechas 1, es el llamado *sentido retrógrado* para el horizonte, y el Sur-Norte pasando por el Este, de las flechas 2, es el *sentido directo*.

En general, para los sistemas de coordenadas, la determinación de los sentidos directo y retrógrado se lleva a cabo en conformidad con la regla general siguiente: Supóngase un punto R cualquiera, moviéndose sobre el círculo fundamental CC' (fig. 16), e imaginemos un observador dispuesto sobre el eje fundamental PP' con la cabeza hacia el polo principal P . El punto R se mueve en sentido directo, flecha 1, si el observador lo ve desplazarse de su derecha a su izquierda, y en sentido retrógrado, flecha 2, si el desplazamiento es de izquierda a derecha.

Las agujas de un reloj, según esta regla, se mueven en el sentido retrógrado si se considera que el polo principal coincide con el punto de vista.

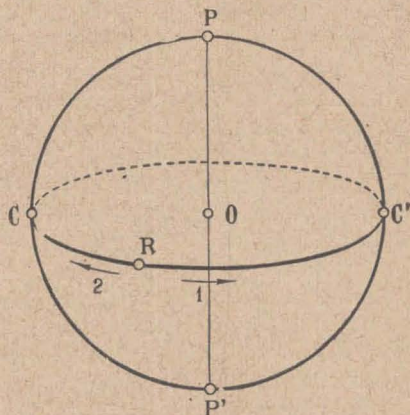


Fig. 16. — Sentido directo y sentido retrógrado.

* 19. PROPIEDADES DEL MERIDIANO. — Pueden reunirse en los enunciados siguientes:

a) Por ser normal al Ecuador y demás paralelos celestes y contener al eje del mundo, es *círculo máximo y plano de simetría de los recorridos diurnos de todos los astros* (v. par. 30).

b) Por ser plano vertical, es perpendicular al horizonte, y por lo tanto *plano de simetría de las almicantáradas* (14).

* Los puntos donde se levanta y pone el Sol, en las fechas de los equinoccios (43), 21 de marzo y 23 de setiembre, se llaman, respectivamente, *Este verdadero* y *Oeste verdadero*. En lo sucesivo, por extensión, llamaremos Este, Oriente o Levante, a toda la región de la Tierra, o de la esfera celeste, ubicada hacia el Este verdadero; y Oeste, Occidente o Poniente, a la región de la Tierra, o de la esfera celeste, dirigida hacia el Oeste verdadero. El meridiano del lugar sirve de separación entre ambos.

c) *Es fijo para cada lugar*, porque lo son las dos rectas que lo determinan: la vertical zn y el eje del mundo $P_s P_n$.

d) *No es círculo horario o de declinación* (12) por participar éstos del movimiento diurno de la esfera celeste.

e) *Es aproximadamente plano de culminación de todos los astros del Cielo* (17). Los astros fijos culminan exactamente en él; los errantes muy próximos al mismo.

20. COORDENADAS GEOGRAFICAS. LONGITUD Y LATITUD.—Una primera aplicación de las coordenadas esféricas sobre la Tierra, la constituye el sistema de coordenadas geográficas o terrestres, integrado por la longitud geográfica λ (lambda) y la latitud geográfica φ (fi).

Nos ocuparemos de dichas coordenadas por cuanto las magnitudes angulares λ y φ intervienen frecuentemente en las determinaciones astronómicas. Lo mismo que sobre la esfera celeste, consideramos en la Tierra, puntos, líneas y planos especiales, como ser, los polos, el eje, el Ecuador, los paralelos (entre éstos los trópicos y círculos polares), los meridianos y semimeridianos, de cuyas definiciones prescindiremos por ser muy conocidas, y poderse deducir de las análogas vistas en parágrafos 8 a 12, para la esfera celeste. Supongamos que la figura 13 del parágrafo 15, representa a la Tierra. Si admitimos, además, que PP' , o sea, el eje fundamental, es también el eje de rotación del planeta, en tal caso, el círculo fundamental QQQ' será el ecuador terrestre, y el semicírculo normal PAP' es el semimeridiano del lugar A . Admitiendo ahora que el origen O , es la intersección del Ecuador con el primer meridiano (el de *Greenwich*, o cualquier otro), tendremos que la longitud y la latitud geográfica del lugar terrestre A , son respectivamente, su abscisa y su ordenada esférica, es decir:

$$\lambda = X = \text{arc. } OA' \quad ; \quad \varphi = Y = \text{arc. } AA'.$$

En consecuencia:

Longitud geográfica de un lugar terrestre, es la abscisa esférica de éste, respecto al Ecuador y al punto de origen.

Latitud geográfica de un lugar de la Tierra, es la ordenada esférica del mismo respecto al Ecuador.

En la práctica se mide la longitud de 0° a 180° hacia el Este o el Oeste, siendo oriental en el primer caso y occidental en el segundo, por un arco de circunferencia ecuatorial comprendido entre el origen y la proyección esférica del lugar sobre el Ecuador.

Teniendo en cuenta que, tratándose de la Tierra, el radio TA es con aproximación la vertical del lugar A , podríamos definir a la latitud geográfica como *ángulo comprendido entre la vertical del lugar y el plano del Ecuador*. Se la mide por el arco de semimeridiano que se extiende entre el lugar y el Ecuador, pudiendo variar

entre 0° y 90° al Norte o al Sur, por lo que se clasifican en boreales y australes, o también, en positivas y negativas (se consideran positivas las boreales).

Las latitudes extremas 0° y 90° , corresponden a puntos del Ecuador, y a los polos de la Tierra, respectivamente.

Los lugares de igual longitud están sobre el mismo semimeridiano, y los de igual latitud sobre el mismo paralelo. Las graduaciones del semimeridiano y del paralelo que pasan por el lugar, dan los valores numéricos de su longitud y su latitud, respectivamente.

21. COLATITUD. — *Es el complemento de la latitud de un lugar, y se la suele llamar también distancia polar.* Se mide de 0° a 180° , y siempre es positiva, tomándose como polo principal al Polo Norte de la Tierra. Con esta convención, los lugares de latitud negativa (australes), tendrán una colatitud superior a 90° . Si la designamos por Δ (delta), se tendrá siempre:

$$\varphi + \Delta = 90^{\circ} \quad \therefore \quad \varphi = 90^{\circ} - \Delta \quad \text{y} \quad \Delta = 90^{\circ} - \varphi.$$

22. COORDENADAS HORIZONTALES: AZIMUT Y ALTURA.

— En este sistema de coordenadas esféricas, se fija la posición del astro (o de un punto cualquiera del Cielo o de la Tierra), tomando como *plano fundamental al del horizonte HH'*, y por *origen al punto Sur de la meridiana* (fig. 17).

En estas condiciones (15), *el eje fundamental es la vertical zn del lugar, siendo el cenit z, el polo principal.* En la figura, el círculo máximo $zHnH'$ es el meridiano del lugar, habiéndose trazado también el eje del mundo $P_s P_n$ a fin de obtener la orientación.

Las coordenadas horizontales del astro A son:

19 El azimut a que corresponde a la abscisa esférica X respecto al horizonte y al origen.

29 La altura h que corresponde a la ordenada esférica Y respecto al horizonte.

Se tendrá:

$$a = X = \text{arc. } HA' ;$$

$$h = Y = \text{arc. } A'A.$$

Llamamos, pues, *azimut* (del ár. *açomut*, pl. de *acemt*, punto del horizonte) de un astro (o un punto cualquiera) al arco de horizonte HA' comprendido entre el punto sur de la meridiana, y la proyección esférica A' del astro (o del punto) sobre el horizonte.

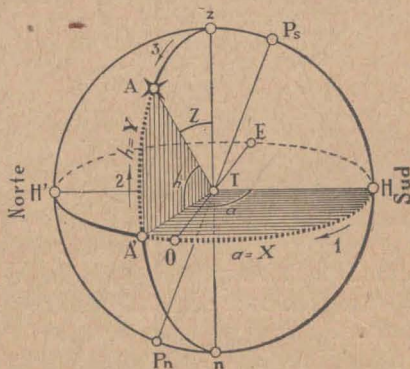


Fig. 17. — Azimut a y altura h .

Se cuenta el azimut de 0° a 360° en el sentido retrógrado (18) del Sur a Norte pasando por el Oeste (flecha 1) *.

Altura h de un astro, es el ángulo ATA' medido por el arco $A'A$ del semicírculo vertical del astro, variable de 0° a $\pm 90^\circ$. Las alturas negativas corresponden a astros situados debajo del horizonte y por consiguiente invisibles. La flecha 2 indica el sentido de medición de las alturas positivas, desde el horizonte hacia el cenit. Los valores obtenidos para a y h , sólo son válidos para el lugar, pues el horizonte varía de un sitio a otro.

23. DISTANCIA CENITAL. — Es el ángulo que forma la visual TA dirigida al astro (o a un punto cualquiera) con la vertical zn del observador. Designándola por Z , su valor es dado en la figura 17 por el ángulo ATz , o bien por el arco zA que subtende. Por ser la vertical normal al horizonte, se verifica:

$$h + Z = 90^\circ \quad \therefore$$

$$h = 90^\circ - Z \quad \text{y} \quad Z = 90^\circ - h,$$

es decir, que: la altura y la distancia cenital de un mismo astro, son magnitudes complementarias.

Se mide Z , de 0° a 180° partiendo del cenit (flecha 3). Su valor es siempre positivo, por lo cual a alturas negativas (bajo el horizonte) corresponden distancias cenitales superiores a 90° .

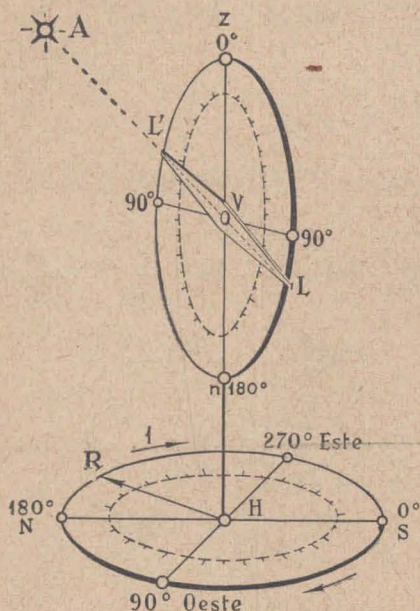


Fig. 18. — Esquema del Teodolito.

24. TEODOLITO. — Es el instrumento apropiado para la determinación de las coordenadas horizontales que acaban de verse.

Esquemáticamente consta de dos círculos rígidamente normales entre sí, de modo que al disponerse horizontalmente uno de ellos, el otro será vertical. El limbo del círculo H , (fig. 18), llamado también azimutal, está graduado de 0° a 360° en el sentido retrógrado, Sur - Oeste - Norte, de las flechas 1, y el del círculo vertical V , de 0° a 180° en ambos sentidos y a partir del punto más alto z que es el cenit del instrumento. Sobre este último círculo, y según uno

* Los marinos suelen medir el azimut de 0° a 180° , tomando azimutes al Este y azimutes al Oeste.

de sus diámetros, va dispuesto un anteojo LL' , que puede girar libremente alrededor de un eje horizontal que pasa por su centro. Además, el círculo V es rotatorio alrededor de la vertical zn , con lo cual puede tomar la posición deseada por el observador para dirigir sus visuales. Una alidada (reglilla HR) rigidamente ligada al círculo V , se desliza sobre el H acusando con su extremo R sobre el limbo graduado de éste, las rotaciones de aquél. Los extremos L' y R , del

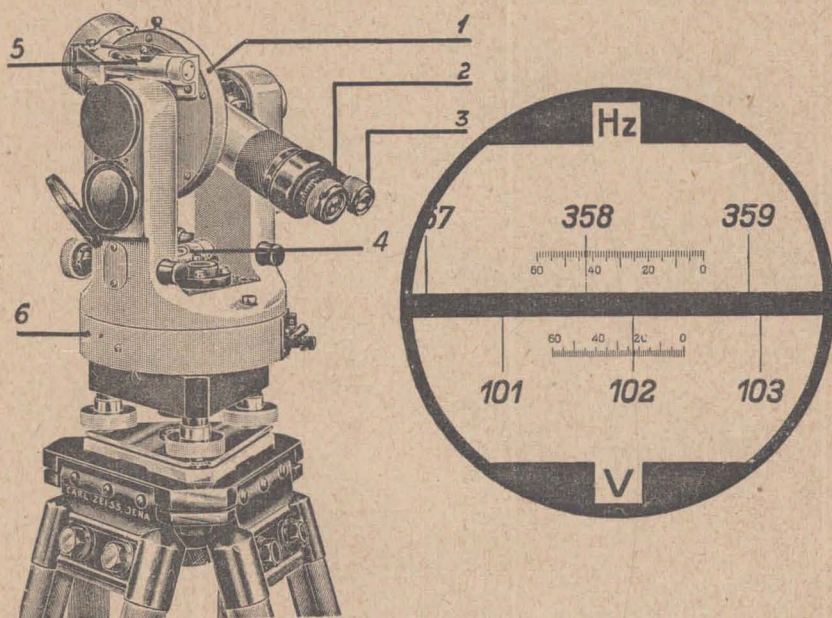


Fig. 19. — Teodolito Zeiss. 1. Caja del limbo vertical; 2. Ocular del anteojo; 3. Anteojo que permite las lecturas sobre ambos limbos; 4 y 5. Niveles; 6. Caja del limbo horizontal. A la derecha: porciones de ambos limbos, vistas con el anteojo 3 provisto de micrómetro ocular.

anteojo y de la alidada, van provistos de nonius a fin de obtener mayor precisión en las lecturas.

Antes de operar con un teodolito, en la determinación de coordenadas horizontales, hay que proceder a dos operaciones previas:

1º Control de la horizontalidad del círculo H .

2º Ubicación del círculo V en el meridiano del lugar.

La horizontalidad del círculo H se obtiene actuando sobre tornillos especiales que accionan sobre el mismo.

La práctica da al operador la destreza necesaria para efectuar esta operación en breve tiempo, la cual se da por terminada cuando quedan centradas las burbujas de niveles especiales acoplados al círculo H .

La ubicación del círculo vertical en el meridiano se consigue determinando a éste, si no es conocido, por el método que se explicará

en el párrafo 39. La figura 19 muestra un teodolito en todos sus detalles.

25. DETERMINACION DEL AZIMUT Y LA DISTANCIA CENITAL. — Instalado el teodolito en las condiciones vistas en el párrafo anterior, y después de llevar el diámetro SN del círculo horizontal (fig. 18), a coincidir con la meridiana, haciendo que la extremidad R de la alidada se ubique en S , y por consiguiente en la graduación 0° del limbo horizontal, se deja fijo el círculo H , usando tornillos especiales de presión, y se hace rotar el V en el sentido retrógrado de las flechas 1, hasta poder enfocar al astro o punto a determinar. Conseguido este resultado, se fija también el círculo vertical actuando sobre sus tornillos de presión y se procede a las lecturas.

La magnitud acusada por el nonius de la alidada, es el valor del azimut a , y la lectura apreciada en el nonius que acompaña al anteojo, proporciona el valor de la distancia cenital Z , cuyo complemento, $90^\circ - Z$, da la altura h . Por medio de un cronómetro obtenemos el tiempo de observación en el instante de ser enfocado el astro.

26. CORRECCION DE LA ALTURA DE UN ASTRO. — La refracción atmosférica, según se demuestra en el párrafo siguiente, eleva a los astros en sus planos verticales, por lo cual el valor de h obtenido en la determinación anterior, y por consiguiente el de su complemento Z , no son verdaderos. El error cometido es tanto mayor, cuanto menor es el valor de h , es decir, cuanto más cercano al horizonte se encuentre el astro en el momento de observación. La corrección de h se hace utilizando tablas especiales, que dan la magnitud media de refracción para todas las alturas ficticias, desde 0° , en cuyo caso es $D = 33'$ (D es el valor de la desviación en altura) hasta los 90° , altura del cenit, donde la desviación es nula.

Si designamos por h a la altura real, y h' a la de observación tendremos:

$$h = h' - D.$$

Como se comprenderá, las distancias cenitales observadas son menores que las reales, y para obtener las verdaderas habrá que sumar a la ficticia el valor D correspondiente a su altura complementaria.

Ya a los 45° de altura el valor de D no alcanza a $1'$ de arco.

27. REFRACCION ATMOSFERICA: DIVERSOS EFECTOS.

— La desigual densidad de las capas atmosféricas que envuelven al planeta, originan una serie de desviaciones al rayo luminoso que parte de un punto de la esfera celeste, que se traducen en desplazamientos de los astros en altura, dentro de los planos verticales que los contienen.

En la figura 20 puede verse cómo se quiebra el rayo luminoso que parte del astro A , por los sucesivos acercamientos a las normales, al incidir sobre las diversas capas de aire, dispuestas en orden de densidad creciente en el sentido de la marcha. El rayo luminoso inicial AB , después de atravesar el presunto vacío sideral, y las distintas capas atmosféricas, llega al ojo O del observador terrestre

según la dirección CO , sobre la cual vemos al astro proyectarse en un punto A' del Cielo, tanto más elevado respecto a A , cuanto más próximo al horizonte se encuentre el astro.

La refracción produce entre otros, los siguientes notables efectos:

a) *Variación en las alturas de los astros*, efecto explicado en las consideraciones anteriores.

b) *Variaciones en la declinación y la distancia polar de los astros*, coordenadas éstas que se estudiarán en el par. 50, y que al igual a lo ya visto para las alturas, deben ser corregidas.

c) *El sol muestra por la mañana y por la tarde todo su disco sobre el horizonte, según S' , cuando recién su borde superior es tangente al mismo según S* , debido a que su diámetro aparente es aproximadamente igual a $33'$, o sea al valor de la desviación en el horizonte. El mismo efecto se produce con la Luna.

d) *Los discos del Sol y de la Luna en el horizonte se asemejan a elipses*, por acortamiento del diámetro vertical, cuyo extremo inferior se ha desviado por refracción más que el superior, mientras el diámetro horizontal permanece inalterable.

e) *Las constelaciones se desfiguran ligeramente en su dirección vertical* debido a que sus estrellas más bajas experimentan mayor desviación que las más altas.

De no existir la refracción, el Cielo estrellado ofrecería un aspecto ligeramente distinto del que nos muestra noche tras noche.



Fig. 20. — La refracción atmosférica.

28. ALTURA DEL POLO CELESTE Y LATITUD GEOGRÁFICA. — La importante proposición que pasamos a enunciar, permite determinar la latitud geográfica de cualquier lugar de la Tierra, mediante observaciones estelares.

TEOREMA. — *La altura h del polo celeste sobre el horizonte, es igual a la latitud geográfica φ del lugar de observación.*

Sea L un lugar de la Tierra (fig. 21), cuyo Ecuador es ee' . El eje terrestre pp' , prolongado, determina sobre la esfera celeste que debe, en este caso, considerarse de radio infinito, los polos de la misma P_s y P_n . Trazando la vertical zT del lugar L , el ángulo LTe , nos da la latitud φ de L . Luego (20):

$$\varphi = \text{áng. } LTe.$$

Por otra parte, dirigiendo desde L la visual al polo P_s , dicha visual dadas las dimensiones de la esfera celeste, será paralela al eje del mundo, y en consecuencia perpendicular a la traza ee' del

Ecuador sobre el meridiano Lpp' del lugar L . Luego, el ángulo h , altura del polo celeste sobre el horizonte, tiene sus lados respectivamente perpendiculares a los del ángulo φ , ya que la vertical es normal al horizonte. En consecuencia:

$$h = \varphi.$$

ADVERTENCIAS

I. En lo sucesivo en aquellas figuras en que el punto de vista se encuentre en el Norte destacaremos esa circunstancia, al pie de la misma, con las iniciales N. D. (Norte delante); si en cambio el punto de vista está en el Sur lo indicaremos así: S. D. El alumno debe acostumbrarse

a utilizar indistintamente uno u otro punto de vista en sus representaciones gráficas.

II. Estimamos conveniente, para evitar pesadas repeticiones relativas a referencias comunes en las distintas figuras que se sucederán en adelante, adoptar (dentro de lo posible) una notación fija para puntos, líneas, círculos, planos, ángulos y arcos fundamentales, a los cuales, salvo advertencia en contra, asignaremos las significaciones que siguen:

T . — Tierra, centro de la esfera celeste.

P_s y P_n . — Polos celeste Sur y Norte, respectivamente.

$P_s P_n$. — Eje del mundo.

EE' . — Ecuador celeste (plano, círculo máximo o traza sobre otro plano).

z y n . — Cenit y nadir.

zn . — Vertical del lugar de observación.

HH' . — Horizonte del observador (plano, círculo, línea o traza sobre otro plano).

SN . — Meridiana, rumbo Norte - Sur.

EO . — Rumbo Este - Oeste.

X e Y . — Abscisa y ordenada esférica en todos los sistemas de coordenadas.

$zP_s nP_n$. — Meridiano del lugar (plano, círculo o circunferencia).

φ . — Latitud terrestre o geográfica del lugar.

Δ . — Colatitud del lugar.

α . — Azimut de un astro o de un punto cualquiera del Cielo o de la Tierra.

h . — Altura de un astro o de un punto cualquiera del Cielo o de la Tierra.

Z . — Distancia cenital de un astro o de un punto cualquiera del Cielo o de la Tierra.

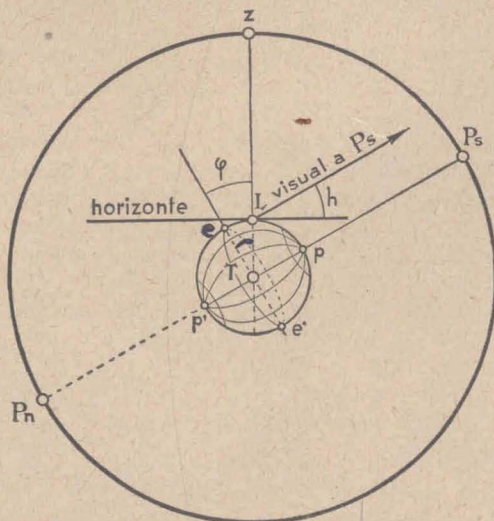


Fig. 21. — Altura h del polo celeste y latitud.

CAPITULO SEGUNDO

LEYES Y CONSECUENCIAS DEL MOVIMIENTO DIURNO

29. DIA ESTELAR O SIDEREO. SU DURACION. — En el par. 7, vimos que el movimiento aparente diurno de la esfera celeste en el sentido retrógrado, es consecuencia inmediata de la rotación de la Tierra en el sentido directo. Deducimos que la duración de ambos movimientos, el real de la Tierra, y el aparente de la esfera celeste, es la misma.

Es evidente que dicho tiempo es el mismo que transcurre entre dos pasos consecutivos de una estrella, por un determinado semimeridiano (17). Enfoquemos entonces con un anteojo una cierta estrella al pasar por el semimeridiano del lugar que suponemos conocido, y anotemos la hora. Dejando fijo el anteojo, esperamos en la noche siguiente, el instante en que la misma estrella vuelva a ubicarse en el centro del retículo, y notaremos que entre una y otra observación han transcurrido 23 horas 56 minutos (aprox.), de nuestros relojes. Repitiendo la operación en otras fechas y lugares, se llega siempre al mismo resultado.

El tiempo empleado por la Tierra en su rotación, o lo que es igual, el empleado por la esfera celeste o una cualquiera de sus estrellas en el movimiento aparente diurno, se llama día estelar, o más comúnmente, día sidéreo o sideral. Lo definiremos en la siguiente forma:

Día estelar, o sidéreo, es el tiempo que emplea una estrella entre dos culminaciones consecutivas en un mismo semimeridiano.

Se le fracciona en 24 horas divididas en minutos y segundos siderales. Cada hora sideral equivale a 59 minutos 50 segundos de nuestros relojes, resultado fácil de obtener considerando que 24 horas siderales son 23 horas 56 minutos de los relojes comunes.

30. LEYES DEL MOVIMIENTO DIURNO. — Las características que venimos estudiando sobre el movimiento aparente de la esfera celeste y de todos sus astros, conducen a enunciar las leyes que rigen a tales movimientos. El ecuatorial (v. par. 48), es el instrumento que conduce a verificarlas.

PRIMERA LEY: *El día estelar o sidéreo es constante en duración.*

SEGUNDA LEY: *El recorrido diurno de cada astro es un paralelo celeste.*

Esta ley puede comprobarse prácticamente por fotografía (figura 9) o con el ecuatorial (fig. 22) instrumento parecido a un teodolito inclinado cuyo círculo azimuthal se ha llevado a coincidir con el ecuador celeste, de modo que el círculo vertical de aquél se habrá transformado en un círculo horario o de declinación en el ecuatorial, y las almicantradas (14) en paralelos. Los ecuatoriales

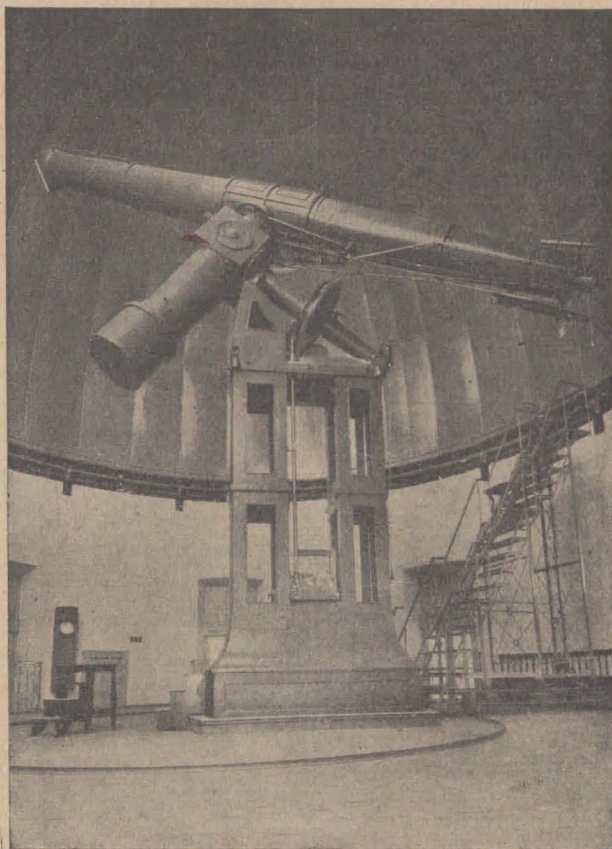


Fig. 22. — El ecuatorial del Observatorio Nacional de La Plata.

de los observatorios astronómicos están provistos de un mecanismo de relojería que, actuando sobre el anteojó, obliga al eje de éste a describir en un día sideral una superficie cónica de revolución que intercepta a la esfera celeste según uno de sus paralelos. En tales condiciones notamos que cualquier estrella enfocada por el ecuatorial, permanece constantemente fija en el campo del anteojó, lo que verifica la segunda ley.

Si el astro enfocado fuera errante, su movimiento propio se hará perceptible por un desplazamiento respecto a las estrellas próximas que aparecerán fijas en el campo del instrumento *.

TERCERA LEY: *La velocidad angular en el movimiento diurno, es constante e igual a 15° por hora sideral.* El control de esta ley debe verificarse, como en la segunda, eligiendo por astro de referencia a una estrella. Se observará que una alidada solidaria al anteojo del ecuatorial, va recorriendo sobre el limbo graduado del ecuador del instrumento, arcos de 15° , 30° , 45° , 60° ... en 1, 2, 3, 4... horas siderales. Un reloj sideral puesto en movimiento en el instante de ser enfocado el astro, acusa los tiempos de aquellos recorridos.

CUARTA LEY: *Las velocidades lineales diurnas de los astros sobre sus paralelos, son distintas,* puesto que las longitudes de arcos de igual graduación de los distintos paralelos, son desiguales. Se comprende que las estrellas más veloces de la esfera celeste (en cuanto a velocidad lineal se refiere) son las ecuatoriales (una de las conocidas estrellas llamadas Tres Marías recorre aproximadamente el ecuador celeste); en cambio, las más lentas son las polares, α (alfa) de la Osa Menor en el cielo boreal, y σ (sigma) del Octante en el austral, que parecen inmóviles. La primera es muy útil para orientarse durante la noche, en los lugares donde es visible (todo el hemisferio norte de la Tierra).

Las cuatro leyes enunciadas, conducen a formular la ley general siguiente, relativa al movimiento estelar diurno:

Los movimientos diurnos de las estrellas son circulares, paralelos, uniformes, isócronos y de sentido retrógrado.

Se sigue que el cielo estrellado se comporta como una esfera rígida, rotando uniformemente alrededor de uno de sus diámetros (*eje del mundo*) en 23 h. 56 m. de nuestros relojes, o lo que es lo mismo, en 24 horas siderales.

31. VARIACIONES DIURNA Y ANUAL DEL ASPECTO DEL CIELO EN UN MISMO LUGAR DE LA TIERRA. — A consecuencia del movimiento diurno de la esfera celeste, cuyas leyes venimos de estudiar, el Cielo ofrece al observador en una misma noche, un aspecto cambiante ante el desfile continuo de astros, de los cuales unos se elevan sobre el horizonte del Este, a tiempo que otros bajan hacia el del Oeste.

Además, si se contempla desde un mismo lugar el Cielo en las distintas épocas del año, se notará que las constelaciones visibles en una determinada estación, dejan de serlo en la estación opuesta, obedeciendo el cambio al movimiento anual de traslación del planeta

* En realidad, los astros errantes, por pasar de uno a otro hemisferio celeste, van describiendo día tras día distintos paralelos, pero poco espaciados cuando son consecutivos, dando lugar, la composición del movimiento diurno con el propio, a una trayectoria helicoidal sobre la esfera celeste.

alrededor del Sol, cuyos detalles se estudian en otro lugar de este texto.

En resumen: podemos afirmar que la configuración del Cielo estrellado en un mismo lugar de la Tierra es variable por dos causas:

1º *Por la rotación de la Tierra en un día sideral* (variación diurna).

2º *Por la traslación del planeta en un año alrededor del Sol* (variación anual).

ASPECTO DEL CIELO SEGUN LA LATITUD: LAS TRES ESFERAS

32. INFLUENCIA DE LA LATITUD SOBRE EL ASPECTO DEL CIELO. — Afirma TOLOMEO en el "ALMAGESTO", que "*la Tierra es redonda de Norte a Sur*", en razón de haberse observado que trasladándose sobre la superficie del planeta en aquel sentido, van apareciendo por la región Sur del horizonte nuevas estrellas mientras desaparecen otras por la parte opuesta.

Esta importante observación demuestra que la latitud φ del lugar, juega un rol preponderante sobre la configuración que ofrece el cielo en todo cuanto se refiera a astros visibles.

33. ESTRELLAS CIRCUMPOLARES; CULMINACIONES. —

Para todo lugar terrestre, distinto del Ecuador, existen en el Cielo, estrellas que *no salen ni se ponen*, por recorrer sus paralelos celestes en el semiespacio superior al horizonte.

Tales estrellas, llamadas circumpolares, presentan la notable ventaja de poder ser enfocadas en sus pasos superior e inferior (17) por el meridiano, espaciados en 12 horas siderales (11 horas 58 minutos de nuestros relojes).

Esta condición de las estrellas circumpolares, da lugar a importantes determinaciones astronómicas.

34. ZONAS CELESTES PERPETUAMENTE VISIBLES E INVISIBLES PARA LA LATITUD φ . DECLINACION. —

Sea $zP_s nP_n$ (fig. 23) el meridiano del lugar de observación. La latitud de éste, φ , viene dada (28) por el arco HP_s que mide la altura del polo celeste P_s , respecto al horizonte HH' . Siendo EE' la traza del Ecuador sobre el meridiano, tracemos por H el paralelo HA cuya graduación es dada por el arco $HE' = 90^\circ - \varphi$, en valor absoluto.

La zona o casquete esférico del Cielo, comprendida entre el polo celeste P_s , y el paralelo HA , es la *zona perpetuamente visible* para la latitud φ , y las estrellas ubicadas en ella son circumpolares, por describir en su movimiento diurno, paralelos situados en su integridad en el semiespacio superior al horizonte.

Del mismo modo, trazando por H' el paralelo $H'B$, de igual graduación que el HA , pero en el hemisferio celeste opuesto al del observador, habremos delimitado otro casquete esférico $P_n H'B$, que es la zona *perpetuamente invisible* para la latitud dada, desde que los astros ubicados en ella efectúan su recorrido diurno debajo del horizonte del observador.

Se llama *declinación* δ (delta) de un astro, a su distancia angular al Ecuador, dada por la graduación del paralelo celeste que recorre en su movimiento diurno.

Se la mide de 0° a 90° , pudiendo ser austral o boreal en conformidad con el hemisferio que contiene al astro. Por convención, se consideran positivas a las declinaciones boreales, y negativas a las australes.

De lo expuesto, deducimos dos leyes relativas a las condiciones de perpetua visibilidad o invisibilidad de las estrellas del Cielo para un determinado lugar de la Tierra:

PRIMERA LEY: Una estrella es *perpetuamente visible* (circumpolar) para un lugar, si su declinación δ es superior al complemento de la latitud φ , siempre que δ y φ sean del mismo nombre (ambas australes o ambas boreales).

SEGUNDA LEY: Una estrella es *perpetuamente invisible* para un lugar, si su declinación δ es superior al complemento de la latitud φ , siempre que δ y φ sean de distinto nombre (una boreal y otra austral).

En virtud de dichas leyes, para las localidades ecuatoriales ($\varphi = 0^\circ$) no existen estrellas circumpolares ni estrellas invisibles. En cambio, las mismas demuestran que desde un polo de la Tierra, ($\varphi = \pm 90^\circ$) sólo se contemplan estrellas circumpolares.

35. EL CIELO VISTO DESDE UNA LATITUD INTERMEDIA (ESFERA OBLICUA). — En la figura 24 puede apreciarse a la esfera celeste orientada para la latitud $\varphi = -35^\circ$, muy cercana a las de Buenos Aires, La Plata, Montevideo, Santiago de Chile, Cabo de Buena Esperanza, Sidney, etc.

El paralelo celeste de cada estrella va designado por mm' , correspondiendo los puntos m y m' a las culminaciones superior e inferior de cada astro en el meridiano $zP_n nP_n$ del lugar. Con s y p vienen anotados los puntos de salida y puesta de dichos astros.

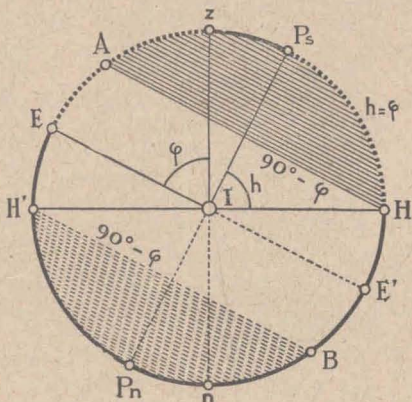


Fig. 23. — Zonas de perpetua visibilidad y de perpetua invisibilidad.

Se han trazado además los paralelos HA y $H'B$, que delimitan las zonas de perpetua visibilidad o invisibilidad integradas por los casquetes esféricos $P_s HA$ y $P_n H'B$ respectivamente. La graduación de dichos paralelos (igual a la declinación de los astros que los

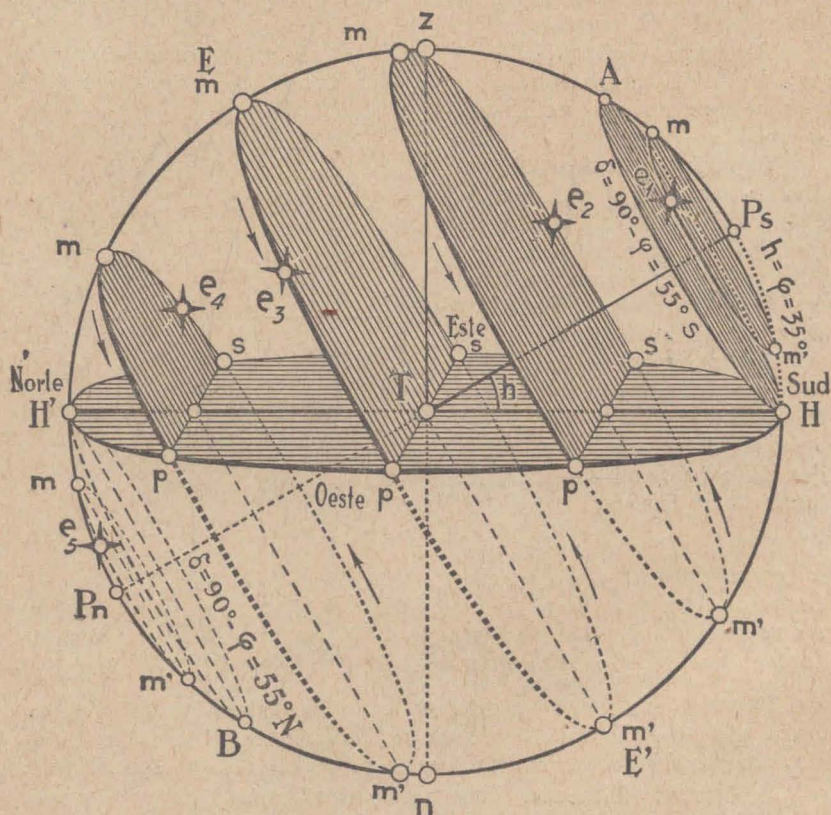


Fig. 24. — Recorrido diario de las estrellas para la latitud $\varphi = 35^\circ$.

recorren) es (34) : $\delta = 90^\circ - \varphi$, en este caso, $90^\circ - 35^\circ = 55^\circ$ (austral para el primero, y boreal para el segundo).

Por características afines en el movimiento diario, clasificamos a las estrellas visibles desde la latitud φ en cinco tipos:

1º *Estrellas cuya declinación es mayor que el complemento de la latitud, pero del mismo nombre.*

Estas estrellas, como la e_1 , son circumpolares y por consiguiente siempre visibles. En la esfera que estudiamos lo son aquellas en que $\delta > 55^\circ$ austral.

2º *Estrellas cuya declinación está comprendida entre $90^\circ - \varphi$, y 0° , siendo δ y φ de un mismo nombre.*

Una cualquiera de estas estrellas e_2 , recorre en la parte superior del horizonte entre la salida y la puesta, un arco se_2p de paralelo celeste, superior a 180° , de modo que diariamente permanece sobre el horizonte durante más de 12 horas siderales. Para la latitud apuntada están en esta condición las estrellas con declinación austral inferior a 55° .

3º Estrellas de declinación nula.

Toda estrella de este tipo (ecuatorial) como la e_3 , recorre sobre el horizonte entre la salida y la puesta, un arco $se_3p = 180^\circ$, por lo que permanece sobre el horizonte durante 12 horas siderales.

4º Estrellas cuya declinación de nombre contrario a la latitud, está comprendida entre 0° y $90^\circ - \varphi$.

Tales estrellas, como la e_4 , recorren sobre el horizonte un arco se_4p , inferior a 180° , y permanecen sobre el mismo menos de 12 horas siderales entre sus salidas y sus puestas. En la latitud de la figura 26, se hallan en este caso las estrellas cuya declinación está comprendida entre 0° y 55° Norte.

5º Estrellas con declinación de nombre contrario a la latitud, superior a $90^\circ - \varphi$.

Estas estrellas, como la e_5 , permanecen constantemente bajo el horizonte y son invisibles para las localidades de latitud φ . Para la latitud de 35° Sur, se encuentran en esa condición las estrellas con declinación boreal superior a 55° .

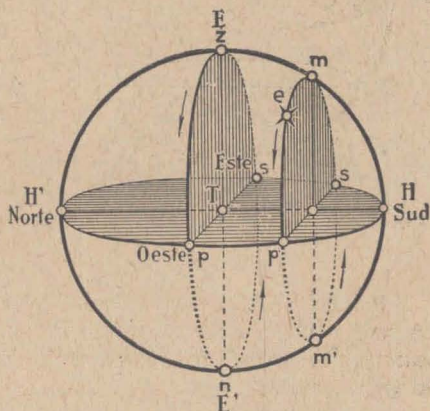


Fig. 25 — Recorrido diurno de las estrellas, visto desde el Ecuador.

36. EL CIELO VISTO DESDE EL ECUADOR (ESFERA RECTA). — En el Ecuador la latitud del observador es $\varphi = 0^\circ$, y en virtud del teorema visto en parágrafo 28, los polos celestes P_s y P_n son los puntos Sur y Norte del horizonte, con lo que el eje del mundo es la meridiana del lugar. El ecuador celeste EpE' , será plano vertical por contener a la vertical zn , y por consiguiente los paralelos al ser normales al horizonte, quedan divididos por éste en dos partes iguales (fig. 25). Cualquier estrella e del Cielo, describe entre su salida s , y su puesta p , una semicircunferencia en cuyo recorrido emplea 12 horas siderales.

No hay estrellas circumpolares ni de invisibilidad perpetua, porque la declinación $90^\circ - \varphi$, (34) corresponde a los polos celestes.

37. EL CIELO VISTO DESDE UN POLO DE LA TIERRA (ESFERA PARALELA).— La figura 26 representa la esfera celeste correspondiente al observador situado en el Polo Sur de la Tierra. Los polos celestes P_s y P_n , son el cenit y el nadir, respectivamente,

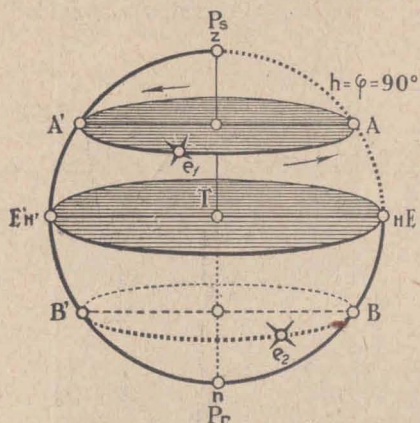


Fig. 26. — Recorrido diario de las estrellas, visto desde el Polo Sur.

por cuya razón el eje del mundo es la vertical del observador. En estas condiciones, el ecuador celeste EE' , es el horizonte astronómico y las órbitas son *almicantáradadas* (14). Las estrellas visibles, que son todas las del hemisferio del observador, como la e_1 , son circumpolares, y las del hemisferio opuesto, como e_2 , son invisibles eternamente (a no ser las inmediatas al Ecuador que al ser elevadas por la refracción en $33'$, se hacen visibles si distan de dicho plano menos que esa magnitud).

38. DETERMINACION DEL MERIDIANO; EL GNOMON.— La más sencilla determinación de la posición del meridiano (17) se obtiene por el método del gnomon (del lat. gnómon, del gr. gnomon, de gignosko, conocer).

Por la mañana, los cuerpos iluminados por el Sol, proyectan sombras hacia el Oeste, y después del mediodía hacia el Este. Dichas sombras, a partir de la salida del Sol, van acortándose a medida que el astro se acerca a su culminación superior que alcanza a mediodía, donde toman su longitud mínima. Por la tarde se repite el mismo proceso en sentido inverso, pero, a iguales alturas del Sol, corresponden iguales sombras en longitud. Como el movimiento del Sol es sensiblemente constante en velocidad angular a lo largo del día, se sigue, que disponiendo una varilla AB fig. 27) normal a un plano horizontal α , se obtendrán sombras de igual longitud a intervalos de tiempos iguales, tomados antes y después del mediodía. Luego, si a cierta hora de la mañana registramos sobre el plano α la sombra BC en dirección y longitud, llegará un instante por la tarde, en que la sombra de la varilla será BD , igual en longitud a BC . Registrándola sobre el plano α , se forma el ángulo CBD , cuya

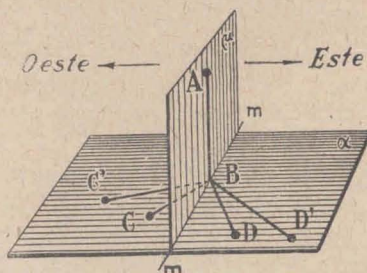


Fig. 27. — Método del Gnomon.

bisectriz mm es la meridiana (18). El plano μ (μ) determinado por ésta y la vertical AB , es el meridiano del lugar.

Repitiendo la operación con otros pares de sombras de igual longitud $BC' = BD'$..., etc., tomadas a distintas horas, se consigue controlar y corregir el resultado obtenido, que por otra parte es sólo aproximado.

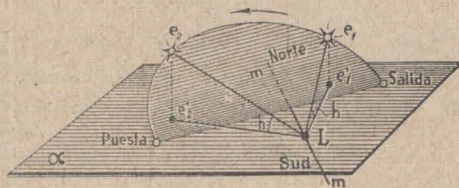


Fig. 28. — Método de las alturas correspondientes.

39. DETERMINACION DEL MERIDIANO; ALTURAS CORRESPONDIENTES. — El meridiano

(19) es plano de simetría en los recorridos de los astros, los cuales adquieren su máxima altura sobre el horizonte del lugar en la culminación superior (17).

Si en un instante dado un astro ocupa la posición e_1 al Este de aquel plano, algún tiempo después ocupará la posición simétrica e_2 , al Oeste, y en tal instante, y únicamente en él, la altura h del astro será la misma que la registrada en e_1 .

Dos alturas iguales de un mismo astro, para distintas posiciones de éste en el Cielo, se llaman alturas correspondientes.

Las alturas correspondientes de una estrella cualquiera, permiten determinar el meridiano del lugar L de observación (fig. 28). Se dirigen las visuales Le_1 y Le_2 al astro cuando ocupa las posiciones e_1 y e_2 , equidistantes del horizonte α y se proyectan dichas visuales sobre el último según Le'_1 y Le'_2 . La bisectriz mm del ángulo $e'_1Le'_2$, es la meridiana o línea Norte-Sur, y el plano vertical que la contiene será el meridiano del lugar L .

La determinación se lleva a cabo con el teodolito (24).

40. DETERMINACION DE LA DISTANCIA CENITAL DEL POLO CELESTE; DIRECCION DEL EJE DEL MUNDO. —

1. Podrá fijarse para un lugar la dirección del eje del mundo, conociendo la distancia cenital Z del polo celeste correspondiente a su hemisferio.

Determinado el meridiano (39), se ubica en el mismo el círculo vertical del teodolito (24) y se aguardan con el anteojo del aparato las dos culminaciones diurnas de una estrella circumpolar conocida (33).

Cuando ésta (fig. 29) efectúa su paso superior en e_1 , se la podrá enfocar con el anteojo, leyéndose a continuación sobre el limbo graduado del círculo vertical, el valor Z_1 de su distancia cenital.

Después de 12 horas siderales, vuelve a ser enfocada la estrella en e_2 y podrá obtenerse su distancia cenital Z_2 , en la culmina-

ción inferior. El valor de Z , distancia cenital del polo celeste P_s , es la semisuma de las lecturas obtenidas, es decir:

$$Z = \frac{Z_1 + Z_2}{2}.$$

Luego: la distancia cenital del polo celeste, es la semisuma de las distancias cenitales de cualquier estrella circumpolar tomadas en los instantes de sus pasos superior e inferior por el meridiano del lugar.

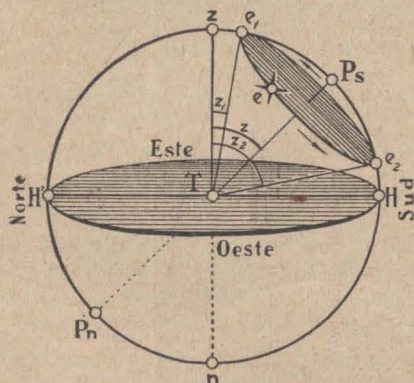


Fig. 29. — Distancia cenital del polo celeste.

2. Haciendo girar el ante-ojo del teodolito sobre el círculo vertical, hasta que su nonius permita leer sobre el limbo graduado el valor obtenido para Z , el ante-ojo estará dirigido al polo celeste P_s , y su eje óptico coincidirá en dirección con el eje del mundo.

noche cerrada tenga una duración

Claro está que este método podrá ser utilizado solamente en aquella época del año en que la superior a 12 horas siderales.

41. DETERMINACION DE LA LATITUD DE UN LUGAR. —

Obtenida como acaba de verse la distancia cenital Z del polo celeste, la altura h de éste sobre el horizonte será:

$$h = 90^\circ - Z$$

y por consiguiente (según teorema de parágrafo 28) el valor de la latitud es:

$$\varphi = h = 90^\circ - Z.$$

42. DISTANCIA CENITAL DE LA INTERSECCION DEL MERIDIANO DEL LUGAR CON EL ECUADOR. — El meridiano del lugar $zP_s nP_n$ intercepta a la esfera celeste según una circunferencia máxima que corta al Ecuador en los puntos diametralmente opuestos E y E' (fig. 30). De dichos puntos inte-

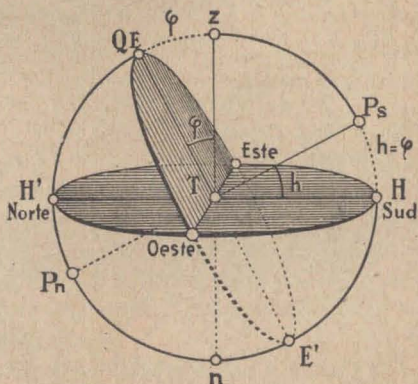


Fig. 30. — Intersección del semimeridiano con el Ecuador.

El meridiano del lugar $zP_s nP_n$ intercepta a la esfera celeste según una circunferencia máxima que corta al Ecuador en los puntos diametralmente opuestos E y E' (fig. 30). De dichos puntos inte-

resa el superior al horizonte Q , que como se verá en el parágrafo 44, se toma como origen en el sistema horario de coordenadas ecuatoriales.

La distancia cenital de Q , está dada por el arco de meridiano QZ que mide la latitud φ del lugar y en consecuencia:

La distancia cenital de la intersección del semimeridiano de un lugar con el Ecuador, es igual a la latitud geográfica del lugar, o lo que es lo mismo, a la altura del polo celeste sobre el horizonte.

COORDENADAS ECUATORIALES

43. EQUINOCIOS: PUNTO VERNAL. — En el parágrafo 4, al ocuparnos de los astros errantes, se hizo mención de un movimiento del Sol entre los astros fijos (estrellas) en el sentido directo (18). Se dijo también, que la velocidad angular de ese movimiento es aproximadamente de 1° por día. En virtud de él aparece el Sol describiendo en un año una circunferencia máxima sobre la esfera celeste, denominada *eclíptica*. Se verá más adelante, que el movi-

miento del Sol sobre dicha circunferencia es consecuencia inmediata del movimiento real de traslación de la Tierra alrededor de aquel astro.

La eclíptica S_dYS_jY' (fig. 31), corta a la línea del ecuador celeste en dos puntos diametralmente opuestos, llamados equinoccios (del lat. æquinoctium, de æquus, igual y nox, noche). Uno de ellos, Y , es el *equinoccio de marzo*, o *punto vernal* (antes se llamó también punto *Aries*) y el centro del Sol pasa por él hacia el 21 de marzo de cada año. El otro, Y' es el *equi-*

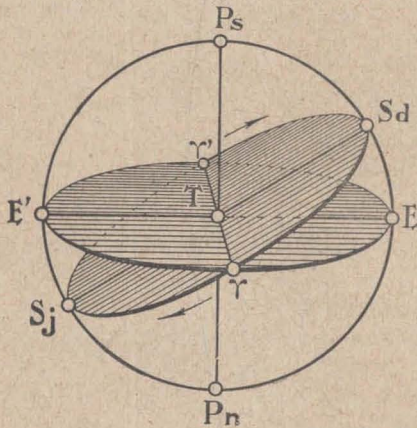


Fig. 31. — Punto vernal.

noccio de setiembre o *punto libra*, y es alcanzado por el centro del Sol hacia el 22 ó 23 de setiembre.

Las flechas de la figura indican el sentido directo del desplazamiento anual del Sol.

44. PRIMER SISTEMA DE COORDENADAS ECUATORIALES: ANGULO HORARIO t Y DECLINACION δ . — En este sistema, llamado también *horario*, la posición del astro en un instante dado, es referida al Ecuador EE' como plano fundamental, y al punto Q (42), intersección superior de aquel plano con el meridiano del lugar, como origen. En estas condiciones el eje fundamental, es el eje del mundo $P_s P_n$, tomándose siempre a P_n como polo principal para la determinación del sentido (18).

Se llama *ángulo horario* t de un astro A (fig. 32), en un *determinado instante*, a su *abscisa esférica* X relativa al Ecuador EE' y al punto de origen Q . Será, entonces:

$$t = X = \text{arc. } QA'.$$

Se cuenta de 0° a 360° a partir de Q en el sentido retrógrado (flecha 1), que es el del movimiento diurno, o bien de 0 a 24 horas, correspondiendo 1h a 15° de arco (30).

El ángulo horario de toda estrella en su culminación inferior (17), es:

$$t = 180^\circ = 12\text{h.}$$

Llamamos *declinación* δ de un astro A , a su *ordenada esférica* Y referida al Ecuador EE' . Se tendrá:

$$\delta = Y = \text{arc. } AA'.$$

Su valor varía entre 0° y $\pm 90^\circ$, siendo positivas las boreales y negativas las australes (por convención). La de-

clinación δ de una estrella es invariable, por describir aquella constantemente el mismo paralelo celeste: la graduación de este paralelo es el valor de δ .

45. DISTANCIA POLAR δ' .—Es el ángulo comprendido entre la visual TA dirigida al astro (fig. 32) y el eje del mundo P_sP_n , siendo dada por el arco de semicírculo horario que va del astro A , al polo principal. En la figura el valor de δ' lo da el arco AP_n .

Se mide a partir del polo principal, de 0° a 180° y es siempre positiva.

La declinación δ , y la distancia polar δ' , son magnitudes complementarias, de modo que:

$$\delta + \delta' = 90^\circ \quad \therefore \quad \delta = 90^\circ - \delta' \quad \text{y} \quad \delta' = 90^\circ - \delta.$$

Si el valor de δ es negativo (caso de la fig. 32), la distancia polar δ' será superior a 90° . Al polo celeste P_s corresponde: $\delta' = 180^\circ$, de modo que la Polar Sur, tendrá una distancia polar muy próxima a dicha magnitud.

Es muy común reemplazar en los sistemas de coordenadas ecuatoriales, la declinación δ por la distancia polar δ' .

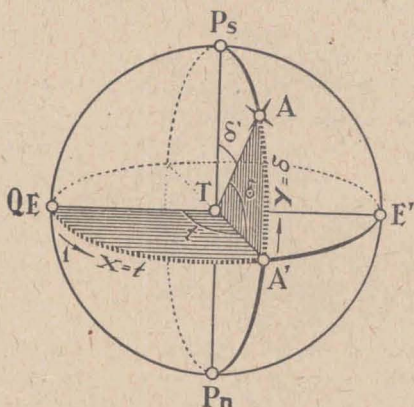


Fig. 32. — Ángulo horario y declinación.

46. TIEMPO SIDERAL DE UN LUGAR. ORIGEN DEL DÍA SIDEREO. — *El tiempo sideral es el medido en días siderales y sus fracciones, horas, minutos y segundos.*

Ya se vió en par. 30, que el día sideral es constante en duración. En tal carácter, constituye la unidad ideal para las medidas temporales, y el astro regulador de esta especie de tiempo, puede ser una cualquiera de las estrellas del Cielo, desde que todas emplean el mismo tiempo entre dos culminaciones consecutivas, superiores o inferiores.

Considerando que el punto vernal Υ (43) se mueve sobre la esfera celeste en igual forma que las estrellas en el movimiento diurno, se ha convenido en tomar a dicho punto como origen y regulador del tiempo sideral.

Un reloj que mida este tiempo se llama RELOJ SIDERAL y debe indicar 0h0m0s en el instante en que culmina superiormente al punto vernal.

47. RELACION ENTRE EL TIEMPO SIDERAL T_s Y EL ANGULO HORARIO θ DEL PUNTO VERNAL. — Si designamos por θ (theta) al ángulo horario (44) del punto vernal Υ , teniendo en cuenta que este punto se desplaza en el movimiento diurno, con velocidad angular de 15° por hora sideral (30), resultará que en los instantes en que θ , para un lugar de la Tierra, va tomando los valores $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, \dots$, etc., el reloj sideral irá acusando 0h, 1h, 2h, 3h, $\dots$, etc., de modo que si se designa por T_s al tiempo sideral, se verificará siempre:

$$T_s = \theta,$$

es decir, que: *el tiempo sideral T_s de un lugar cualquiera de la Tierra, en un determinado instante, es igual al ángulo horario θ del punto vernal en dicho instante.*

Son fáciles de obtener las equivalencias siguientes:

1°	de ángulo horario	corresponde a	4m	siderales
1'	"	"	"	4s
1m	"	tiempo sidéreo	"	15' de ángulo horario
1s	"	"	"	15" " " "

48. ECUATORIAL. — En el párrafo 30, se hizo mención de este instrumento, al hablar de la verificación de las leyes del movimiento diurno. Como se dijo, no es más que un teodolito inclinado, uno de cuyos círculos está dispuesto según el plano del Ecuador, y el otro, constantemente normal al anterior, será siempre un círculo horario o de declinación (12). La figura 33 lo muestra esquemáticamente.

Omitimos la descripción del esquema, puesto que es en un todo análoga a la ya vista para el teodolito (24). Como se comprenderá,

$P_s P_n$ es la dirección del eje del mundo, y EE' la traza del ecuador celeste sobre un círculo horario.

Con este instrumento pueden determinarse las coordenadas ecuatoriales horarias de cualquier astro, en la forma vista para la determinación de las coordenadas horizontales (25) con el teodolito.

49. DETERMINACION DEL ANGULO HORARIO t Y LA DISTANCIA POLAR δ' DE UN ASTRO. —

Ubíquese el círculo D del ecuatorial en el meridiano del lugar. Hágase girar el limbo graduado del círculo ecuatorial E_1 , hasta que el micrómetro del extremo R de la alidada marque 0° . En estas condiciones, se fija el círculo E_1 , actuando sobre sus tornillos de presión, y se imprime un movimiento rotatorio alrededor de $P_s P_n$, al círculo horario D , en el sentido retrógrado, hasta que el anteojo LL' , inclinado convenientemente pueda enfocar al astro. Conseguido este resultado, y una vez fijos el círculo D y el anteojo, el micrómetro de la alidada móvil R , permite la lectura directa del ángulo horario del astro sobre el limbo de E_1 , mientras que el que acompaña al objetivo L' del anteojo, nos da sobre el limbo del círculo D , el valor de la distancia polar δ' del astro (referida al polo principal P_n) cuyo complemento, negativo en el caso de la figura 33, por ser $\delta' > 90^\circ$, es la declinación buscada.

Como ya se dijo (44), las declinaciones negativas corresponden a los astros australes.

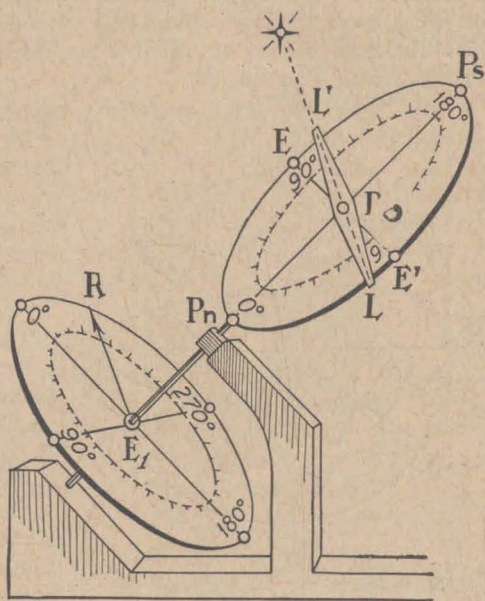


Fig. 33. — Esquema del ecuatorial.

50. SEGUNDO SISTEMA DE COORDENADAS ECUATORIALES: ASCENSION RECTA α , Y DECLINACION δ . —

Una de las coordenadas vistas en el primer sistema ecuatorial, el ángulo horario t , sólo es válida para la localidad de observación, por cuanto el origen Q adoptado (44) si bien es fijo para cada semimeridiano, no lo es, sin embargo, con respecto al ecuador celeste considerado

como círculo fijo del Cielo, desde que puede ser un punto cualquiera de éste.

En el sistema de coordenadas que pasamos a estudiar, se toma como origen al punto vernal Y (43) que con toda aproximación puede considerarse como astro ficticio fijo sobre el ecuador celeste.

Las coordenadas obtenidas en este sistema, llamado también *absoluto*, son válidas en el instante de observación, para todos los lugares de la Tierra.

Se llama *ascensión recta de un astro*, a su *abscisa esférica* referida al Ecuador, como plano fundamental, y al punto vernal Y , como origen. Designándola por α (alfa) tendremos de figura 34:

$$\alpha = X = \text{arc. } YA'.$$

Se la mide a partir de Y en el sentido directo (18), pudiendo variar de 0° a 360° , o bien de 0h a 24h, correspondiendo 1h a cada 15° .

En cuanto a la *declinación* δ , dada por la ordenada esférica $Y = \text{arc. } AA'$, ya ha sido estudiada en el primer sistema de coordenadas ecuatoriales (44).

Fig. 34. — Ascensión recta α y declinación δ

En la figura 34 se ha trazado también la eclíptica $YS_1Y'S_2$, a fin de determinar los equinoccios Y y Y' . La flecha 1 corresponde al sentido directo de la medición.

51. RELACION ENTRE LA HORA SIDERAL DE UN LUGAR Y LA ASCENSION RECTA DEL ASTRO QUE CULMINA.

— Suponiendo astros cuyas ascensiones rectas (50) fueran de 1h, 2h, 3h..., etc., dichos astros irán culminando 1h, 2h, 3h..., etc., siderales después que el punto Y , es decir, cuando el reloj sideral acusa los tiempos de las respectivas ascensiones rectas.

Se deduce que en el instante de culminación superior de cualquier astro, se verifica:

$$T_s = \theta = \alpha,$$

donde α es la ascensión recta del astro que culmina.

Consecuencia: La hora sideral de un lugar en un instante determinado, está dada por la ascensión recta del astro que culmina superiormente en ese instante.

Ejm.: Sirio culmina en un lugar cualquiera, a las 6h42m30s siderales, puesto que la ascensión recta de dicha estrella es:

$$\alpha = 6h42m30s.$$

52. MEDIDA DE LA DECLINACION δ DE UN ASTRO. —

Se puede medir la declinación (34; 44) de un astro, con ayuda del teodolito, tomando la distancia cenital Z (25) en el instante de culminación superior (17), para lo cual previamente habrá que ubicar el círculo vertical del instrumento en el meridiano del lugar (39). Se supone conocida la latitud φ del operador, y si no lo fuera se la determina (41).

En la figura 35, $P_s z P_n$ es el semimeridiano del lugar, por pasar por los polos celestes y contener al cenit z .

Los distintos astros pueden culminar en él (culminación superior) en las tres posiciones que siguen:

1º Entre el polo celeste P_s y el cenit z . En tal supuesto, astro e_1 , se tiene:

$$\delta = \text{arc. } e_1 E = \text{arc. } Ez + \text{arc. } ze_1.$$

Recordando que: $\text{arc. } Ez = \varphi$, latitud del lugar; y $\text{arc. } ze_1 = Z$, distancia cenital del astro (23), resulta:

$$\delta = \varphi + Z. \quad [1]$$

2º Entre el cenit z y el Ecuador. Siendo e_2 el astro, obtenemos:

$$\delta = \text{arc. } e_2 E = \text{arc. } Ez - \text{arc. } e_2 z,$$

o sea, puesto que $\text{arc. } Ez = \varphi$; y $\text{arc. } e_2 z = Z$:

$$\delta = \varphi - Z. \quad [2]$$

3º Entre el Ecuador y el horizonte. Para el astro e_3 situado en esas condiciones, deducimos:

$$\delta = \text{arc. } e_3 E = \text{arc. } e_3 z - \text{arc. } Ez = -(\text{arc. } Ez - \text{arc. } e_3 z),$$

y reemplazando por sus valores los arcos cerrados en paréntesis:

$$\delta = -(\varphi - Z). \quad [3]$$

Los resultados [1], [2] y [3] caben dentro de la fórmula general siguiente:

$$\delta = \pm \varphi \pm Z.$$

En los casos 1º y 2º, los astros pertenecen al hemisferio del observador (austral en la figura), y en el 3º al hemisferio opuesto.

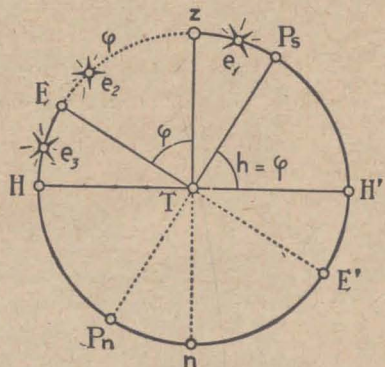


Fig. 35. — La relación: $\delta = \pm \varphi \pm Z$.

53. ANTEOJO MERIDIANO.— En los observatorios astronómicos se medían con relativa precisión las coordenadas ecuatoriales, utilizando el anteojo meridiano y el llamado círculo mural, este último en la determinación de declinaciones, pero en la actualidad, el gran círculo meridiano hace las veces de ambos instrumentos a un tiempo.

El instrumento está constituido por un gran anteojo cuyo eje

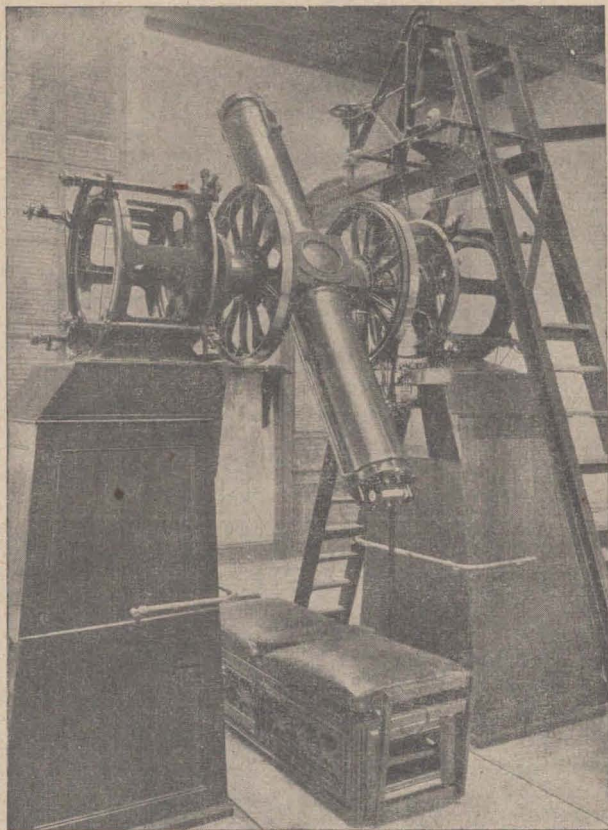


Fig. 36. — Gran círculo meridiano de Repsold, del Observatorio Nacional de La Plata.

óptico es constantemente una recta del meridiano del lugar. Dicho anteojo es móvil alrededor de un eje horizontal normal al meridiano, y por ende al eje óptico del aparato.

El retículo, colocado en el plano focal del objetivo (fig. 37), es plenamente visible durante el día, y para las observaciones nocturnas se le ilumina artificialmente mediante el empleo de una minúscula lamparilla eléctrica, interna al tubo del anteojo. Está

constituido por una serie de hilos delgadísimos, dispuestos dos de ellos horizontalmente, y 5 ó 7, normalmente a los anteriores. De éstos, el central mm' , es la traza del meridiano sobre el plano del retículo. Puede agregarse, que tanto los hilos horizontales, como los normales a ellos, son equidistantes y simétricos dos a dos con respecto al centro O .

Un reloj sidereal sirve de accesorio indispensable al aparato en sus determinaciones meridianas.

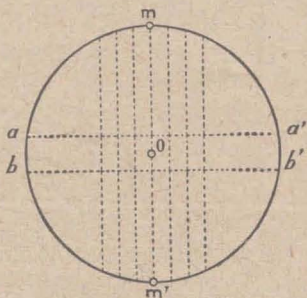


Fig. 37. — Retículo.

54. DETERMINACION MERIDIANA DE LA ASCENSION RECTA α DE UN ASTRO.—Vimos en el par. 51, que la hora sidereal de un lugar en un instante dado es proporcionada por la ascensión recta α del astro que culmina.

Viceversa: la ascensión recta α de un astro, es igual a la hora sidereal del instante de culminación superior.

Para obtenerla, se aguarda el paso del astro por el centro del retículo del, anteojo meridiano, y en el instante preciso, el operador actuando sobre un botón conectado con el reloj sidereal, hace que un cronógrafo registre la hora del paso, que será el valor de α expresado en tiempo sidéreo.

Para obtener mayor exactitud en las determinaciones, suelen tomarse las horas en que el astro cruza por los hilos normales del retículo haciéndose después la media aritmética de todas ellas.

55. TRANSFORMACION DE COORDENADAS ECUATORIALES EN HORIZONTALES Y VICEVERSA.—La figura 38 representa en negro el horizonte con sus almicantradas y sus semicírculos verticales; en rojo el Ecuador, los paralelos celestes y los semicírculos horarios tomados todos de diez en diez grados. La inclinación del eje del mundo SN es de 35° por lo cual la figura corresponde a nuestra latitud (28°).

Por medio de esta figura es fácil resolver con relativa aproximación una serie de problemas que explicaremos a continuación con ejercicios numéricos.

1º La altura de un astro es de 30° , su azimut de 120° ; hallar su ángulo horario y su declinación. Se ve que donde se corta la almicantrada de 30° con el semicírculo vertical de 120° de azimut, se cortan también, aproximadamente, el semicírculo horario de 49° con el paralelo celeste de declinación igual a 4° Norte. Luego: $t = 49^\circ$, y $\delta = 4^\circ$.

2º Siendo $t = 100^\circ$ y $\delta = -50^\circ$, hallar la altura y el azimut. Procediendo análogamente se encuentra: altura $h = 20^\circ$, azimut $a = 43^\circ$.

3º Hallar los ángulos horarios de salida y puesta de una estrella cuya declinación es $\delta = 40^\circ$ N. Determinar, además los azimutes de salida y puesta así como el tiempo que la estrella permanece sobre

el horizonte. Angulo horario en la puesta es: $t = 54^\circ = 3h36m$; a la salida: $t = -54^\circ = 306^\circ$. Azimut en la puesta: $a = 142^\circ$; a la salida: $a = 218^\circ$. Tiempo que permanece sobre el horizonte: $2 \times 3h36m = 7h12m$.

4º ¿Qué ángulos horarios y qué altura tiene un astro cuya declinación es $\delta = -20^\circ$ cuando su azimut toma los valores $a = 90^\circ$

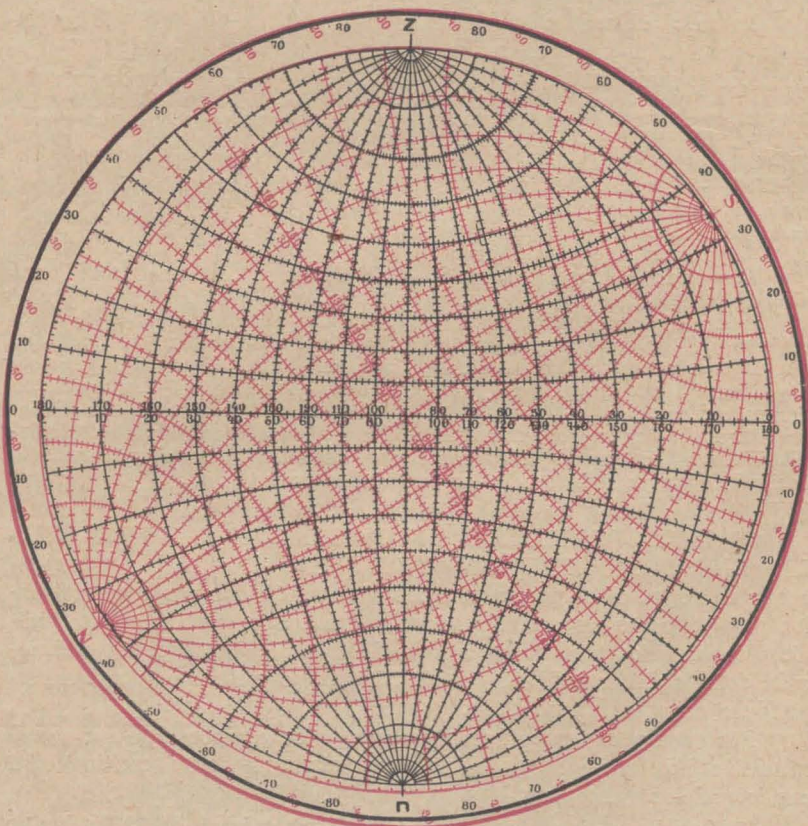


Fig. 38. — Transformación de coordenadas ecuatoriales a horizontales y viceversa para la latitud 35° S.

o $a = 270^\circ$? Angulos horarios: $t = 60^\circ$ y $t' = -60^\circ = 300^\circ$; altura: $h = 36^\circ$.

5º La altura de un astro es $h = 60^\circ$ y su ángulo horario $t = 2h$ (30°). Hallar su azimut y su declinación. Azimut: $a = 34^\circ$ y declinación: $\delta = -57^\circ$.

6º Siendo la declinación $\delta = 50^\circ$ y el ángulo horario $t = 4h$ (60°), hallar la altura y el azimut.

Se ve en la figura que $h = -10^\circ$ y $a = 146^\circ$. El astro está debajo del horizonte,

CAPITULO CUARTO

DESCRIPCION DEL CIELO ESTRELLADO

PRELIMINARES

56. CLASIFICACION DE LAS ESTRELLAS POR SU BRILLO APARENTE. — Por el mayor o menor brillo con que se muestran a nuestros ojos y a instrumentos de óptica apropiados, se ha clasificado a las estrellas en *grandores* o *magnitudes aparentes*. Se agrupan dentro de la 1ª magnitud a las 20 estrellas más brillantes del Cielo, siguiéndolas después en orden de brillo decreciente las de 2ª, 3ª, 4ª, y así hasta la magnitud 22ª, que es el límite alcanzado en la actualidad por las fotografías celestes de larga exposición.

Cada magnitud tiene su estrella tipo, con la que se comparan las demás, por procedimientos fotométricos, para catalogarlas.

En términos generales, la estrella tipo de una magnitud brilla 2,5 veces más que la que sirve de tipo a la magnitud siguiente, de modo que los números que miden sus brillos forman una serie geométrica decreciente de razón 2,5. Los astrónomos toman 2,512, cuyo logaritmo es 0,4.

Si designamos por 1 al brillo de la estrella tipo de la 1ª magnitud, el mismo para la magnitud n , quedará expresado por:

$$b = \frac{1}{2,512^{n-1}}, \quad [1]$$

de donde tomando logaritmos:

$$\log. b = -0,4 (n - 1). \quad [2]$$

EJEMPLO: La magnitud de la estrella Sirio es $-1,6$, ¿cuál es su brillo comparado con el de una estrella tipo de la 1ª magnitud?

Se tendrá aplicando la fórmula:

$$b = \frac{1}{2,512^{-2,6}} = 2,512^{2,6} = 10,97,$$

o lo que es lo mismo: el brillo de Sirio equivale al de 11 estrellas de primera magnitud (aproximadamente).

Aplicando la fórmula [1] se obtienen los resultados siguientes:

Brillo	estrella de	1ª	magnitud		1,00
"	"	"	2ª		0,40
"	"	"	3ª		0,16
"	"	"	4ª		0,063
"	"	"	5ª		0,025
"	"	"	6ª		0,01

Estos resultados ponen de manifiesto que una estrella tipo de 1ª magnitud equivale en brillo, aproximadamente, a 2,5 estrellas de 2ª; a 6 de 3ª; a 16 de 4ª; a 40 de 5ª, y a 100 de 6ª magnitud.

Si se toma a la estrella α (alfa) de la Cruz del Sur como estrella tipo de 1ª, a la estrella Fomalhaut corresponde la magnitud 1, 3 y, en cambio, a las estrellas más brillantes que la elegida corresponderán magnitudes expresadas por 0 (cero) o por un número negativo. Ejemplos: la magnitud de Rigel es 0,3, y la de Canopus $-0,9$.

LEY PSICOFÍSICA DE FECHNER. — Como se ve, estando los brillos de las estrellas en progresión geométrica, las magnitudes correspondientes forman una progresión aritmética (fig. 39). Esto es consecuencia de una ley enunciada por Fechner, que se refiere a la relación entre la sensación que se experimenta (subjetiva), y el agente (objetivo), que la provoca. Si las excitaciones (pesos, luminosidades, intensidades sonoras, etc.), crecen en progresión geométrica, las sensaciones parecen aumentar en progresión aritmética.

MAGNITUD Y BRILLO DE LAS ESTRELLAS PRIMARIAS. — Damos a continuación un cuadro donde se consignan las magnitudes aparentes de las veinte estrellas más brillantes de todo el Cielo y que involucramos, por lo común, dentro de la 1ª magnitud. En ese cuadro van dispuestas dichas estrellas en orden decreciente de brillo y la aproximación es el centésimo de magnitud. Conviene observar, que cuando una estrella tiene un brillo comprendido entre el de dos magnitudes consecutivas, se la clasifica en la superior si la parte decimal es inferior a 0,5 y en la inferior si pasa de ese valor. Ejemplo: a la estrella Castor de los Gemelos se la puede con-

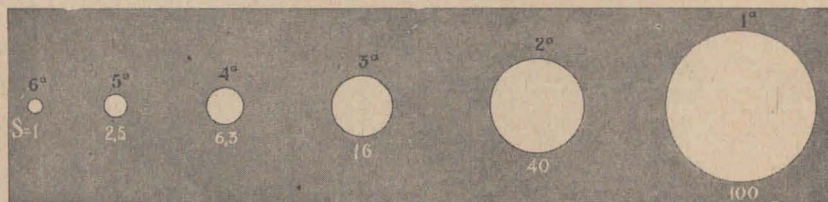


Fig. 39. — Las áreas de los círculos se han tomado proporcionalmente a los brillos correspondientes a las magnitudes aparentes de la 1ª a la 6ª.

siderar como de 2ª magnitud por ser ella igual a 1,7; en cambio, como ese número es de 1,3 para la estrella Deneb, se cataloga a ésta entre las de 1ª magnitud.

A simple título informativo, consignamos que el Sol por su brillo pertenece a la magnitud -27 , o en otros términos, que brilla $(2,5)^{28}$

veces más que la estrella α de la Cruz del Sur, cuyo brillo se ha tomado como unidad. Se necesitarían, pues, 131.000 millones de estrellas de 1ª magnitud para proporcionar la luz que el Sol nos envía.

MAGNITUDES APARENTES

NOMBRE	Denominación	Magnitud	Brillo comparado
Sirio (S)	α Can Mayor	— 1,58	10,7
Canopus (S)	α Navío	— 0,86	5,6
Rígil Kenturus (S)	α Centauro	0,06	2,4
Vega (N)	α Lira	0,14	2,2
La Cabra (N)	α Auriga	0,21	2,1
Arturo (N)	α Boyero	0,24	2,0
Rígel (S)	β Orión	0,34	1,8
Proción (N)	α Can Menor	0,48	1,6
Achernar (S)	α Eridano	0,60	1,5
Agena (S)	β Centauro	0,86	1,2
Altair (N)	α Aguila	0,89	1,1
Betelgeuse (N)	α Orión	0,92	1,1
Acrux (S)	α Cruz del Sur	1,00	1,0
Aldebarán (N)	α Toro	1,06	0,9
Espiga (S)	α Virgen	1,21	0,8
Pólux (N)	β Gemelos	1,21	0,8
Antares (S)	α Escorpión	1,22	0,8
Fomalhaut (S)	α Pez Austral	1,29	0,8
Deneb (N)	α Cisne	1,33	0,7
Régulo (N)	α León	1,34	0,7

Las letras que se colocan entre paréntesis, son las que corresponden al hemisferio de cada estrella (Sur, S. y Norte, N.).

57. NUMERO DE ESTRELLAS.—El número total de estrellas visibles a ojo desnudo en todo el Cielo, y que corresponden a las seis magnitudes superiores, es alrededor de 6.000.

Las estrellas de 1ª magnitud, o más bien dicho primarias, son veinte, de las cuales diez pertenecen al hemisferio celeste austral, y las otras diez al boreal. En cuanto al número de estrellas de las magnitudes 2ª, 3ª, 4ª, 5ª y 6ª, se le puede obtener, aproximadamente, multiplicando el número 20 por 3, 3², 3³, 3⁴ y 3⁵. Por este procedimiento las estrellas de 2ª magnitud serían alrededor de 60; las de 3ª, unas 180, etc. Como se comprende, estos resultados sólo son groseramente aproximados.

Pero, para darnos idea de la grandiosidad del sistema estelar, bastará considerar que los modernos medios de observación, constituidos por potentes telescopios munidos de equipos fotográficos extremadamente sensibles, permiten registrar la presencia de centenares de millones de tales astros.

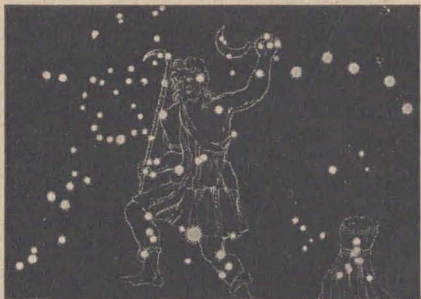


Fig. 40. — La constelación de Orión.

El astrónomo holandés KAPTEYN, con la colaboración de diversos observatorios astronómicos, desde los cuales se escrutaban zonas especiales de la esfera celeste, obtuvo con aquellos medios resultados asombrosos, contando, aproximadamente, para las magnitudes 14^a , 15^a y 16^a , 13.000.000, 27.500.000 y 57.000.000 de estrellas respectivamente, pudiéndose apreciar que cada uno

de estos números es más o menos el duplo del que le precede.

De seguirse esa ley en las magnitudes siguientes hasta la 22^a , se tendrían nada más que para ésta, alrededor de 3.500 millones de estrellas.

58. CONSTELACIONES. — Desde tiempos muy remotos se han formado con las estrellas grupos característicos llamados constelaciones.

A éstas se les han asignado los nombres más variados, de carácter mitológico los unos, de animales y objetos diversos los otros.

Los observadores primitivos creían ver en el Cielo las figuras representativas de tales nombres, trazando con la imaginación líneas arbitrarias con las cuales pueden obtenerse las figuras que se deseen *. Debe reconocerse, sin embargo, que la agrupación de las estrellas en constelaciones, facilita notablemente el estudio del Cielo en sus diversas regiones.

Cada constelación contiene un número más o menos grande de estrellas, de las más diversas magnitudes, pero se conviene en designar, por lo general, como estrella α (alfa) a la más brillante



Fig. 41. — Constelación de la Virgen.

* En las figuras 40 y 41 las estrellas han sido ubicadas más o menos arbitrariamente.

del grupo, siendo β (beta), γ (gama) . . . , etc., las notaciones seguidas para nombrar a las demás en orden decreciente de brillo. Ello no significa en manera alguna, que la α de una constelación deba ser necesariamente una estrella de 1ª magnitud, pues de este privilegio sólo gozan 18 constelaciones celestes (dos de ellas, Orión y el Centauro, contienen dos estrellas de 1ª, la α y la β).

Cuando en una constelación hay dos estrellas primarias, la designación α puede asignarse a una u otra de ellas. Por ejm.: la α de Orión es *Betelgeuse*, a pesar de que la β , que es *Rigel*, tiene mayor brillo.

A muchas estrellas del Cielo, por su brillo, y también por características especiales, se las suele designar por nombres propios. Ejm.: α del León es *Régulo*; β de Perseo es *Algol* o *Cabeza de Medusa*, etc.

GOULD, que fué director del Observatorio de Córdoba, admite 53 constelaciones australes, y HEIS 32 boreales.

59. ORIENTACION: SU IMPORTANCIA PARA EL CONOCIMIENTO DEL CIELO. — No puede estudiarse el Cielo con propiedad, sin una orientación previa que permita localizar, en primer lugar, el meridiano del observador, y en seguida la dirección del eje del mundo. Esta última, da la ubicación de elementos fundamentales de la esfera celeste, cual son los polos P_s y P_n , y el Ecuador celeste.

El método del gnomon al alcance de todos, permite trazar la meridiana (18) sobre cualquier superficie horizontal, que podría ser la de un patio, con grosera aproximación. El meridiano donde culminan todos los astros diariamente, es el plano vertical que pasa por aquella línea.

Conocido el meridiano, ubiquemos en él un anteojo (o a falta de éste un tubo recto de pequeño diámetro) de modo que su eje óptico forme con el horizonte un ángulo igual a la latitud φ del lugar (20). En estas condiciones, dicho eje óptico es la dirección del eje del mundo, y el anteojo (o el tubo) estará dirigido al polo celeste del hemisferio del observador, que es el situado en el semiespacio superior al horizonte. El plano perpendicular a aquella dirección, y que pasa por el ojo del observador, intercepta al Cielo según la línea del Ecuador celeste (esta línea la recorre el Sol los días 21 de marzo y 23 de setiembre de cada año, y diariamente una de las estrellas llamadas *Tres Marías*). Como se comprende los recorridos diurnos de todos los astros son paralelos a dicha línea.

60. FECHAS EN QUE LAS ESTRELLAS PRIMARIAS CULMINAN A MEDIANOCHE. — Antes de encarar directamente la descripción del Cielo, es conveniente proporcionar un elemento fundamental de observación, que permitirá localizar en el Cielo, los astros y constelaciones que se irán describiendo en este estudio.

Este elemento es el constituido por el conocimiento de las fechas del año en que un observador situado en cualquier latitud, ve culmi-

nar a determinada hora (tiempo local), p. ejm., a medianoche, a las estrellas primarias mencionadas en el parágrafo 56 (cuadro).

Conocidas esas fechas, se podrá en las épocas precisas, dedicarse a la búsqueda de tales estrellas en el Cielo, captándolas fácilmente una tras otra, en razón de destacarse entre las inmediatas por su mayor brillo.

Puesto el observador en contacto visual con las estrellas sobresalientes de la noche, irá conociendo paulatinamente las demás, así como a las constelaciones que las contienen, con el auxilio de cualquier carta o globo celeste donde podrán apreciarse sus posiciones relativas con respecto a las primarias.

ESTRELLAS QUE CULMINAN A MEDIANOCHES: FECHAS

COORDENADAS PARA 1940

Fechas	Estrella	Constelación	Ascensión recta α	Declinación δ	Altura h de culmi- nación para $\varphi = 35^{\circ}\text{S}$
1 enero	Sirio	Can Mayor ...	6 ^h 42 ^m 30 ^s	— 16° 37' 57"	N. 72°
14 „	Proción	Can Menor ...	7 36 10	+ 5 22 49	N. 50°
15 „	Pólux	Gemelos	7 41 39	+ 28 10 22	N. 27°
21 febrero	Régulo	León	10 5 11	+ 12 15 40	N. 43°
29 marzo	Acrux	Cruz del Sur .	12 23 15	— 62 46 1	S. 62°
12 abril	Espiga	Virgen	13 22 2	— 10 50 45	N. 66°
21 „	Agena	Centauro (β) .	13 59 34	— 60 5 4	S. 65°
25 „	Arturo	Boyero	14 12 55	+ 19 29 39	N. 36°
30 „	Rigil Kentuvus	Centauro (α) .	14 35 31	— 60 35 21	S. 65°
28 mayo	Antares	Escorpión	16 25 43	— 26 18 2	N. 82°
30 junio	Vega	Lira	18 34 54	+ 38 43 36	N. 16°
18 julio	Altair	Aguila	19 47 51	+ 8 42 31	N. 46°
1 agosto	Deneb	Cisne	20 39 23	+ 45 3 55	N. 10°
4 setiembre	Fomalhaut	Pez Austral ..	22 54 20	— 29 56 26	N. 85°
15 octubre	Achernar	Eridano	1 35 29	— 57 32 28	S. 67°
29 noviembre ...	Aldebarán	Toro	4 32 28	+ 16 23 25	N. 39°
8 diciembre	Rigel	Orión (β)	5 11 39	— 8 16 10	N. 63°
8 „	La Cabra	Auriga	5 12 15	+ 45 56 21	N. 9°
19 „	Betelgeuse	Orión (α)	5 51 55	+ 7 23 51	N. 43°
27 „	Canopus	Navío	6 22 37	— 52 39 44	S. 72°

NOTA. — El paso por el semimeridiano del lugar, se adelanta 1h por cada 15 días que transcurran, p. ej.: Sirio culminará a las 23h el 16 de enero, y a las 22h, el 31 del mismo mes... etc.

En el cuadro de la página anterior se indican dispuestas en columnas.

1º Fechas del año en que culminan a medianoche en el semi-meridiano del lugar (17) las 20 estrellas primarias de todo el Cielo, y por consiguiente época especial para ubicarlas.

2º Nombre propio de la estrella.

3º Constelación a que pertenece con una indicación entre paréntesis en el caso de que la estrella es la β de la constelación.

4º Valor de la ascensión recta expresada en tiempo sidereal, es decir, hora sidereal en el instante de culminación (50 y 51).

5º Valor de la declinación con signo positivo para las boreales y negativo para las australes (50).

6º Altura que adquieren en la culminación superior vistas desde la latitud $\varphi = -35^\circ$. Las letras *N* y *S* antepuestas a las alturas, indican si el astro culmina al norte o al sur del cenit (13).

DESCRIPCION DE ESTRELLAS Y CONSTELACIONES

61. EL CIELO VISTO DESDE LOS 35° DE LATITUD AUSTRAL. — Podrán considerarse en este Cielo (35) tres grupos o categorías de estrellas en cuanto a su ubicación con respecto al Ecuador:

a) Estrellas siempre visibles durante la noche, o circumpolares (33) cuya declinación δ es superior a 55° austral, complemento de la latitud del observador.

b) Estrellas siempre invisibles, con declinación superior a 55° boreal (34).

c) Estrellas de salida y puesta, en las que la declinación está comprendida entre los 55° sur, y 55° norte. Estas permanecen diariamente en el semiespacio superior al horizonte, más, o menos de 12 horas siderales, según que estén ubicadas en el hemisferio celeste del observador, o en el opuesto.

En el estudio que hacemos a continuación, iremos describiendo mes tras mes, las estrellas y constelaciones más importantes, observadas a medianoche desde la latitud apuntada, siempre que dichas estrellas y constelaciones estén sobre el meridiano del lugar o próximas a él. En cuanto a las que las preceden, hacia el Oeste, o las que siguen hacia el Este, serán tratadas en los meses en que se coloquen en aquellas condiciones.

Pasaremos revista, en primer lugar, a las estrellas de los grupos *a)* y *c)* con sus respectivas constelaciones, integrando después el conocimiento del Cielo, mediante una reseña de las del grupo *b)*.

Para la mejor comprensión de los que recién se inician en estas observaciones celestes, advertimos que no debe echarse en olvido lo visto en el parágrafo 31, es decir, que todo el Cielo estrellado, en

el movimiento diurno, se va adelantando al Sol, hacia el Oeste, a razón de casi 1° por día (360° en un año), por lo cual, si una estrella ecuatorial sale a medianoche, viéndosela en consecuencia en el Este verdadero, recién al cabo de tres meses se la verá culminar en el semimeridiano del lugar a la misma hora.

62. ESTRELLAS Y CONSTELACIONES QUE CULMINAN A MEDIANOCHES EN ENERO, FEBRERO Y MARZO, VISTAS DESDE LOS 35° S. DE LATITUD. — En las fechas comprendidas entre el 1 de enero y el 31 de marzo, desfilan a medianoche ante el semimeridiano del lugar, los semicírculos horarios situados entre los de VIIh y XIIh, y con ellos las estrellas de igual ascensión recta (50°).

1. MES DE ENERO. — Tres estrellas primarias culminan a medianoche en este mes (60°), por lo cual se las podrá individualizar fácilmente, a saber:

Sirio, del Can Mayor, lo hace el día 1 con una altura de 72° al norte del cenit. Es la más brillante de las estrellas del Cielo, y para obtener su luz se requieren 11 estrellas tipos de 1° magnitud.

Una característica interesante de Sirio, es la de ser doble, teniendo un satélite que gira a su alrededor en 52 años y al cual se atribuye una densidad fantástica, comprendida entre 40.000 y 50.000. Dentro de su constelación (fig. 42), hay tres estrellas de 2° magnitud y dos de 3° .

Proción, del Can Menor, culmina a medianoche el día 14 del mes con una altura de 50° al norte del cenit. Le sigue en importancia dentro de su constelación ubicada al norte del Ecuador pero muy próxima a él, una estrella de 3° .

Pólux pasa por el semimeridiano al día siguiente a 27° de altura al norte del cenit. Pertenecer a la constelación de los *Gemelos*, la cual contiene, formando un rectángulo con Pólux, otras cinco estrellas brillantes, dos de 2° magnitud, entre ellas *Castor* (el otro mellizo) y tres de 3° .

2. MES DE FEBRERO. — El 21 del mes a medianoche, culmina a 43° de altura al norte del cenit, una débil estrella de 1° magnitud llamada *Régulo*, o α de la constelación zodiacal del *León*. Es fácilmente reconocible, atendiendo a que en su cercanía sólo hay estrellas de 2° y 3° magnitud, estando muy separada de las primarias. El grupo principal de su constelación lo forma junto a tres estrellas de 2° entre ellas *Denébola* o Cola de León.

3. MES DE MARZO. — Casi a fines de marzo, el día 29, pasa por el semimeridiano del lugar a medianoche, la estrella *Acrux* o α de la *Cruz del Sur*. A la inversa de las estrellas primarias estudiadas en meses anteriores, ésta, por tener una declinación austral elevada (62°) culmina superiormente para la latitud que venimos estudiando a 63° de altura al sur del cenit, por lo cual sólo se la ve dando espaldas al Norte, mientras que para las anteriores lo enfrentábamos.

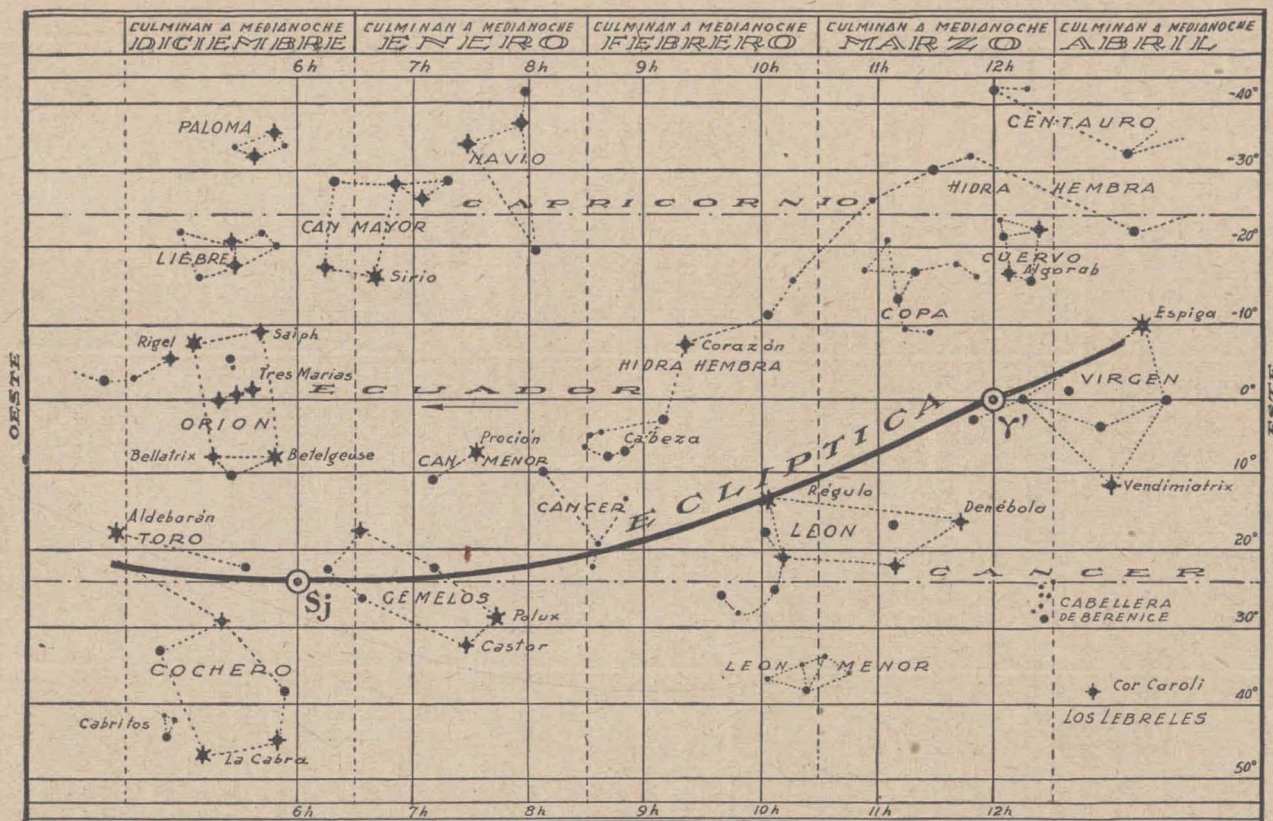


Fig. 42.

★ Primera magnitud ✦ segunda ● tercera • cuarta

Esta constelación, lo mismo que otras varias de las australes muy alejadas del Ecuador, no cabe en la zona celeste abarcada por la figura 42, pero se la puede apreciar en la carta de la figura 46. El grupo fundamental de la Cruz está formado por la estrella ya nombrada y otras tres β , γ y δ , de 2ª, 2ª y 3ª magnitud, respectivamente. Los brazos de la Cruz $\alpha\gamma$ y $\beta\delta$, son normales entre sí, y el primero, o brazo mayor, prolongado pasa cerca del polo celeste P_s , el que puede ubicarse con aproximación llevando sobre el alineamiento, a partir de α , cuatro veces la distancia angular $\alpha\gamma$. A todas las estrellas de esa zona (circumpolares) las vemos describir circunferencias alrededor de P_s en un día sideral.

63. ESTRELLAS Y CONSTELACIONES QUE CULMINAN A MEDIANOCHE EN ABRIL, MAYO Y JUNIO, VISTAS DESDE LOS 35° S. DE LATITUD.— Durante estos tres meses del año, coinciden sucesivamente con el semimeridiano del lugar a medianoche, los semicírculos horarios ubicados entre los de XIIh y XVIIIh, culminando en consecuencia las estrellas de iguales ascensiones rectas.

1. MES DE ABRIL.— Cuatro estrellas primarias culminan en este mes a medianoche: *La Espiga*, *Agena* o β del *Centauro*, *Arturo* y *Rigil Kenturus* (α del *Centauro*).

La Espiga, o α de la constelación zodiacal de la *Virgen*, lo hace el día 12 a 66° de altura al norte del cenit. Dicha constelación es atravesada por el Ecuador, por lo cual pertenece en parte a ambos hemisferios celestes, encontrándose la *Espiga* en el austral, mientras que la estrella β , llamada *Vendimiadora*, de 2ª magnitud, pertenece al hemisferio norte (fig. 43).

La estrella *Agena*, o β del *Centauro*, culmina el día 21, haciéndolo nueve días después su compañera *Rigil Kenturus*, o α de la constelación. Por ser ambas de gran declinación austral, no aparecen en la carta ecuatorial de figura 43, pero pueden ubicarse perfectamente observando la figura 46. En el cielo se las ve durante todo el año a veces altas, a veces bajas, apuntando como flecha hacia la Cruz del Sur. *La Próxima del Centauro que es la estrella más cercana a la Tierra* (4 años luz), coincide casi en posición con *Rigil Kenturus*.

En toda la zona circumpolar de la latitud dada, α y β del *Centauro* son los dos astros más brillantes, y por tanto inconfundibles entre el enjambre de las demás estrellas.

El 25 del mes a medianoche, pasa por el semimeridiano *Arturo* a 36° de altura al norte del cenit. Se trata de una de las más hermosas estrellas del cielo, inconfundible por su brillo y por su color amarillo-perlino. *Arturo* es la estrella α del *Boyero*, constelación situada al noreste de la *Virgen*.

2. MES DE MAYO.— El día 28 en la mitad de la noche culmina *Antares* la estrella primaria α del *Escorpión*, a casi 82° de altura al norte del cenit. Es una hermosa estrella anaranjada (casi roja) de parpadeo poco pronunciado, que en algunas ocasiones los profanos



Fig. 43.

suelen confundir con el planeta Marte por el color. El Escorpión, una de las más bellas constelaciones, dibuja en el Cielo por la ubicación de sus estrellas un signo de interrogación que se abre en penacho en su parte terminal (fig. 43). Contiene, además de aquella estrella, otras seis de 2ª magnitud y cinco de 3ª. La estrella Antares es doble, formando con su compañera, estrella verde, un sistema físico, donde ambas se desplazan alrededor del centro común de gravedad.

3. MES DE JUNIO. — El 30 de este mes pasa por el semimeridiano a medianoche muy internada en el hemisferio boreal, la brillante estrella *Vega* de la *Lira* alcanzando una altura apenas inferior a 16° al norte del cenit. Se trata de la tercera estrella del Cielo en cuanto a brillo, destinada a futura polar norte, dentro de 120 siglos, en razón de la precesión de los equinoccios que veremos más adelante.

64. ESTRELLAS Y CONSTELACIONES QUE CULMINAN A MEDIANOCHES EN JULIO, AGOSTO Y SETIEMBRE, VISTAS DESDE LOS 35° S. DE LATITUD. — Desde el 1 de julio al 30 de setiembre, pasan por el semimeridiano en las condiciones indicadas, las estrellas cuya ascensión recta está comprendida entre las XVIIIh y XXIVh.

1. MES DE JULIO. — El día 18 tenemos sobre el semimeridiano, a mitad de la noche, a la estrella primaria *Altair*, de la constelación *Aguila*, a una altura de 46° al norte del cenit. Se ubica fácilmente *Altair*, por estar en línea recta con dos estrellitas equidistantes, y además por la carencia de estrellas primarias en su cercanía (fig. 44).

2. MES DE AGOSTO. — Pasa por el semimeridiano a medianoche el día 1, la estrella primaria *Deneb* de la constelación del *Cisne*. Se la ve muy baja, pues su altura de culminación al norte del cenit no alcanza a 11°. El grupo del *Cisne* situado a 30° al este de la *Lira*, lo forman *Deneb* junto a tres estrellas de 2ª magnitud y una de 3ª, dispuestas casi en forma de cruz.

3. MES DE SETIEMBRE. — Culmina el día 4 a medianoche a casi 86° de altura, al norte del cenit, *Fomalhaut*, o α del *Pez Austral*, caracterizada por ser entre las estrellas primarias la que más se acerca al cenit para la latitud que estudiamos. *Fomalhaut* es una débil estrella de 1ª magnitud, ya que su brillo sólo alcanza a 0,76 (la estrella tipo *Acrux* tiene por brillo 1).

Pasan por el semimeridiano también en este mes a medianoche, estrellas importantes entre las que sobresalen las de 2ª magnitud, *Algenib*, *Markab*, *Scheat* y *Sirrah*, integrantes del característico *Cuadrado de Pegaso* (fig. 44). El alineamiento *Markab* - *Scheat*, conduce a α de la *Osa Menor* o polar norte, invisible desde la latitud que se estudia.

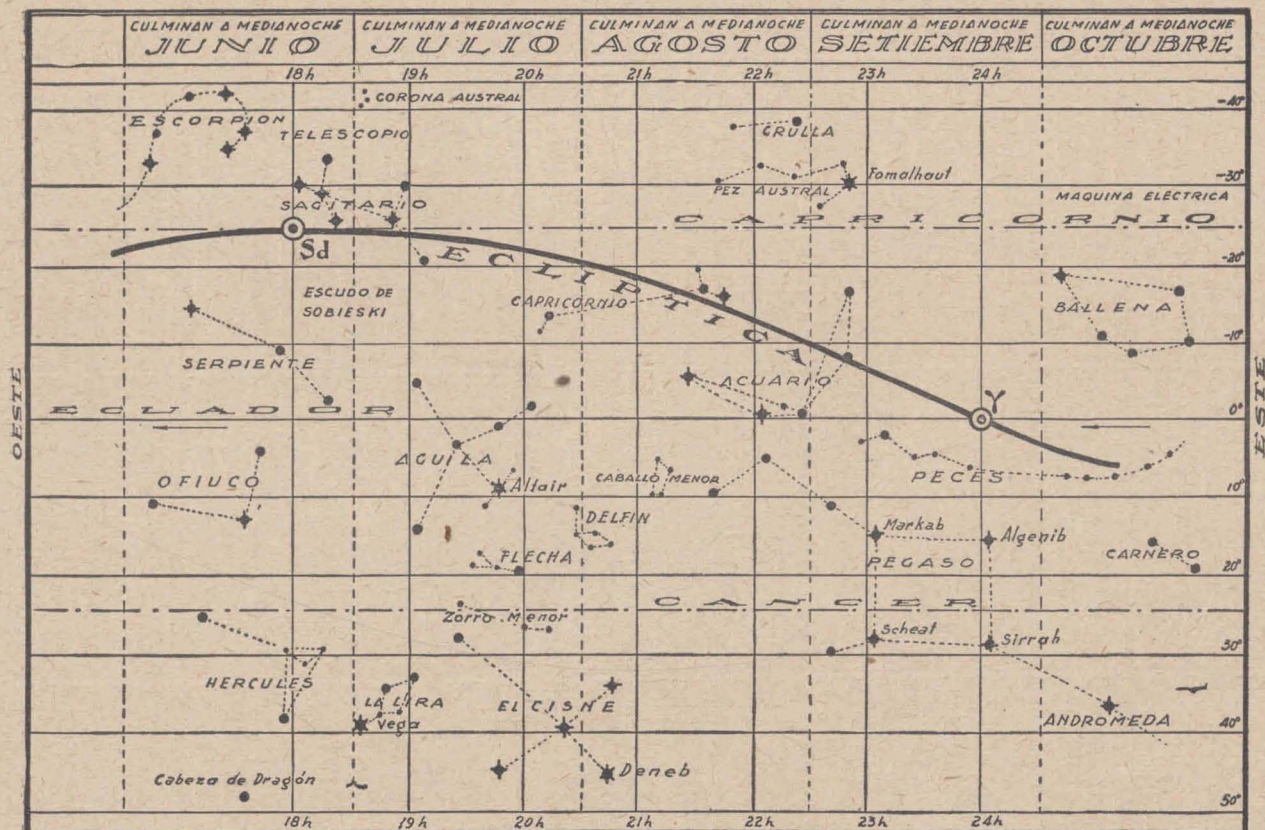


Fig. 44.

65. ESTRELLAS Y CONSTELACIONES QUE CULMINAN A MEDIANOCHE EN OCTUBRE, NOVIEMBRE Y DICIEMBRE, VISTAS DESDE LOS 35° S. DE LATITUD. — Durante estos tres meses del año, culminan a medianoche en el semimeridiano del observador las estrellas cuya ascensión recta está comprendida entre 0h y VIh.

1. MES DE OCTUBRE. — El día 15 se ubica en el semimeridiano a mitad de la noche, la estrella primaria *Achernar* con una altura de 67° al sur del cenit (fig. 45). Lo mismo que *Acrux*, *Rigel Kenturus* y *Agena* (estudiadas en marzo y abril), aquella estrella es circumpolar para la latitud 35° S., desde que su declinación, casi 58° austral, es superior a 55°, complemento de dicha latitud (34). El alineamiento del brazo mayor de la Cruz del Sur, después de pasar cerca del polo celeste P_s (ver marzo), nos conduce aproximadamente a *Achernar*, pasando antes por las conocidas nebulosas llamadas *Nubéculas de Magallanes*. *Achernar* es la α del *Eridano* (río Po, donde fué precipitado Faetón o Eridano, hijo del Sol).

2. MES DE NOVIEMBRE. — El 29 de este mes pasa por el semimeridiano a medianoche a una altura de 39° al norte del cenit, la estrella roja de primera magnitud *Aldebarán*, que es la α de la constelación zodiacal del *Toro*. Junto con cuatro estrellas cercanas, forma un ángulo con vértice hacia el oeste, constituyendo el grupo de las *Hiadas*. Las prolongaciones de los lados de aquel ángulo conducen a dos estrellas, de 2ª magnitud la una y de 3ª la otra, conocida la primera con el nombre de *Nath*. Un poco al noroeste de las *Hiadas* se divisa una especie de fosforescencia en el Cielo, que examinada con atención se desdobra en estrellitas, de las cuales las más importantes son las denominadas *Siete Cabrillas* o bien *Pléyadas*. Todo el grupo está envuelto en una nebulosa que estudiaremos en su lugar.

3. MES DE DICIEMBRE. — Hacia las 24 horas, en los días de este mes, el Cielo visto desde los 35° S. de latitud, adquiere su aspecto más fastuoso, que subsistirá en los dos meses siguientes, por el cúmulo de constelaciones importantes y el número elevado de estrellas primarias visibles hacia todos los rumbos.

Cuatro estrellas primarias culminan en el curso de diciembre a la hora indicada: La *Cabra* y *Rigel* el día 8, *Betelgeuse* el 19 y *Canopus* el 27.

La *Cabra* o *Capella*, pasa muy baja por el semimeridiano, pues su altura de culminación al norte del cenit no alcanza a 10°. Es una de las estrellas más brillantes del Cielo, ocupando el 4º lugar. Su constelación, el *Cocheiro*, está ubicada hacia los 45° de declinación boreal, apareciendo en ella, inmediato a la *Cabra*, el grupo de los *Tres Cabritos*.

Rigel o β de *Orión*, culmina en el semimeridiano a 63° de altura al norte del cenit. Es de luz blanca, con fuerte centelleo, considerándose como estrella de gran temperatura superficial. Su compañera,

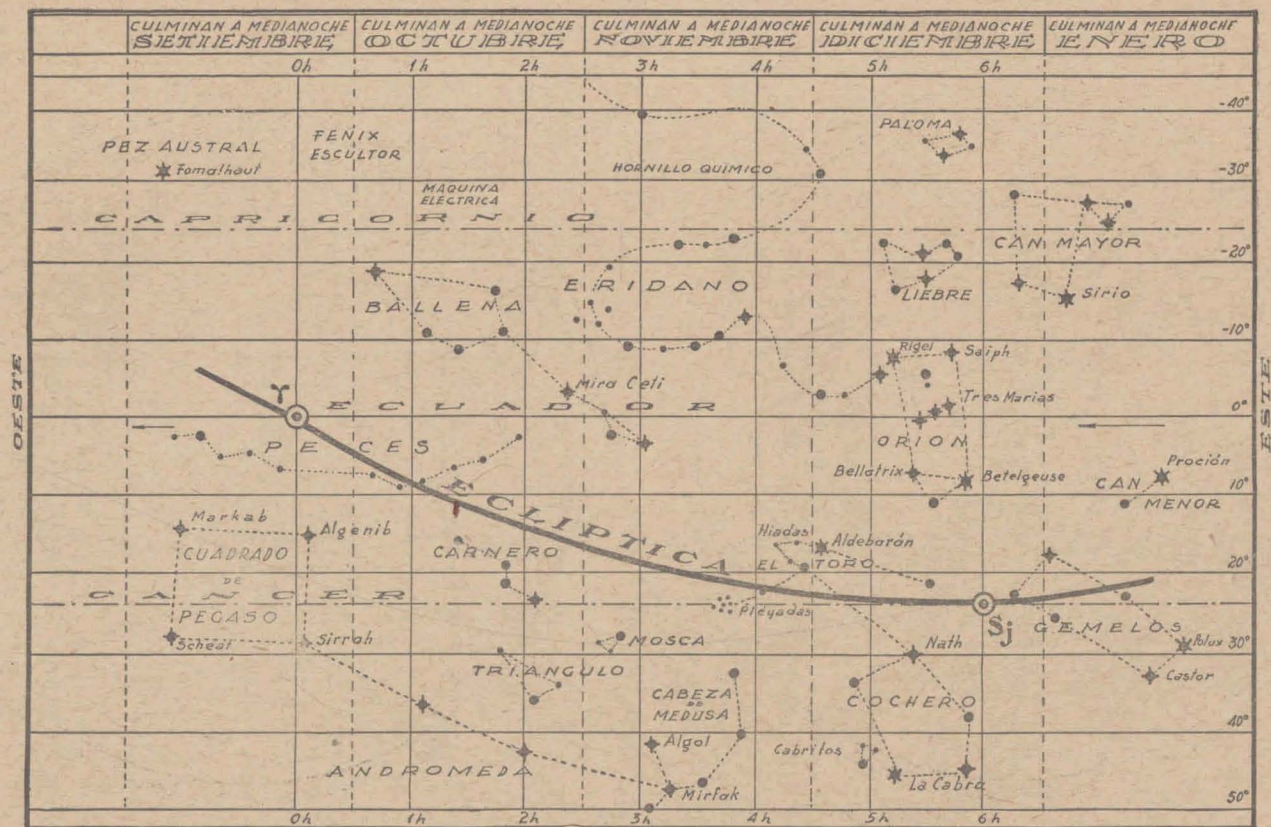


Fig. 45.

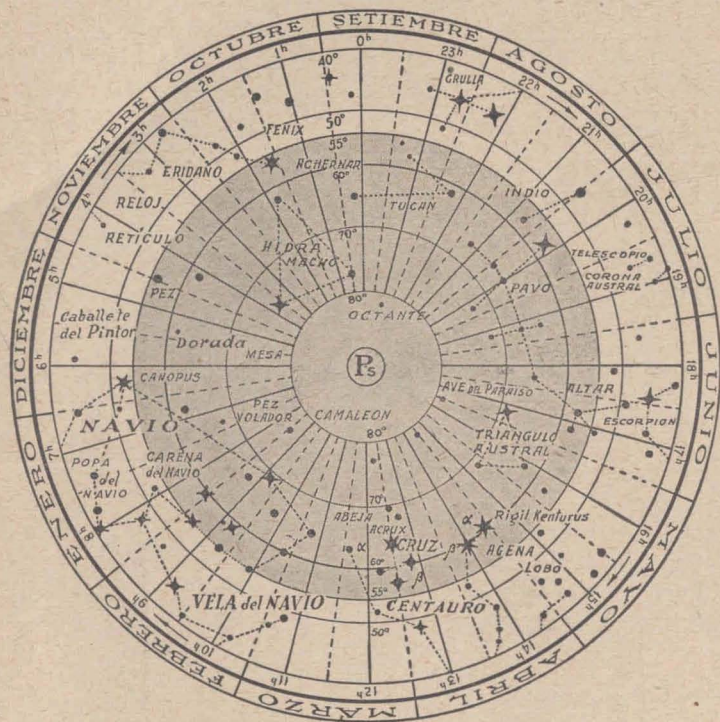


Fig. 46. — Zona celeste de perpetua visibilidad (sombreada) para la latitud de 35° S.

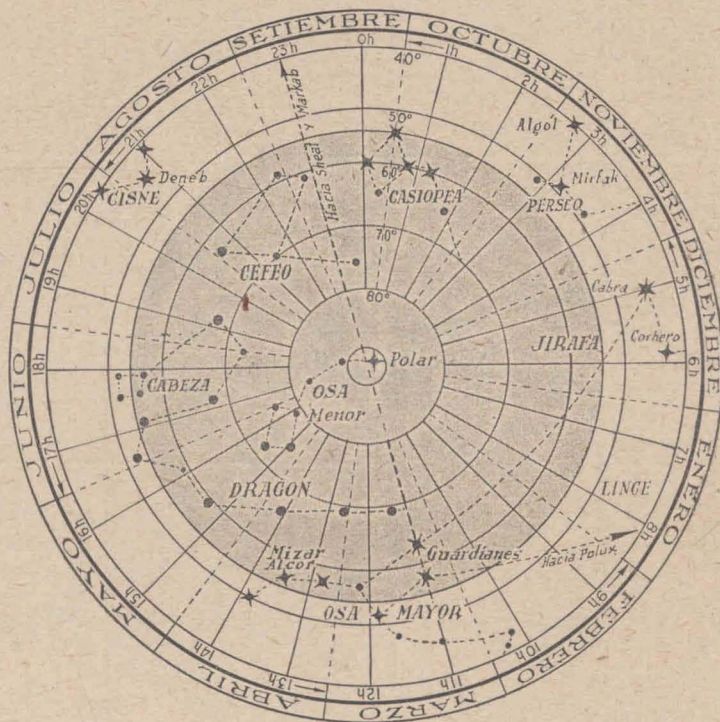


Fig. 47. — Zona celeste de perpetua invisibilidad (sombreada) para la latitud de 35° S.

Betelgeuse, culmina once días después a 48° de altura al norte, y a pesar de su menor brillo se la ha clasificado como α de la constelación. Lo mismo que las ya vistas, Antares y Aldebarán, esta estrella es de coloración roja.

Las dos primarias de Orión que acabamos de mencionar, están dispuestas según los vértices opuestos de un gran cuadrilátero completado por *Bellatrix* y *Saiph*, ambas de 2^a magnitud, aquella al norte del Ecuador y la última al sur. En el centro del cuadrilátero, alineadas y equidistantes, están las tres estrellas de 2^a magnitud conocidas vulgarmente como las *Tres Marias* o *Tres Reyes Magos*, *Mintaka*, *Anilam* y *Alnitak*, formando el *Tahalí* de Orión. Una de las estrellas del *Tahalí*, la más boreal, está casi sobre el Ecuador recorriéndolo diariamente. El alineamiento del *Tahalí*, conduce a Aldebarán hacia el noroeste, y a Sirio hacia el sudeste. Completan la constelación en su parte principal, otras dos estrellas de 2^a y la célebre *Nebulosa de Orión* ubicada entre Rigel y el *Tahalí*.

El 27 de este mes pasa por el semimeridiano a las 24 horas la estrella *Canopus* o α del *Navío*, la 2^a en brillo de todo el Cielo, equivalente a seis estrellas tipo de 1^a magnitud. Lo hace a una altura de 72° al sur del cenit, y es casi circumpolar para la latitud que se estudia, desde que su declinación es de $-52^\circ 40'$ (fig. 46).

*** 66. ESTRELLAS Y CONSTELACIONES INVISIBLES DESDE LOS 35° S. DE LATITUD.** — Completamos el estudio del Cielo, con algunas referencias a las estrellas y constelaciones invisibles desde la latitud 35° S., situadas en el casquete esférico boreal que hemos denominado de eterna invisibilidad (34). Dicho casquete, limitado por el paralelo celeste de 55° boreal, contiene en consecuencia a todas las estrellas del Cielo cuya declinación norte (positiva) es superior a la magnitud angular apuntada. La figura 47 nos lo muestra encerrando cinco constelaciones: Osa Mayor, Osa Menor, Dragón, Cefeo y Casiopea. Como podrá apreciarse observando la figura, todavía alcanzamos a divisar poniendo especial cuidado, pues asoman sobre el horizonte y desaparecen en breves momentos, algunas estrellas de la Cola de la Osa Mayor y otras de la Cabeza del Dragón (la refracción favorece al observador, pues las eleva $33'$).

La *Osa Mayor* contiene siete estrellas brillantes de las cuales seis son de 2^a magnitud y la restante de 3^a . Dos de sus estrellas llamadas los *Guardianes*, están alineadas con la polar α de la Osa Menor y con el lado Scheat - Markab del Cuadrado de Pegaso. El alineamiento de uno de los lados de la *Caja del Carro de David*, que es como suele llamarse al cuadrilátero que constituye el cuerpo de la Osa, conduce a la Cabra, y una de las diagonales a Pólux. Las siete estrellas de que venimos de hablar fueron llamadas en otras épocas "*Septemtriones*" (siete bueyes), de donde deriva el término septentrión para referirnos al norte.

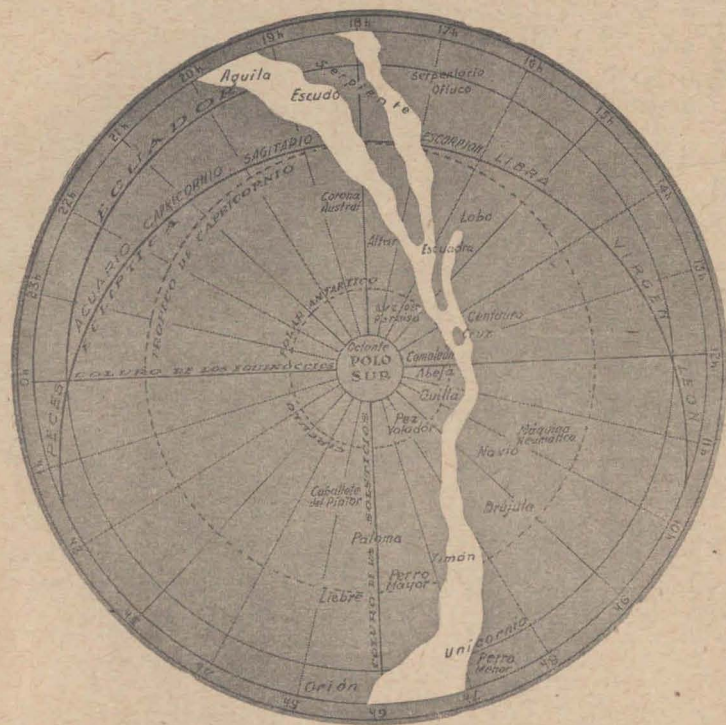


Fig. 48. — Recorrido de la Vía Láctea en el hemisferio celeste austral.

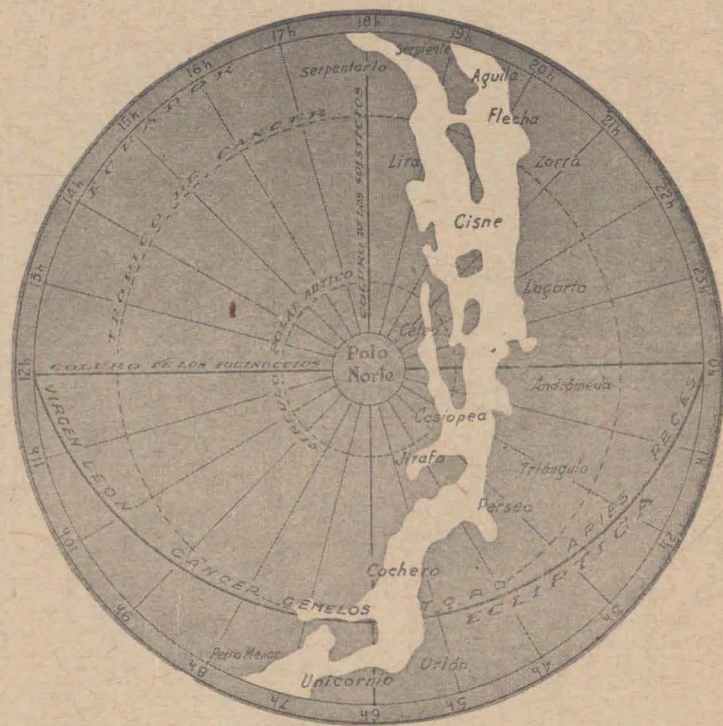


Fig. 49. — Recorrido de la Vía Láctea en el hemisferio celeste boreal.

La *Osa Menor*, semejante en la disposición de sus estrellas a la *Osa Mayor*, pero dispuestas en sentido inverso, contiene a la *Polar* (α) que es su estrella más brillante, colocada en la extremidad de la cola.

67. VIA LACTEA. — En las noches no alumbradas por la Luna, puede apreciarse en el Cielo una luminosidad de aspecto lechoso, forma irregular, y ancho variable, dispuesta aproximadamente según un círculo máximo no muy separado del que integran los semicírculos horarios de VIh y XVIIIh (90° y 270°). Es la *Vía Láctea*, o "*Camino de Santiago*", como también suele llamársela (fig. 48 y 49).

A primera vista, la *Vía Láctea* ofrece el aspecto de una larga y estrecha franja luminosa, pero ya GALILEO, en el siglo XVII, al observarla en diversas regiones con su anteojo, pudo comprobar que en su parte principal está constituida por una enorme aglomeración de estrellas de brillo poco considerable.

La parte más ancha de la *Vía Láctea* está en la constelación del *Navío* donde alcanza a unos 30° , estrechándose después hasta unos pocos grados en otras regiones de su recorrido y culminando en brillo al pasar por las constelaciones del *Aguila*, *Escudo de Sobieski* y *Cisne*. Contrastando con este brillo, presenta la *Vía Láctea* numerosas regiones oscuras, en especial en la Cruz del Sur, donde pueden observarse los "*Sacos de Carbón*" el mayor de los cuales abarca 4° en longitud y $2^\circ,5$ en ancho. Antes se creyó que dichos espacios oscuros, eran zonas del Cielo privadas de estrellas, pero en la actualidad se los considera como provocados por masas absorbentes oscuras, gases o polvo cósmico, que interponiéndose a modo de pantalla, van cubriendo partes de la *Vía Láctea*.

En todo el curso de la *Vía Láctea*, y en especial en sus bordes, aparecen muchas nebulosas, algunas enormes en *Orión*, el *Navío*, *Sagitario* y *Cisne*, y la mayoría de tan tenue luminosidad, que pasan inadvertidas al ojo desnudo. Herschel observó que las regiones de la *Vía Láctea* cercanas a las nebulosas, eran las más pobres en estrellas, mientras que las más lejanas contienen tantas, que en ciertas partes ni aun los modernos anteojos alcanzan a resolverlas.

LIBRO SEGUNDO

EL SOL (☉)



EL DIA Y LA NOCHE

INTRODUCCION

68. EL SOL: FORMA DEL DISCO; DIAMETRO APARENTE, DISTANCIA A LA TIERRA; PERIGEO Y APOGEO. — El Sol, astro central de nuestro sistema planetario, es la estrella de la *Vía Láctea* (67), más próxima a la Tierra. Aparece en el Cielo como un disco brillante de apreciable diámetro aparente, desplazándose entre las estrellas con movimiento propio, razón por la cual se le clasifica entre los astros errantes según lo visto en el par. 4.

1. Ya a simple vista, apreciamos casi la forma circular de su disco; pero, se la puede comprobar fácilmente, utilizando un anteojo con retículo a dos hilos paralelos, a uno de los cuales puede imprimirse movimiento traslatorio actuando sobre un tornillo especial. Enfocado el Sol por el anteojo, se mueve convenientemente dicho hilo, haciendo que ambos se dispongan según a y a' (fig. 50) tangentes al disco, y paralelos entre sí. En estas condiciones, si se hace girar el ocular del anteojo alrededor del eje óptico, los hilos a y a' irán tomando posiciones b y b' , c y c' , etc., siempre tangentes al disco del Sol.

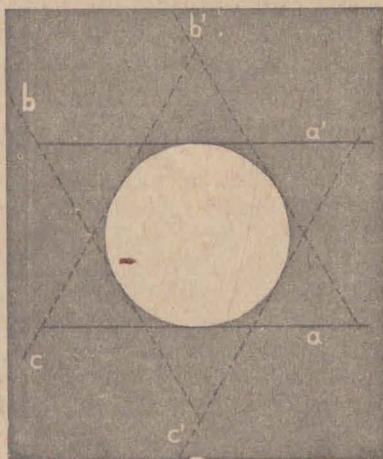


Fig. 50. — El disco del Sol.

2. El diámetro aparente δ (delta) del Sol, se determina por traslación del hilo móvil del retículo, desde la posición a a la a' , ambas tangentes al disco y paralelas. Un tornillo utilizado para el corrimiento, solidario a un disco graduado, acusa los desplazamientos angulares del hilo a lo largo de un diámetro del Sol. El valor así obtenido para δ , es variable en las distintas fechas del año, pasando hacia el 1 de enero por un máximo de $32'32''$, y por un mínimo de $31'28''$ hacia el 1 de julio. Se admite como valor medio muy aproximado:

$$\delta = 31'59''.$$

Si designamos por r al radio del Sol, y d a la distancia Sol-Tierra, obtendríamos (2):

$$\delta = \frac{2r}{d}.$$

3. De la última relación deducimos:

$$d = \frac{2r}{\delta};$$

fórmula que permite calcular la distancia Sol-Tierra, siempre que se conozcan la longitud del radio solar, y el diámetro aparente del astro. Teniendo en cuenta la muy posible constancia del valor de r , la fórmula demuestra que d y δ son magnitudes inversamente proporcionales, y en consecuencia, d adquiere su valor mínimo hacia el 1 de enero, cuando δ es máximo, y el máximo en las proximidades del 1 de julio, al adquirir δ su valor mínimo. Decimos entonces, que en la primera de esas fechas, el Sol está en el *perigeo* (del gr. perigeion; de peri, alrededor y gê, la Tierra), y en la última, en el *apogeo* (del gr. apógeios; de apó, lejos).

69. ARCO DIURNO Y ARCO NOCTURNO; SUS VARIACIONES A LO LARGO DEL AÑO.—El Sol, como todos los astros, participa del movimiento aparente diurno de la esfera celeste (7; 30), levantándose diariamente en un punto situado al este, *punto de salida*, y ocultándose en otro ubicado al oeste, *punto de puesta*. El arco, o porción de paralelo celeste, comprendido entre ambos puntos, es *arco diurno* considerado entre la salida y la puesta, y *arco nocturno* si se extiende entre la puesta y la próxima salida. Ambos arcos, integran aproximadamente un paralelo celeste.

Si el Sol se moviera diariamente al igual que una estrella, el arco diurno, para un determinado lugar de la Tierra, sería siempre el mismo, pasando otro tanto con el nocturno, y en consecuencia, en ese lugar, el día sería constante en duración para todas las épocas del año, así como la noche. La experiencia demuestra, que los días en nuestra latitud, son más largos en verano que en invierno, pasando lo inverso con las noches, o en otros términos: *los arcos diurnos y nocturnos son desiguales en las distintas fechas del año, para un mismo lugar de la Tierra, salvo en latitudes especiales.*

Las consideraciones anteriores permiten afirmar que *el Sol tiene un movimiento propio del cual carecen los astros fijos (estrellas)*. Este movimiento, como se verá en los parágrafos que siguen, provoca variaciones en las coordenadas ecuatoriales absolutas del astro.

70. MOVIMIENTO DEL SOL EN ASCENSION RECTA.—Las coordenadas ecuatoriales absolutas (50) de las estrellas, son poco menos que constantes, de modo que todo astro errante (4), o

punto del cielo que se desplace entre aquellas, experimentará variaciones en una de las dos coordenadas, o en ambas a la vez. El Sol se encuentra en este último caso.

Si observamos las inmediaciones del punto de puesta del Sol, poco después de la ocultación del astro, en los distintos meses del año, notaremos que las estrellas cercanas a dicho punto no son siempre las mismas, y mes tras mes, podremos ver, próxima a ocultarse, a una de las distintas constelaciones zodiacales vistas en el estudio del cielo estrellado. Si las estrellas fueran visibles de día, observaríamos que en *enero*, el grupo de estrellas inmediatas al Sol, pertenece a la constelación *Capricornio*; en *febrero* a *Acuario*; en *marzo* a *Peces*; en *abril* al *Carnero*..., y en *enero* del año siguiente, otra vez a *Capricornio*, con lo cual en el transcurso del año, el astro del día habrá cerrado una trayectoria en el cielo estrellado, en el *sentido directo* de Oeste a Este, contrario al del movimiento diurno. En los años siguientes volverá a reproducirse el mismo proceso.

En consecuencia: *el Sol varía en ascensión recta a razón de casi 1° por día (360° en 365 días), o lo que es lo mismo en 4 minutos de tiempo*, es decir, que si suponemos que dicho astro y una estrella culminan en el semimeridiano de un lugar en el mismo instante, al día siguiente es la estrella quien culmina 4 minutos antes, y al cabo del año, Sol y estrella volverán a culminar juntos otra vez, *habiéndose adelantado la última en un día*.

Si llamamos día solar al tiempo que transcurre entre dos culminaciones superiores consecutivas del centro del Sol, en un semimeridiano, podremos formular los tres importantes enunciados que siguen:

a) *La ascensión recta del Sol experimenta un aumento de 1°, aproximadamente por día.*

b) *El día sideral es 4 minutos de tiempo inferior en duración al día solar, y equivale, por lo tanto, a 23h56m de los relojes comunes.*

c) *El año, en números enteros, contiene 366 días siderales, equivalentes a los 365 días solares que transcurren entre el 1 de enero y el 31 de diciembre.*

71. MOVIMIENTO DEL SOL EN DECLINACION. — Las estrellas, por moverse siempre sobre el mismo paralelo celeste, conservan constante su declinación (34; 44), lo que hace que sus puntos de salida y puesta, permanezcan inalterables en la línea del horizonte, como así la altura de culminación adquirida en toda época del año.

La simple observación, nos muestra que estas condiciones no se cumplen con el Sol, al cual vemos más alto en los mediodías del verano que en los del invierno.

Por otra parte (fig. 51), si fijamos nuestra atención por la mañana en el punto de salida del astro, notaremos con el transcurso

de los días, que dicho punto del horizonte oriental, se corre hacia el Sur en los 6 meses comprendidos entre el 21 de junio y el 21 de diciembre, y hacia el Norte en los 6 meses restantes, como si fuera

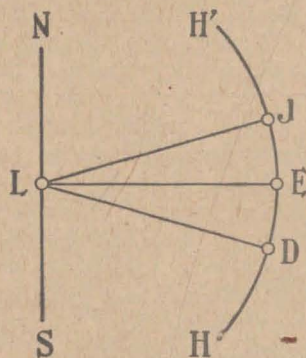


Fig. 51. — Puntos de salida del Sol.

animado de un movimiento pendular o de vaivén, entre los puntos J y D alcanzados por el Sol en aquellas fechas. Con ello, el Sol, se levantará en E , centro del arco JD , dos veces en el año, hacia el 21 de marzo, y hacia el 23 de setiembre. El punto E es el *Este verdadero*, y la dirección LE es el rumbo Oeste-Este, siendo su normal NS , la meridiana o línea Norte-Sur para el observador supuesto en L . En cuanto a HH' es una parte de la línea del horizonte tomada hacia el levante. Las consideraciones que preceden, demuestran que el Sol no recorre diariamente un mismo paralelo

celeste, y que declina en el hemisferio celeste austral entre los días 23 de setiembre y 21 de marzo, y toma declinaciones boreales en los otros 6 meses del año.

MOVIMIENTO APARENTE ANUAL: LA ECLIPTICA

72. LA ECLIPTICA. -- En el parágrafo 43, hemos hecho mención de la eclíptica, o recorrido anual del Sol entre las estrellas.

Controlado, en los parágrafos anteriores, el movimiento propio del Sol entre los astros fijos por sus variaciones en ascensión recta y declinación, se podrá fijar la posición de la eclíptica sobre una esfera o globo celeste, determinando para cada día del año, el valor de aquellas coordenadas solares. Cada par de ellos, define un punto de la esfera, que es la imagen de la posición ocupada por el Sol en esa fecha sobre la esfera celeste, y al cabo de los 365 días, tendremos otros tantos puntos, que unidos por un trazo continuo nos dan la posición de la eclíptica con respecto al ecuador celeste (10)

previamente ubicado sobre el globo. Debe tenerse en cuenta para esta determinación, que los valores de α y δ , son los que corresponden a las coordenadas, del centro del Sol, obteniéndose α (50),

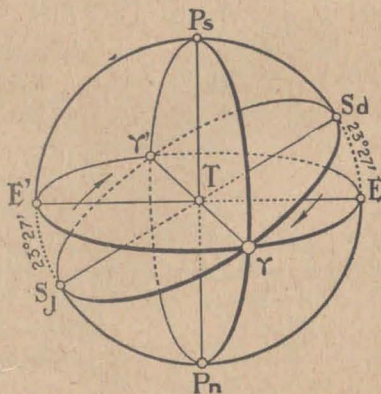


Fig. 52. — La eclíptica.

como semisuma de α_1 y α_2 , ascensiones rectas de los bordes oriental y occidental del Sol al culminar en el semimeridiano. En cuanto a δ , se obtiene procediendo de igual modo con δ_1 y δ_2 , declinaciones de los bordes superior e inferior del astro en análogas condiciones. Como el Sol, cuyo diámetro aparente es de $32'$ (68) tarda de 2 a 3 minutos para desfilar ante el semimeridiano, ambas determinaciones se hacen al mismo tiempo.

La eclíptica, $S_d\gamma S_j\gamma'$ así obtenida, es una circunferencia máxima de la esfera celeste, ubicada en un plano que forma con el del Ecuador un ángulo de $23^\circ 27'$, llamado *oblicuidad* o *inclinación* (fig. 52).

73. EQUINOCCIOS, SOLSTICIOS, COLUROS. — En el párrafo 43 se han definido los equinoccios γ y γ' como puntos de intersección de la eclíptica con el Ecuador. Uno de ellos, γ , es el que hemos llamado *equinoccio de marzo* o *punto vernal*, origen de las coordenadas ecuatoriales en el sistema absoluto, y origen del día sideral al culminar en el semimeridiano de un lugar. El otro γ' , es el *equinoccio de setiembre* o *punto libra*.

En cuanto a los puntos S_d y S_j de figura 52, que corresponden a la mayor declinación austral y boreal respectivamente del Sol, son los *solsticios* (del lat. solstitium, sol quieto). Uno de ellos, S_d , es el *solsticio de diciembre* llamado también *solsticio hiemal* (de invierno) por los astrónomos del hemisferio norte, y el otro, S_j , el *solsticio de junio* o *solsticio vernal* (de verano), para aquel hemisferio. Para nosotros, es solsticio de verano el S_d , y de invierno el S_j . El Sol en las cercanías de cada solsticio parece detener durante unos días su movimiento en declinación (71).

Coluros son los círculos horarios (12) que pasan por los equinoccios y los solsticios. El primero de ellos $P_s\gamma P_n\gamma'$, es el *coluro de los equinoccios*, integrado por dos semicírculos horarios de los cuales es de 0h el que contiene al punto vernal, y de XIIh el que pasa por el punto libra. El otro, es el *coluro de los solsticios*, $P_sS_dP_nS_j$, integrado por los semicírculos horarios, de VI horas, correspondiente a S_j , y de XVIII horas, correspondiente a S_d . Ambos coluros son perpendiculares entre sí, y al ponerse en coincidencia con el semimeridiano del lugar, indican los instantes en que el reloj sideral debe acusar 0h, 6h, 12h o 18h. Por cada solsticio pasa un trópico: el de *Capricornio*, o paralelo celeste de $23^\circ 27'$ austral, corresponde a S_d , y el de *Cáncer* o paralelo celeste de $23^\circ 27'$ boreal, a S_j .

74. EL ZODIACO Y SUS DOCE CONSTELACIONES. — El Zodíaco (del lat. zodiacus, y éste del gr. zodiakos, animal), es la zona o faja de cielo de 18° a 20° de amplitud, por cuyo centro pasa la eclíptica (fig. 53).

Fueron los astrólogos de *Babilonia* los que primero dividieron a esta faja en 12 porciones o "*casas del Sol*" que el astro iba recorriendo una tras otra durante el año. En cada una de estas "*casas*", en un principio, estaba ubicada una constelación de las llamadas zodiacales, por lo cual, y dada la distinta extensión abarcada por cada uno de estos grupos de estrellas, las divisiones resultaban muy desiguales entre sí. Más tarde, HIPARCO dividió al Zodíaco en

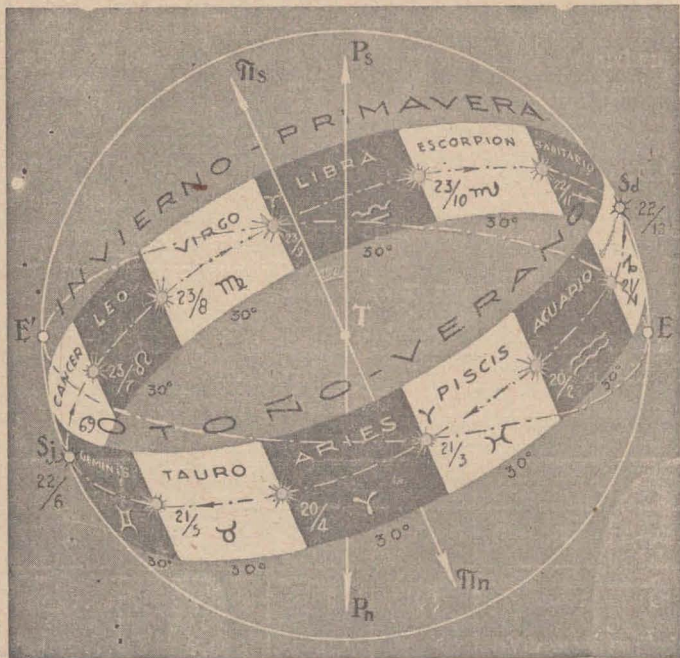


Fig. 53. — Los doce signos del Zodíaco.

12 partes iguales de 30° cada una, a las que se llamó *signos del Zodíaco*. El primer signo, llamado *Aries*, se tomó a partir desde el *punto vernal* γ , hacia el oriente; le seguían *Taurus*, *Gemini*, *Cáncer*, etc. En cuanto a los nombres asignados a los signos, fueron tomados de las constelaciones más cercanas a los mismos. Como se verá después, no puede establecerse concordancia lógica entre un signo del zodiaco y la constelación del mismo nombre, desde que aquéllos se desplazan con respecto a éstas en el sentido retrógrado, en 1° por cada 70 años aproximadamente.

En el cuadro siguiente se consignan las fechas en que el Sol entra en cada uno de los 12 signos del Zodíaco, así como los valores

de la ascensión recta α y la declinación δ del centro del astro, en tales fechas.

FECHAS	Entra el Sol en:		α	δ
21 de marzo	γ	Aries	0h	0°
20 „ abril	τ	Taurus	2h	+ 11° 30'
21 „ mayo	Π	Gemini	4h	+ 20° 10'
21 „ junio	$\var�$	Cáncer	6h	+ 23° 27'
23 „ julio	$\var�$	Leo	8h	+ 20° 10'
23 „ agosto	m	Virgo	10h	+ 11° 30'
23 „ setiembre	u	Libra	12h	0°
24 „ octubre	m	Escorpio	14h	— 11° 30'
23 „ noviembre	$\nearrow$	Sagitario	16h	— 20° 10'
22 „ diciembre	z	Capricornio	18h	— 23° 27'
20 „ enero	z	Acuario	20h	— 20° 10'
19 „ febrero	)-(	Piscis	22h	— 11° 30'

75. OBLICUIDAD DE LA ECLIPTICA.—Se dijo en otro lugar, que el plano de la eclíptica forma con el del ecuador celeste un ángulo llamado oblicuidad, y cuyo valor es actualmente de 23°27'. HIPARCO, alrededor de un siglo y medio antes de nuestra era, fué quien por primera vez midió la oblicuidad, obteniendo 23°52', con lo cual habría experimentado un descenso de 25' en algo más de 20 siglos.

La variación de la oblicuidad, obedece a un lento balanceo del plano eclíptico, con relación al del Ecuador, cuyo período es de unos 30.000 años, y que lleva a la oblicuidad desde un valor máximo de 24°55', a otro mínimo de 22°15'. En la actualidad está en descenso, pero llegado al último de los límites indicados, se iniciará el ascenso correspondiente.

76. EL SOL EN SU RECORRIDO SOBRE LA ECLIPTICA: LAS ESTACIONES.—En su movimiento anual (fig. 52), el Sol pasa por los puntos culminantes de la eclíptica, equinoccios y solsticios, en fechas más o menos fijas.

Hacia el 21 de marzo, el centro del astro se ubica en el *punto vernal* γ , iniciándose en dicho instante la *primavera* en el hemisferio norte de la Tierra, y el *otoño* en el sur. En esta fecha, el Sol recorre en su movimiento diurno el Ecuador celeste, y su declinación es: $\delta = 0^\circ$.

En los días siguientes, van en ascenso las declinaciones, por haberse internado el astro en el hemisferio celeste boreal, alcanzando un valor máximo hacia el 22 de junio al ubicarse el centro

del Sol en el *solsticio* S_j . En tal instante se tendrá: $\delta = 23^\circ 27'$, y el recorrido del Sol en esa fecha, en su movimiento diurno, es el trópico celeste de Cáncer. Comienza el *verano* en el hemisferio terrestre boreal, y el *invierno* en el austral.

A partir de este solsticio, las declinaciones boreales del astro empiezan a descender, hasta tomar de nuevo el valor $\delta = 0^\circ$ hacia el 23 de *setiembre* al ubicarse su centro sobre el punto libra γ' , instante en que se inicia el *otoño* en el hemisferio boreal, y la *primavera* en el austral. En esa fecha el camino diurno del Sol sobre la esfera celeste es otra vez el ecuador celeste.

Después del 23 de *setiembre*, se interna el Sol en el hemisferio austral donde permanecerá otros 6 meses, tomando declinaciones entre los 0° y los $-23^\circ 27'$. Alcanza esta última hacia el 21 de *diciembre* en el instante en que su centro llega al *solsticio* S_d , dando lugar a la iniciación del *invierno* en el hemisferio norte, y el *verano* en el sur.

Tres meses después, y hacia el 21 de marzo, el Sol está de nuevo en el equinoccio vernal.

El cuadro que sigue resume todo lo relativo al recorrido anual del Sol sobre la eclíptica y las estaciones originadas en ambos hemisferios de la Tierra. En la tercer columna se dan las coordenadas ecuatoriales absolutas del astro, ascensión recta α y declinación δ , en las fechas de los equinoccios y los solsticios.

Fechas aproximadas	Posición del Sol	Coordenadas		Estación que se inicia	
		α	δ	Norte	Sur
21 marzo	γ	0°	0°	Primavera	Otoño
22 junio	S_j	90°	$23^\circ 27'$	Verano	Invierno
23 setiembre ..	γ'	180°	0°	Otoño	Primavera
22 diciembre ..	S_d	270°	$-23^\circ 27'$	Invierno	Verano

* 77. HORA DEL EQUINOCCIO VERNAL. — Para conocer el instante preciso en que el centro del Sol se ubica en el punto vernal γ , o sea aquel que inicia la primavera en el hemisferio norte de la Tierra, y el otoño en el sur, debe tomarse en cuenta que en tal instante la declinación del centro del Sol debe ser: $\delta = 0^\circ$.

La determinación debe hacerse hacia el 21 de marzo, eligiendo dos mediodías consecutivos, tales que, en el primero la declinación del centro solar sea negativa (austral) y en el segundo positiva. En esas condiciones, el equinoccio se ha producido a determinada hora comprendida entre las de los dos mediodías mencionados, pudiéndonos fijar con mucha aproximación, suponiendo que las variaciones en declinación durante cortos intervalos de tiempo (en este caso 24 horas) sean proporcionales a dichos intervalos.

Supongamos que tomada la declinación del centro del Sol a mediodía el 21 de marzo se haya obtenido: $\delta = -0^{\circ}4'37''$, y para el 22, en análogo instante: $\delta = 0^{\circ}19'4''$.

El valor de δ ha variado entonces en $0^{\circ}23'41''$, en las 24 horas transcurridas entre las dos observaciones, y el problema queda resuelto determinando cual habrá sido el tiempo empleado en una variación de $0^{\circ}4'37''$. Dicho resultado, sumado a la hora de la primera observación, nos dará el tiempo en que se produjo la coincidencia del centro solar con el punto γ o sea la hora del equinoccio. Establecida la proporción, obtendremos:

$$23'41'' : 24h = 4'37'' : X,$$

de la cual:

$$X = 4h40m42s,$$

es decir, que la coincidencia buscada se ha producido 4h40m42s después del mediodía, el 21 de marzo.

78. AÑO TRÓPICO.—Es el tiempo que transcurre entre dos encuentros consecutivos del centro del Sol con el *punto vernal* γ .

Durante el año trópico, y como se verá al estudiar la precesión de los equinoccios, el Sol no ha recorrido los 360° de la eclíptica, pues en el mismo tiempo el punto γ se ha desplazado en sentido retrógrado, y por lo tanto al encuentro del Sol, en $50''$ aproximadamente. Luego el arco de eclíptica recorrido en un año trópico equivale a $359^{\circ}59'10''$.

La duración del año trópico es de 365d5h48m46s, cometiéndose un error de 11m14s cuando se le asigna el valor de 365d,25.

79. AÑO SIDERAL.—Es el tiempo que emplea el Sol en recorrer los 360° de la eclíptica, o en otros términos, el que transcurre entre dos encuentros consecutivos del centro del Sol con un mismo *punto fijo del cielo* (una estrella). Teniendo en cuenta que el Sol durante el año trópico recorre $359^{\circ}59'10''$ de la eclíptica, una proporción nos dará la duración del año sideral calculando el tiempo empleado por el astro en recorrer los 360° de su órbita anual. Obtenemos como duración del año sideral 365d6h9m aproximadamente.

Durante un año sideral, el Sol cierra en el cielo su recorrido entre las constelaciones del Zodiaco.

El *año anomalístico*, es el tiempo que transcurre entre dos encuentros consecutivos del centro del Sol con el *perigeo* (68). Su duración aproximada: 365d6h13m.

COORDENADAS ECLIPTICAS

80. EJE Y POLOS ECLIPTICOS.—Siendo la eclíptica un círculo máximo de la esfera celeste, su eje pasará por el centro T , formando con el eje del mundo $P_s P_n$ un ángulo igual a la oblicuidad (75) o sea $23^{\circ}27'$ (fig. 54). El eje de la eclíptica intercepta a la esfera celeste en dos puntos diametralmente opuestos π_s y π_n llamados *polos de la eclíptica*. La declinación de los polos eclípticos

es de $66^{\circ}33'$, o sea el complemento de la oblicuidad, austral o negativa para π_s , y boreal o positiva para π_n .

81. CIRCULOS DE LONGITUD.— Son los círculos máximos de la esfera celeste que pasan por los polos eclípticos y que contienen por lo tanto al eje $\pi_s\pi_n$. Por cada astro A del Cielo, pasa un círculo

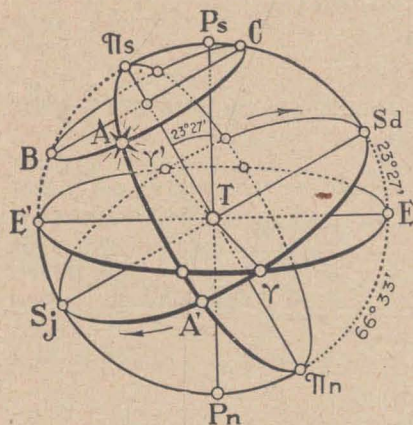


Fig. 54.—Eje y polos eclípticos. Círculos de longitud y latitud.

de longitud, dividido en dos semicírculos por el eje eclíptico, de los cuales uno contiene al astro. En la figura 54, el semicírculo de longitud del astro A es el $\pi_s A \pi_n$. Todos los círculos de longitud están ubicados en planos normales al de la eclíptica.

En particular, reviste especial importancia para el estudio de las coordenadas eclípticas, el semicírculo de longitud correspondiente al punto vernal γ .

82. CIRCULOS DE LATITUD.— Son las secciones de la

esfera celeste con planos normales al eje $\pi_s\pi_n$ de la eclíptica, siendo por lo mismo paralelos a ésta y perpendiculares a los círculos de longitud. Por cada astro o punto del Cielo, pasa un determinado círculo de latitud: el del astro A es el BC , y el de los equinoccios y solsticios la misma eclíptica.

Los círculos de longitud y latitud de un astro, fijan su posición sobre la esfera celeste.

83. COORDENADAS ECLIPTICAS: LONGITUD Y LATITUD ASTRAL.— En este sistema, la posición de un astro

se fija con respecto a la eclíptica tomada como plano fundamental o de referencia, y al punto vernal γ como origen. En estas condiciones (15), el eje fundamental es el de la eclíptica, tomándose como polo principal el

π_n para la determinación del sentido (18). Las coordenadas eclípticas son: la *longitud astral* λ (lambda) y la *latitud astral* l .

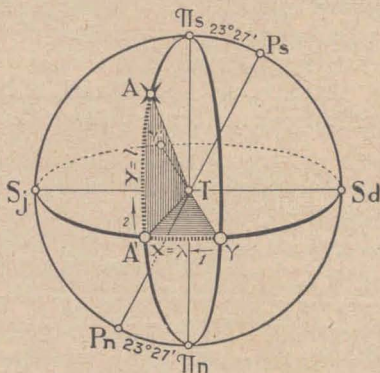


Fig. 55.—Coordenadas eclípticas.

Longitud de un astro (o punto del Cielo) es su abscisa esférica relativa a la eclíptica y al punto vernal.

En la figura 55, $\gamma S_j \gamma' S_d$ es la eclíptica; $\pi_s \pi_n$ su eje; $\pi_s S_d \pi_n S_j$ el coluro de los solsticios (73); $\pi_s \gamma \pi_n$ el semicírculo de longitud del punto vernal γ , y $\pi_s A \pi_n$ el del astro A. Se ha trazado además la posición $P_s P_n$ del eje del mundo con fines de orientación.

Según definición, se tendrá por fig.:

$$\lambda = X = \text{arc. } \gamma A'.$$

Se la cuenta en el sentido directo de flecha 1 (polo principal π_n) a partir del origen γ , de 0° a 360° .

Las longitudes del Sol en las fechas que inician las estaciones son:

21 de marzo,	$\lambda = 0^\circ$	por hallarse el astro en el punto vernal γ .
22 „ junio,	$\lambda = 90^\circ$	„ „ „ „ „ „ solsticio S_j .
23 „ setiembre,	$\lambda = 180^\circ$	„ „ „ „ „ „ equinoccio γ' .
22 „ diciembre,	$\lambda = 270^\circ$	„ „ „ „ „ „ solsticio S_d .

Latitud de un astro (o punto del cielo) es su ordenada esférica relativa a la eclíptica. Será según figura:

$$l = Y = \text{arc. } AA'.$$

Se la mide de 0° hasta 90° a partir de la eclíptica, considerando, por convención, positivas las de los astros situados al norte de la eclíptica, y negativas las de aquellos situados al sur de la misma. Los polos celestes P_s y P_n tienen por latitud astral: $l = -66^\circ 33'$ y, $l = +66^\circ 33'$, respectivamente, y magnitudes muy cercanas a éstas, las respectivas estrellas polares.

La latitud del Sol es constantemente nula ($l = 0^\circ$) por moverse dicho astro sobre la eclíptica.

CONSECUENCIAS DEL MOVIMIENTO ANUAL DEL SOL. DESIGUALDAD DE LOS DIAS Y LAS NOCHES EN UN MISMO LUGAR

84. PARALELOS CELESTES RECORRIDOS POR EL SOL A LO LARGO DEL AÑO. — En el párrafo 76, se ha estudiado el movimiento anual del Sol sobre la eclíptica.

Se sigue de ello, que *el Sol se mueve de trópico a trópico*, y que si componemos su movimiento anual sobre la eclíptica con el movimiento diurno durante los 6 meses comprendidos entre el 22 de junio y el 22 de diciembre, obtendremos como imagen del recorrido, la figura de un resorte helicoidal con un abultamiento en la parte central, correspondiendo las espiras extremas a los trópicos de *Cáncer* y *Capricornio*, respectivamente, y la central al Ecuador. Cada una de las demás espiras es *aproximadamente* un paralelo celeste.

En los 6 meses restantes la trayectoria vuelve a ser la misma, pero el avance es de *Capricornio* a *Cáncer*.

En la figura 56, se ha proyectado la esfera celeste sobre el círculo horario (12) que pasa por π_s y π_n , polos de la eclíptica. Esta aparece proyectada según SS' . Las trazas de los trópicos de Cáncer y Capricornio son $S'D$ y SC , respectivamente, mientras que las de

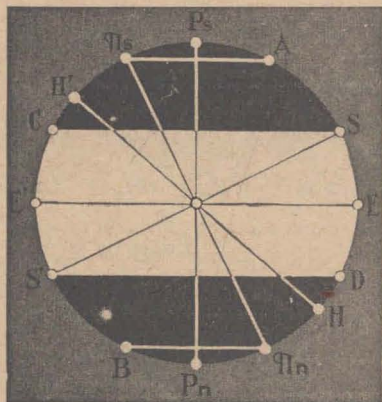


Fig. 56. — Paralelos celestes recorridos por el Sol.

los círculos polares antártico y ártico se aprecian en $\pi_s A$ y $\pi_n B$.

La parte en blanco es la zona del cielo barrida por los paralelos celestes recorridos por el Sol en los 6 meses que transcurren entre las fechas de los solsticios.

Si suponemos en la figura, que HH' es el horizonte de un cierto lugar de la Tierra, visto en su traza, notaremos inmediatamente que los distintos paralelos recorridos por el Sol, no trazados en la figura con excepción del Ecuador, quedan divididos por HH' en porciones desiguales, lo que acarrea la desigualdad entre los arcos diurnos y nocturnos (69), y en consecuen-

cia la distinta duración del día y de la noche en diversas fechas del año, salvo para posiciones especiales del lugar que se verán en los párrafos siguientes.

85. DESPLAZAMIENTO ANUAL DEL PARALELO DIURNO DEL SOL. — Supongamos al observador situado en una localidad austral de la Tierra siguiendo al paralelo celeste recorrido por el Sol día tras día, a partir del 22 de diciembre en que el astro por recorrer el trópico de Capricornio, está más internado en su hemisferio.

En los días sucesivos, notará un alejamiento del paralelo solar hacia el norte, el cual se ubicará sobre el ecuador celeste hacia el 21 de marzo. Continuará el alejamiento en el mismo sentido otros tres meses, al cabo de los cuales se pondrá en coincidencia con el trópico de Cáncer hacia el 22 de junio, por haber llegado el Sol al solsticio S_j . En esta fecha, el Sol, para el observador, pasará por su semimeridiano a mediodía adquiriendo la mínima altura de culminación de todo el año, con lo cual los rayos solares llegarán a su máxima oblicuidad respecto a la vertical del lugar. En los seis meses siguientes se desarrollará el proceso inverso, coincidiendo el paralelo solar otra vez con el Ecuador hacia el 23 de setiembre y con el trópico de Capricornio el 22 de diciembre al llegar el Sol al solsticio S_j . En esta fecha, el Sol tomará su máxima altura meridiana para el observador, y su mínima inclinación respecto a la vertical, los rayos solares.

Como se comprenderá, para el observador boreal pasará lo inverso en las fechas apuntadas.

86. EL DÍA Y LA NOCHE EN LA LATITUD DE BUENOS AIRES Y LA PLATA (35° S.). — Como la velocidad del Sol en su movimiento diurno puede considerarse poco menos que constante (15° por hora del reloj), se sigue que las duraciones del día y la noche en un determinado lugar en cualquier fecha del año son proporcionales a los respectivos arcos diurnos y nocturnos.

Por medio de sencillas representaciones gráficas pueden estudiarse aquellas duraciones para cualquier lugar de la Tierra conociéndose la latitud del mismo.

En la figura 57, $P_s P_n$ es el eje del mundo inclinado en 35° sobre el horizonte HH' del lugar; EE' es la traza del Ecuador celeste sobre el meridiano $zP_s nP_n$; $S_d A$ y BS_j son las trazas o proyecciones sobre el meridiano, de los trópicos de Capricornio y Cáncer respectivamente.

Sobre dichos trópicos, lo mismo que sobre el Ecuador, se han anotado las fechas en que son recorridos por el Sol, habiéndose trazado llenas las proyecciones de los arcos diurnos recorridos por el astro del día, y punteadas las nocturnas. En cuanto a zn , es la vertical del lugar.

Como lo muestra la figura, el mayor arco diurno $S_d A'$, corresponde al 22 de diciembre cuando el Sol recorre el trópico de Capricornio, y el menor al 22 de junio al recorrer el de Cáncer, y en consecuencia en tales fechas se registran los días de máxima y mínima duración respectivamente. En dos fechas del año, 23 de setiembre y 21 de marzo, al recorrer el Sol el ecuador celeste se igualan los arcos diurno y nocturno, y los días y las noches son de igual duración. La máxima altura la adquiere el Sol el día 22 de diciembre a mediodía al culminar en la semimeridiano en S_d . Si designamos por $h_{\max}$ a dicha altura, la figura permite deducir fácilmente siendo φ la latitud:

$$h_{\max} = (90^\circ - \varphi) + 23^\circ 27'.$$

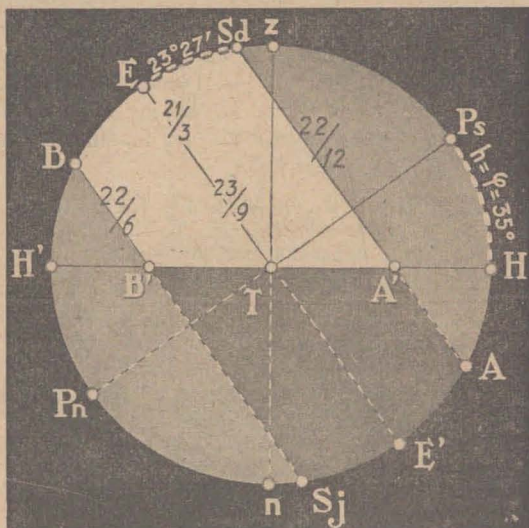


Fig. 57. — El día y la noche en la latitud de 35° S.

La altura mínima a mediodía se registra el 22 de junio (entrada del invierno) en que el Sol culmina en el punto B del semimeridiano. Designándola por $h_{\min}$, se tendrá de la figura:

$$h_{\min} = (90^\circ - \varphi) - 23^\circ 27'.$$

Estas dos últimas relaciones, de carácter general, aplicadas a la latitud de 35° S. conducen a:

$$h_{\max} = 78^\circ 27' \quad \text{y} \quad h_{\min} = 31^\circ 33'.$$

La figura demuestra, además, que los días en las localidades del hemisferio austral de la Tierra, crecen desde el 22 de junio al 22 de diciembre, y decrecen en los seis meses restantes. Como se comprenderá, pasa lo inverso en los lugares del hemisferio boreal.

87. EL DÍA Y LA NOCHE EN LATITUDES ESPECIALES DE LA TIERRA.—En las figuras 58, 59, ..., 63, pueden seguirse todas las variantes experimentadas por los arcos diurnos y nocturnos recorridos por el Sol a lo largo del año, y en consecuencia todo lo relativo a duraciones del día y la noche, en el ecuador de la Tierra; en la zona tórrida (latitud de Lima); en el trópico de Capricornio (aproximadamente en Río de Janeiro); en el círculo polar Antártico; en la zona glacial (cas-

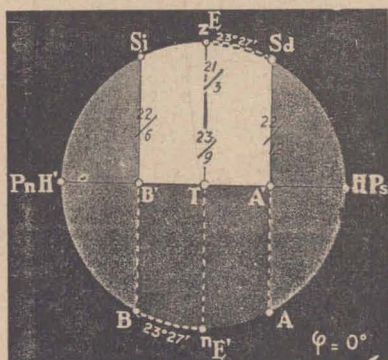


Fig. 58. — El día y la noche en el Ecuador.

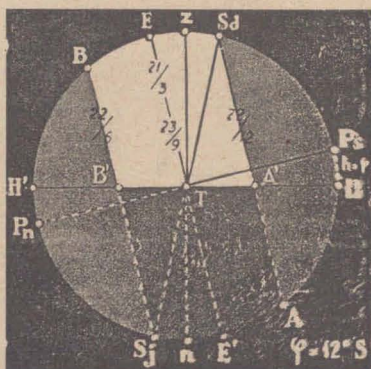


Fig. 59. — El día y la noche en la latitud de 12° S.

quete polar austral); y en el Polo Sur de la Tierra. Las referencias en todas las figuras, son las mismas dadas para la figura 57.

En el Ecuador (fig. 58), días y noches son iguales en toda fecha del año. La meridiana es el eje del mundo y la vertical está en el plano del Ecuador celeste. En las fechas de los equinoccios el Sol a mediodía pasa por el cenit y una varilla vertical no proyecta sombra.

En la zona tropical (fig 59), el Sol pasa por el cenit a mediodía en dos fechas del año.

En cualquiera otra fecha a mediodía, la sombra se proyectará sobre la meridiana, bien hacia el Norte, bien hacia el Sur, con lo cual, a diferentes horas y a lo largo del año podrá dicha sombra proyectarse según todos los rumbos posibles.

En el *trópico* (fig. 60), el Sol pasa por el cenit a mediodía en la fecha del respectivo solsticio, por lo cual la eclíptica es plano vertical en tal instante.

En el *círculo polar* (fig. 61), hay un día que transcurre sin noche y una noche sin día, que se llevan a cabo en las fechas de los solsticios,

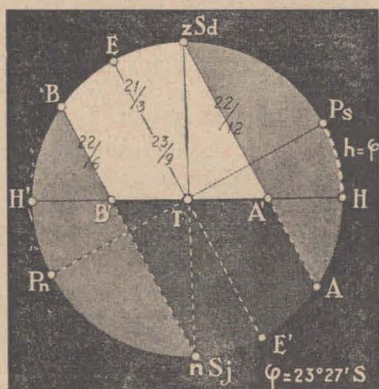


Fig. 60. — El día y la noche en el trópico de Capricornio.

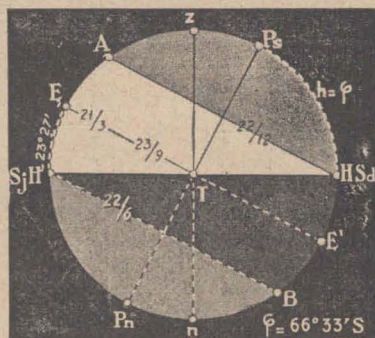


Fig. 61. — El día y la noche en el círculo polar antártico.

en las que en determinado momento la eclíptica coincide con el horizonte del lugar.

En la *zona glacial* (fig. 62), en ciertas épocas, el Sol recorre consecutivamente diversos paralelos, en los semiespacios superior e inferior al

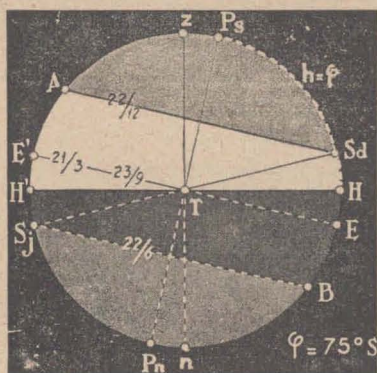


Fig. 62. — El día y la noche en la zona glacial antártica.

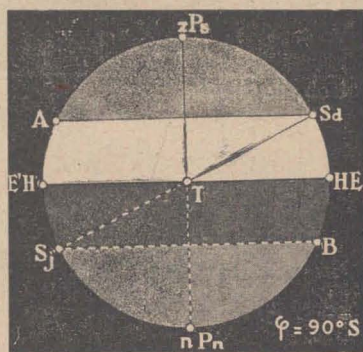


Fig. 63. — El día y la noche en el Polo Sur.

horizonte, por lo que hay días y noches que se prolongan durante varias fechas consecutivas.

En el *polo* (fig. 63), el año transcurre en un día y una noche de seis meses cada uno. El Ecuador celeste es el horizonte, y el eje del mundo la vertical. Cada 24 horas el Sol describe, aproximadamente, una almicerada (14).

* 88. DURACION DEL DIA EN LA LATITUD φ PARA LA DECLINACION δ DEL SOL. — Por un procedimiento gráfico muy simple, puede obtenerse con alguna aproximación la duración pedida.

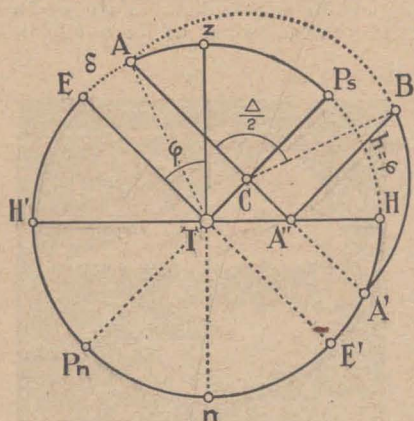


Fig. 64. — Duración del día para la declinación δ del Sol.

En la figura 64, el círculo $zP_s nP_n$, es el meridiano del lugar. A partir del Ecuador, llévase sobre el meridiano el arco EA igual a la declinación δ del Sol en una determinada fecha del año. Por A tracemos AA' paralelamente al Ecuador EE' y tendremos en AA'' la proyección del arco diurno, siendo $A''A'$ la del nocturno. Rebatiendo el semiparalelo solar AA' sobre el meridiano, obtendremos la semicircunferencia ABA' y trazando $A''B$ perpendicular a AA' , el arco AB será el semiarco diurno recorrido por el Sol en dicha

fecha. Llamando Δ (delta) a la magnitud de todo el arco diurno, el ángulo ACB , duplicado, proporcionará su valor, que reducido a tiempo a razón de 15° por hora resolverá el problema.

89. CREPUSCULOS. — Se denominan así a los períodos de semicircularidad que preceden la salida del Sol y siguen la puesta del astro.

Al crepúsculo de la mañana se le suele llamar *aurora* o *alba*, y al de la tarde, *ocaso*.

Se distinguen dos especies de crepúsculos:

- a) *Astronómico*.
- b) *Civil*.

El primero, comienza o termina, cuando el Sol está a 18° bajo el horizonte, condición ésta ya fijada por el astrónomo árabe AL HAZEN a principios del siglo XI. Al iniciarse por la mañana, y al terminar por la tarde, apenas se divisan los objetos terrestres, pero en el Cielo pueden contemplarse las estrellas que abarcan las seis primeras magnitudes.

El crepúsculo civil se inicia o finaliza cuando el Sol está a 6° bajo el horizonte del lugar; durante él pueden leerse los impresos, y en los instantes de comienzo o fin, sólo se divisan en el Cielo las estrellas de 1^a magnitud.

La duración de ambos crepúsculos, varía en primer lugar con la latitud, siendo mínima en el Ecuador y máxima en los polos de la Tierra, y en segundo, con la declinación del Sol en las distintas

épocas del año, alargándose en las fechas de los solsticios y acortándose en la de los equinoccios.

Los largos crepúsculos hacen que la noche cerrada en los polos terrestres, no alcance a tener una duración superior a dos meses, debiendo ser de seis meses (87) sin los crepúsculos.

Se deben los crepúsculos, a que el Sol situado en *S* (fig. 65), siempre que diste menos de 18° del horizonte *HH'* del lugar *L*, ilumina la porción *BAC* de la capa atmosférica que en-

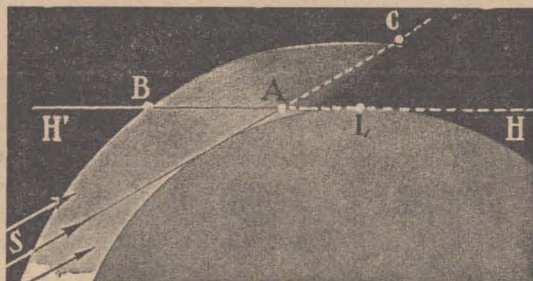


Fig. 65. — El crepúsculo.

vuelve al planeta; las partículas de aire contenidas en dicha porción, al difundir la luz a las zonas cercanas les proporcionan una cierta iluminación.

En el cuadro que sigue se da la duración del crepúsculo astronómico para diversas latitudes en las fechas de los equinoccios y solsticios.

DURACION DEL CREPUSCULO

Latitud	21 de junio	21 de marzo 23 de setiembre	22 de diciembre
0° Sur	1h19m	1h19m	1h19m
15° „	1h20m	1h15m	1h24m
35° „	1h35m	1h29m	1h52m
45° „	1h53m	1h44m	2h39m
55° „	2h26m	2h10m	} SIN NOCHE CERRADA
65° „	4h 3m	3h 8m	

CAPITULO SEGUNDO

LA ORBITA ANUAL DEL SOL: LEY DEL MOVIMIENTO

90. DETERMINACION DE LA ORBITA DEL SOL. — Al estudiar los desplazamientos del Sol entre las constelaciones zodiacales (72) hemos llamado *eclíptica* a la circunferencia máxima que describe el astro sobre la esfera celeste en un año; pero aquélla no representa en forma alguna el verdadero recorrido u órbita del astro, pues no es más que su proyección sobre la esfera del Cielo.

Antes de pasar a determinar la órbita verdadera, agreguemos que la misma es recorrida por el Sol, sólo en apariencia, ya que es la Tierra quien la describe en realidad, en sus traslaciones anuales alrededor del Sol.

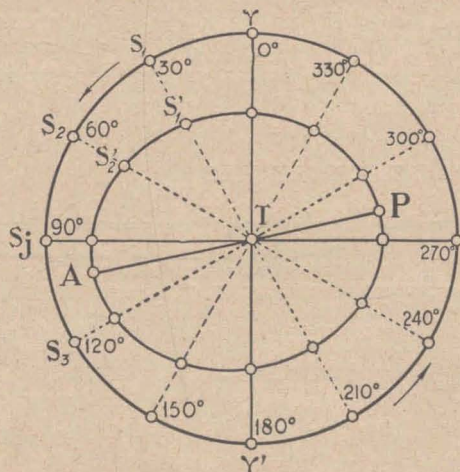


Fig. 66. — La órbita del Sol (N. D.).

La determinación de dicha órbita se hace en base a los *diámetros aparentes* que toma el Sol en las distintas fechas del año y a sus respectivas *longitudes astrales* (83). Sea YS_1Y' la circunferencia de la eclíptica (fig. 66). Considerémosla dividida, p. ejm., en 12 arcos iguales a partir del punto vernal Y, y en el sentido directo de las flechas, en cuyo caso el norte de la esfera celeste está hacia arriba.

Al ubicarse el Sol en el equinoccio Y hacia el 21 de marzo, su longitud es $\lambda = 0^\circ$, y en los puntos $S_1, S_2, S_3, \dots$, etc., toma los valores $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, \dots$, etc., en conformidad con las anotaciones de la figura. Tracemos los alineamientos $TY, TS_1, TS_2, \dots$, relativos a las posiciones del Sol, y determinemos los diámetros aparentes del astro en las fechas correspondientes a las longitudes $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, \dots$. Si se llevan sobre los alineamientos mencionados, en cierta escala, segmentos *inversamente proporcionales a los diámetros aparentes*, obtendremos una serie de puntos $S'_1, S'_2, \dots$ (en número de 12 para el caso

contemplado en la figura) que por su ubicación definen la imagen de la trayectoria del Sol al cabo del año *.

Como se comprenderá, esta imagen es tanto más aproximada a la forma verdadera, cuanto más puntos se hayan determinado y mayor exactitud tengan los diámetros aparentes medidos.

Se observa que la curva obtenida es simétrica respecto a un solo eje de los trazados por la Tierra *T*. Este eje *PA*, tiene sus extremos en correspondencia con las posiciones tomadas por el Sol hacia los días 1 de enero y 1 de julio, cuando el diámetro aparente del astro toma sus valores máximo y mínimo.

91. FORMA Y POSICION DE LA ORBITA SOLAR: APSIDES.

— La curva obtenida en la determinación del par. 90, es una *elipse* donde la Tierra, *T*, ocupa uno de los focos (fig. 67). El eje mayor *PA* de la órbita, lleva el nombre de *línea de los ápsides* (del gr. *apsis*, de *apto*, enlazar) siendo *P* el *perigeo* y *A* el *apogeo* (68). Estos puntos corresponden a las posiciones tomadas por el Sol a principios de enero y julio, respectivamente. La línea de los ápsides está inclinada respecto a la de los solsticios en un ángulo que en la actualidad (año 1940) mide $11^{\circ}40'$, y que crece a razón de $1'1''$ por año en virtud de dos movimientos que se estudiarán más adelante.

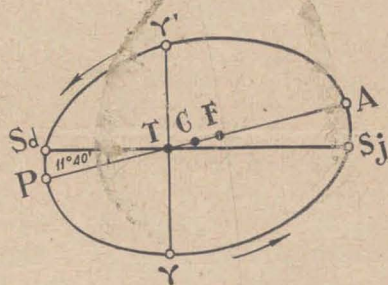


Fig. 67. — Forma y posición de la órbita del Sol. (N. D.).

En la figura 67, el punto *C* es el centro de la órbita, y *F* el otro foco.

92. EXCENTRICIDAD DE LA ORBITA. — La forma verdadera de la órbita solar, la obtenemos calculando su excentricidad. Se llama *excentricidad de una elipse*, a la razón entre las longitudes de la distancia focal, y el eje mayor de la curva. Para el caso de la trayectoria del Sol (fig. 67) designándola por *e*, será:

$$e = \frac{TF}{PA}$$

Procedemos a determinar su valor numérico. Designemos por δ_1 y δ_2 a los diámetros aparentes máximo y mínimo del Sol, obtenidos con seis meses de intervalo al ubicarse el astro en el perigeo *P* y el apogeo *A*, respectivamente.

* Hemos exagerado la excentricidad de la órbita, con fines didácticos. En realidad la elipse que se obtiene difiere poco de la circunferencia.

Llamemos d_1 y d_2 a las distancias máxima y mínima del Sol a la Tierra, es decir:

$$d_1 = TA; \quad d_2 = TP.$$

Por ser las distancias inversamente proporcionales a los diámetros aparentes, podremos escribir:

$$TA = \frac{C}{\delta_2}; \quad TP = \frac{C}{\delta_1},$$

donde C es una cierta constante.

Por otra parte obtenemos de la figura:

$$e = \frac{TF}{PA} = \frac{TA - TP}{TA + TP} = \frac{\frac{C}{\delta_2} - \frac{C}{\delta_1}}{\frac{C}{\delta_2} + \frac{C}{\delta_1}} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1 + \delta_2}.$$

Recordando (68), que:

$$\delta_1 = 32'32'' \quad \text{y} \quad \delta_2 = 31'28'',$$

resulta para valor de la excentricidad:

$$e = \frac{64''}{64'} = \frac{1}{60} = 0,01666.$$

Con más exactitud, se admite, $e = 0,01675^*$. Este valor, muy pequeño, demuestra que la órbita del Sol es una *elipse poco alargada*, y por lo tanto, parecida a la circunferencia (la circunferencia es una elipse cuya excentricidad es $e = 0$).

93. VELOCIDAD ANGULAR DEL SOL: SU VARIACION EN EL TRANCURSO DEL AÑO.—Se llama *velocidad angular* ω (omega) del Sol, al arco de eclíptica recorrido en la unidad de tiempo. Dicho arco representa el aumento de longitud (83) que experimenta el astro en aquel lapso.

Si se determina el valor de ω en distintas épocas del año, se observa que crece en el trayecto apogeo-perigeo, es decir, entre el 1 de julio y el 1 de enero, decreciendo en los seis meses siguientes mientras el astro cubre el recorrido perigeo-apogeo. Se observa que el valor máximo de ω es $1^{\circ}1'10''$ por día, al pasar el Sol por el perigeo, y el mínimo, $57'11''$, al pasar por el apogeo.

En términos generales, podemos admitir que el desplazamiento del Sol en longitud es, aproximadamente, de 1° por día (360° en 365d.) lo cual presenta cierta analogía con las variaciones del Sol

* Ese valor se obtiene considerando los diámetros aparentes del Sol durante todo el año.

en ascensión recta (70). La analogía apuntada proviene de la poca oblicuidad de la eclíptica.

94. RELACION ENTRE LA VELOCIDAD ANGULAR DEL SOL Y SU DISTANCIA A LA TIERRA. — Las observaciones demuestran que a mayor diámetro aparente, δ , del Sol, corresponde mayor velocidad angular ω . Luego, el valor de la última magnitud podrá expresarse en función de la primera, y por consiguiente, también de la distancia d que separa al Sol de la Tierra. La ley que se obtiene de la observación directa es la siguiente:

La velocidad angular del Sol es proporcional al cuadrado de su diámetro aparente. Podemos, entonces, escribir:

$$\omega = K' \delta^2$$

donde K' es una constante.

Atendiendo a la relación entre los valores de δ y d (2; 68), de la anterior se obtiene:

$$\omega = \frac{K}{d^2}$$

donde $K = K' \cdot 4r^2$.

Por lo tanto:

La velocidad angular del Sol, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que lo separa de la Tierra.

De la fórmula últimamente escrita, deducimos:

$$d^2 \omega = K \text{ (constante).} \quad [1]$$

Esta relación define la ley según la cual se mueve el Sol en su trayectoria aparente anual, y en consecuencia la Tierra, en su traslación real alrededor de aquel astro.

95. LEY DE LAS AREAS. — Se llama *radio vector* del Sol, al segmento rectilíneo que une su centro con el de la Tierra. En todo instante, el radio vector, variable en sentido creciente desde el perigeo al apogeo, proporciona la distancia Sol-Tierra.

Sean S_1 y S_2 dos posiciones del Sol correspondientes a los extremos de un cierto intervalo de tiempo t que supondremos muy pequeño. De este modo (fig. 68) el ángulo S_1TS_2 que designaremos por α (alfa) será también muy pequeño, y la velocidad angular del Sol en ese intervalo será:

$$\omega = \frac{\alpha}{t}$$

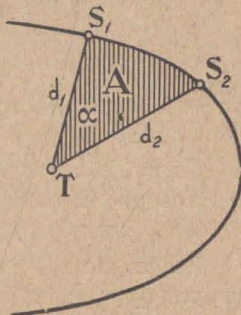


Fig. 68. — Ley de las áreas

Si designamos por A el área del triángulo S_1TS_2 , ya que el arco S_1S_2 , por ser muy pequeño, se confunde con la cuerda correspondiente, se podrá escribir:

$$A = \frac{1}{2} d_1 d_2 \operatorname{sen} \alpha,$$

y siendo α infinitamente pequeño, podrá tomarse $d_1 = d_2 = d$, con lo cual sustituyendo al seno por su arco se tiene:

$$A = \frac{1}{2} d^2 \alpha.$$

Dividiendo ambos miembros por el intervalo de tiempo t transcurrido entre el pasaje de S_1 a S_2 , se tendrá:

$$\frac{A}{t} = \frac{1}{2} d^2 \frac{\alpha}{t}.$$

El primer miembro de esta igualdad nos da el área barrida por el radio en la unidad de tiempo, que es la llamada *velocidad areal*, que designada por Δ , y por ser $\frac{\alpha}{t} = \omega$, nos lleva a:

$$\Delta = \frac{1}{2} d^2 \omega;$$

y según la [1] del párrafo anterior:

$$\Delta = \frac{K}{2} = \text{constante},$$

que es la expresión analítica de la ley de las áreas, que podrá enunciarse así:

La velocidad areal es constante, o lo que es igual: las áreas barridas por el radio vector del Sol en tiempos iguales, son iguales (o bien proporcionales a los tiempos cuando éstos son cualesquiera).

Luego, si A_1 y A_2 son áreas barridas por el radio vector en los tiempos t_1 y t_2 , tendremos siempre:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{t_1}{t_2};$$

y cuando $t_1 = t_2$, resulta: $A_1 = A_2$.

96. LAS ESTACIONES: SU DESIGUAL DURACION. — En el par. 76 nos hemos ocupado de las estaciones del año, ateniéndonos

a las fechas de iniciación en conformidad a las coincidencias sucesivas del centro del Sol con los puntos culminantes de la eclíptica, equinoccios y solsticios.

Estudiada después la verdadera forma de la órbita del Sol, y dada la posición especial que en ella toman las líneas de los equinoccios y los solsticios con respecto a la de los ápsides, se comprende por la simple inspección de la figura 69, que los tiempos empleados por el radio vector del Sol en barrer, según la ley de las áreas, las superficies A_1 , A_2 , A_3 y A_4 , deben ser desiguales. Como dichos tiempos son, respectivamente, las duraciones de la *primavera*, *verano*, *otoño* e *invierno* para el hemisferio austral (para el boreal las opuestas) deducimos, que para nosotros, la más larga de las estaciones en duración es el invierno, y la más corta el verano.

En la actualidad, según se dijo en par. 91, el punto vernal Y , y el perigeo P moviéndose en sentidos contrarios, marchan al encuentro a razón de $1'1''$ por año. Al producirse la coincidencia, dentro de unos 4580 años, según se obtiene de un cálculo simple, las estaciones se harán iguales en duración, dos a dos, a saber: el verano con el otoño, y el invierno con la primavera. En cambio hacia el año 1260, coincidieron en duración el verano con la primavera, y el invierno con el otoño, al haberse superpuesto la línea de los solsticios a la de los ápsides.

En el cuadro siguiente se dan para el hemisferio austral, la duración aproximada de las estaciones durante el año 1939. La hora adoptada es la de Buenos Aires.

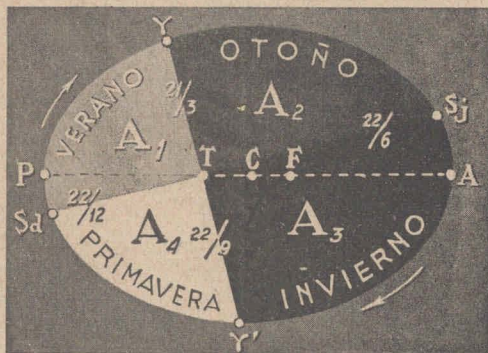


Fig. 69. — Las estaciones y su duración. (S. D.).

AÑO 1939. DURACION DE LAS ESTACIONES

ESTACION	FECHA INICIAL	HORA	DURACION
Otoño	21 Marzo	8h. 29m.	92d. 19h. 11m.
Invierno	22 Junio	3h. 40m.	93d. 15h. 10m.
Primavera	23 Setiembre ...	18h. 50m.	89d. 19h. 16m.
Verano	22 Diciembre ..	14h. 6m.	89d. 12m.

EL DÍA SOLAR MEDIO

97. DÍA SOLAR VERDADERO: CAUSAS QUE MODIFICAN SU DURACION. — *Se llama día solar verdadero al tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos del centro del Sol, por el semimeridiano de un lugar de la Tierra (17).*

Si medimos su duración en todas las fechas del año, notaremos que en parte de ellas su valor es superior a 24h, y en parte inferior. Tomando la media aritmética de sus duraciones desde el 1 de enero al 31 de diciembre, obtendremos la del *día solar medio*, equivalente a 24 horas de los relojes comunes.

Mediodía verdadero es el instante en que el centro del Sol pasa por el semimeridiano del lugar, y *medianoche verdadera* cuando el mismo punto culmina en el semimeridiano opuesto (culminación inferior). Durante una parte de los días del año, dichos instantes se anticipan a las 12h. y 24h., respectivamente, de nuestros relojes, y en la otra parte se retardan.

Si nos detenemos en la investigación de las causas que modifican la duración del día solar verdadero, debemos considerar ante todo, que dada la uniformidad del movimiento diurno de la esfera celeste, *dos espacios de tiempo t_1 y t_2 son iguales, cuando durante los mismos desfilan ante el semimeridiano de un lugar, arcos iguales del ecuador celeste (o de un paralelo cualquiera del Cielo).*

Por consiguiente: para que un astro regule días constantes en duración, se requiere que cumpla una de las condiciones siguientes:

1ª *Que no tenga desplazamientos en ascensión recta.*

2ª *Que en caso de tenerlos, dichos desplazamientos den lugar a una constante diaria.*

La primera condición la llenan las estrellas (astros fijos), derivándose de ella la constancia en la duración del día sideral (29; 30). En cuanto a la segunda, no es satisfecha por astro errante alguno, originándose de ello la variación del día solar verdadero.

Dos causas impiden al Sol encuadrar en la 2ª condición perturbando entonces la duración del día solar verdadero:

a) *La ley de las áreas.*

b) *La oblicuidad de la eclíptica.*

CAUSA a). — La ley de las áreas ocasiona como efectos inmediatos, variaciones en la velocidad angular del Sol en su desplazamiento anual sobre la eclíptica, haciendo que dicha velocidad adquiera su valor máximo en el perigeo y el mínimo en el apogeo en conformidad con lo visto en parágrafo 93.

Estas variaciones dan lugar a que el incremento que experimenta diariamente el Sol en longitud (83), no sea constante, derivándose de ello una desigual variación diurna en ascensión recta, desde que ésta no es más que la proyección de aquélla sobre el

Ecuador. Se sigue que el Sol no puede regular días constantes en duración, ya que no satisface a la condición 2ª establecida más arriba.

Para suprimir este inconveniente acarreado por la ley de las áreas, hubo que idear un *sol ficticio* S_1 , desplazándose en un año sobre la eclíptica con movimiento uniforme, de modo que su longitud aumente diariamente en una constante.

CAUSA b).— Si bien S_1 elimina la perturbación originada por la causa a) sobre la duración del día solar verdadero, es insuficiente de por sí para regular días de igual duración en todas las fechas del año, puesto que sus variaciones diarias, constantes en longitud, no lo son en ascensión recta, ya que las proyecciones de arcos iguales de eclíptica sobre el Ecuador, no son en general iguales debido a la inclinación que, como sabemos, es de $23^{\circ}27'$ (ver fig. 71). En consecuencia, para eliminar la causa b) de variación, originada por la oblicuidad de la eclíptica, hubo que idear otro *sol ficticio* S_m , llamado *sol medio*, desplazándose sobre el ecuador celeste con movimiento uniforme.

98. EL PRIMER SOL FICTICIO. LONGITUD MEDIA DEL SOL. LA ECUACION DEL CENTRO.— La perturbación originada por la causa a), sobre la duración del día solar verdadero, desaparece como se acaba de ver, con la creación de un astro hipotético S_1 , llamado primer *sol ficticio*, recorriendo la órbita del Sol en un año con *movimiento uniforme*.

Atendiendo a las velocidades angulares (93) máxima y mínima adquiridas por el Sol en el perigeo P y el apogeo A , y suponiendo a los dos soles, el verdadero S y el ficticio S_1 , partiendo juntos hacia el 1 de enero del punto P , en el trayecto perigeo-apogeo, o sea, hasta el 1 de julio, será S quien marchará en ventaja, pasando lo

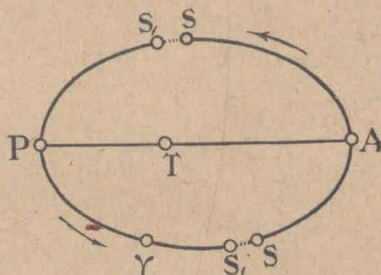


Fig. 70. — La ecuación del centro. (N. D.).

inverso en el recorrido apogeo-perigeo, es decir, desde la última fecha citada hasta el 1 de enero del año siguiente (fig. 70).

Con ello, las longitudes astrales de S y S_1 , son distintas en las diversas fechas del año, igualándose en los días del perigeo y el apogeo en que ambos soles coinciden.

Se llama *longitud media del Sol*, a la que toma en todo instante el sol ficticio S_1 . Designando con λ a la longitud verdadera del Sol (83) y con λ_m a la longitud media, se tendrá, siendo γ el punto vernal:

$$\lambda - \lambda_m = \text{arc. } \gamma S - \text{arc. } \gamma S_1 = \text{arc. } SS_1.$$

Llamando C al arco SS_1 :

$$\lambda = \lambda_m + C.$$

[1]

La diferencia C entre las longitudes verdadera y media del Sol, se llama *ecuación del centro*.

Del perigeo al apogeo, el valor de C es positivo alcanzando un máximo de unos 2° a principios de abril, para decrecer hasta 0° hacia el 1 de julio. Después de esta fecha toma valores negativos presentando un mínimo de -2° a principios de octubre, para crecer hasta 0° en la fecha del perigeo.

99. EL SOL MEDIO. LA REDUCCION AL ECUADOR. —

El sol ficticio S_m o *sol medio*, recorre el Ecuador en un año con *movimiento uniforme*. En tal condición, su ascensión recta que podemos llamar *ascensión recta media del Sol* y a la cual designaremos por α_m , será constantemente igual a la longitud media λ_m (parágrafo anterior) es decir:

$$\alpha_m = \lambda_m.$$

Sea S una posición del Sol sobre la eclíptica $YS_jY'S_d$ (fig. 71), y tracemos su semicírculo horario P_sSP_n . La longitud verdadera del Sol para la posición S será (83):

$$\lambda = \text{arc. } YS,$$

y su ascensión recta, que no es más que la proyección esférica de λ sobre el Ecuador, está dada por (50; 70):

$$\alpha = \text{arc. } YA.$$

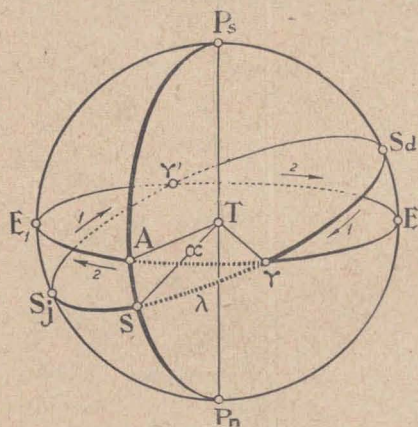


Fig. 71. — Reducción al Ecuador.

Los valores de α y λ , son en general distintos, salvo en las fechas de los equinoccios y solsticios en que se igualan en 0° , 90° , 180° y 270° . Se llama *reducción al ecuador* R , al valor positivo o negativo, que hay que sumar a la longitud λ del

Sol para obtener su ascensión recta α , es decir:

$$\alpha = \lambda + R.$$

En otros términos, la magnitud R mide la perturbación originada por la oblicuidad de la eclíptica sobre la duración del día solar verdadero, y si el Sol, como lo hace S_m , se moviera sobre el Ecuador, sería siempre $R = 0$. El valor de R varía con la época del año, entre un máximo de $2^\circ 30'$ y un mínimo de $-2^\circ 30'$, anulándose y cambiando de signo cada vez que el Sol se ubica en un equinoccio o en un solsticio al iniciarse las estaciones. Dicho valor es positivo en la primavera y el otoño, y negativo en las otras dos estaciones del año.

Si en la expresión de α , reemplazamos el valor de λ dado por la relación [1] del párrafo anterior, obtendremos:

$$\alpha = \lambda_m + (C + R),$$

donde λ_m es la longitud media del Sol que varía proporcionalmente al tiempo, y las magnitudes C y R , las perturbaciones ocasionadas en la duración del día solar verdadero por las causas a) y b) del párrafo 97.

En la figura 71, las flechas 1 dan el sentido del movimiento del Sol sobre la eclíptica, y las flechas 2 el del desplazamiento del sol medio S_m sobre el ecuador celeste. Si se supone que ambos soles parten juntos del punto vernal Υ el 21 de marzo, en seguida se separan al bifurcar sus trayectorias, pero seis meses después hacia el 23 de setiembre, se juntan en el punto libra Υ' . En este punto vuelven a separarse, y al cabo del año llegan juntos al punto de partida.

Dado que el sol medio S_m se mueve uniformemente sobre el Ecuador, *su desplazamiento en ascensión recta es una constante diaria*, y llenada la 2ª condición del párrafo 97, pasará por el semi-meridiano regulando días constantes en duración.

100. DIA SOLAR MEDIO. — *Es el tiempo que transcurre entre dos culminaciones consecutivas del sol medio S_m , en el semimeridiano de un lugar.* Su duración es constante y la miden las 24h de nuestros relojes.

El instante de culminación superior del sol medio se llama *mediodía medio*, y debe producirse a las 12 horas (tiempo local); el de la culminación inferior, es la *medianoche media*, correspondiente a 0h ó 24h del reloj (tiempo local).

El día solar medio es la unidad adoptada en la medida del tiempo, para los usos de la vida civil.

VARIACION DE LOS ELEMENTOS DE LA ECLIPTICA

101. PRECESION. EFECTOS. — Los polos celestes P_s y P_n se corren entre las estrellas cercanas describiendo en un período de unos 260 siglos una circunferencia cuyo diámetro aparente es casi de 47° . Al mismo tiempo, el ecuador celeste, perpendicular al eje del mundo $P_s P_n$, acompañando a éste en su movimiento, gira alrededor del eje de la eclíptica haciendo que los puntos equinocciales Υ y Υ' se desplacen en sentido retrógrado, de Este a Oeste, en $50''$, 2 por año, término medio, lo que equivale a 1° en 70 años.

Este movimiento llamado *precesión*, ya había sido observado por HIPARCO, quien notó, teniendo en cuenta observaciones de sus predecesores, que la distancia angular de las estrellas al punto vernal Υ (y también al punto libra Υ') aumentaba o disminuía, según que

estuviesen ubicadas al Este o al Oeste de dicho equinoccio. En la figura 72, la eclíptica es $\Upsilon S_1 \Upsilon' S_d$ y su eje $\pi_s \pi_n$.

Si suponemos en la actualidad al eje del mundo en la posición $P_s P_n$, el Ecuador, que le es normal, estará ubicado según EE_1 . Durante los 26.000 años que corresponden al período de la precesión, aquel eje rotando alrededor del eje de la eclíptica $\pi_s \pi_n$, barrerá

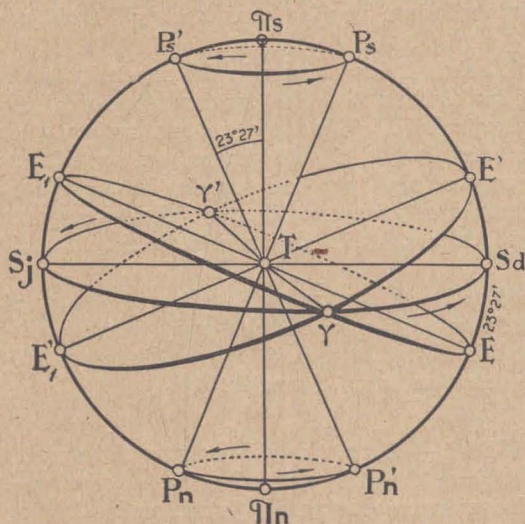


Fig. 72. — Precesión.

una superficie cónica a dos hojas cuyo semiángulo al vértice, que es T , tiene el valor de la oblicuidad, o sea, $23^{\circ}27'$. Una de las hojas de tal superficie, determina sobre la esfera celeste la circunferencia (círculo de latitud) $P_s P'_s$ que será el recorrido del polo celeste P_s durante la precesión. Análogamente el otro polo P_n recorrerá en los 260 siglos la circunferencia $P_n P'_n$.

Interin, el ecuador celeste EE_1 aparece girando alrededor del

mismo eje, sin alterar la oblicuidad (75) hasta volver a su posición inicial. Durante su movimiento, cada uno de los equinoccios Υ y Υ' habrá recorrido la eclíptica en toda su extensión.

La fiel interpretación de la precesión, nos demuestra que dentro de 13.000 años el eje $P_s P_n$ ocupará la posición $P'_s P'_n$ y el Ecuador celeste habrá pasado de EE_1 a $E'E'_1$, ocasionando la inversión de los equinoccios y solsticios sobre sus líneas respectivas.

EFFECTOS ORIGINADOS POR LA PRECESIÓN. — Enumeramos a continuación los más notables, algunos de los cuales ya se han citado en párrafos anteriores.

19 *Retrogradación de los equinoccios.* Este efecto ha sido mencionado al comienzo de este párrafo. En virtud de él, el punto vernal Υ se desplaza sobre la eclíptica en un arco anual $\Upsilon \Upsilon_1$, de $50''{,}2$ hacia el Oeste (fig. 73). Corrimientos análogos experimentan el otro equinoccio y los solsticios.

20 *Variación de las estrellas en longitud.* De las coordenadas eclípticas (83) permanece inalterable la latitud, pero debido a la retrogradación del punto vernal, las longitudes de todas las estrellas aumentan $50''{,}2$ por año, de modo que al cabo de 260 siglos cada una de ellas aparece describiendo en el Cielo un círculo de latitud (82).

Las coordenadas celestes, donde se ha tomado en cuenta la precesión, se llaman *coordenadas medias*.

39 *Corrimiento de los signos del zodiaco*. En el parágrafo 74, nos hemos ocupado de la zona celeste denominada *zodiaco* y de su división en 12 franjas de 30° cada una llamadas *signos*.

Hace 21 siglos el *punto vernal* γ , o *punto Aries*, estaba ubicado en la constelación del mismo nombre, pero durante ese tiempo la precesión le ha hecho retroceder unos 28° sobre la eclíptica, llevándolo a la constelación precedente, o sea a *Piscis*. Un desplazamiento análogo experimentó el *punto Libra* γ' que durante ese período pasó de la constelación de igual nombre a la de La Virgen, donde se halla actualmente.

49 *Cambio de las estrellas polares*. Cada polo celeste describe en el cielo durante el proceso de la precesión una circunferencia o círculo de latitud cuyo diámetro abarca una distancia angular de $46^\circ 54'$. La latitud astral de los polos celestes es de $\pm 66^\circ 33'$ (83), de modo que irán pasando frente a todas las estrellas de latitudes cercanas a la mencionada, las cuales, una tras otra, van convirtiéndose en polares en determinadas épocas.

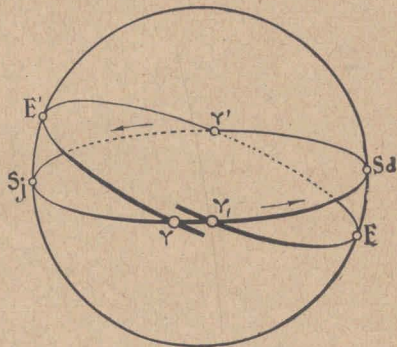


Fig. 73. — Retrogradación del punto vernal.

Un siglo antes de nuestra era, la *polar norte*, α de la *Osa Menor*, distaba 12° del polo celeste P_n , y hacia el año 2100 apenas si distará medio grado, pero a partir de esa época se irá alejando hasta perder su condición de polar. Hace 40 siglos, α del *Dragón* era polar norte; *Deneb del Cisne* pasará a serlo de aquí a 8000 años, y *Vega de la Lira* hacia el año 14000. Un proceso análogo se sucede con respecto a las polares australes. Hace unos 3000 años, la polar sur estaba en la constelación de la *Hidra Macho*. Dentro de 120 siglos el polo celeste P_s estará cerca de *Canopus*, y antes habrán sido polares otras diversas estrellas del *Navío*, entre ellas algunas de 2^a magnitud. De aquí a 20000 años la estrella *Achernar* se encontrará a unos pocos grados de P_s , de quien va alejándose en la actualidad.

59 *Variación en la duración de las estaciones*. Ya ha sido contemplado este efecto de la precesión en el parágrafo 96. Debido a que las líneas de los equinoccios y solsticios, se acercan o se alejan de la de los ápsides (96) a razón de $1'1'',7$ por año, las estaciones varían lentamente en duración, alargándose unas y acortándose otras.

69 *Reducción de la duración del año trópico*. De no haber precesión, la duración del año trópico sería superior en unos 20 minutos a la que tiene (78). En efecto: moviéndose el Sol en el sentido directo, y el punto vernal en el retrógrado a razón de unos $50''$ anuales, resulta que durante el año aquel astro acorta su recorrido en

esta magnitud, con lo cual, entre dos encuentros consecutivos con el punto vernal habrá recorrido $359^{\circ}59'10''$ de la eclíptica, en lugar de los 360° que la integran.

Ello hace que siendo la duración del *año sideral* 365d. 6h. 9m. 9s., la del *año trópico* se vea reducida a 365d. 5 h. 48m. 46s., es decir, unos 20 minutos inferior a aquélla.

102. CAUSAS DE LA PRECESION. — Todo movimiento del eje del mundo $P_s P_n$, sólo puede ser originado por otro real del eje de la Tierra, del cual aquél no es más que una prolongación. La precesión, en consecuencia, obedece a un movimiento del planeta que habitamos, perfectamente explicable por la ley de la gravitación.

La Tierra, como se verá más adelante, presenta un abultamiento en su zona ecuatorial. La *atracción del Sol y de la Luna* sobre dicho abultamiento, provocan la precesión. En particular la acción de la Luna tiende a disponer al eje terrestre según la perpendicular al plano de su órbita inclinado en unos 5° con respecto al de la eclíptica, y su efecto se suma al del Sol por tener casi la misma dirección. La acción de la Luna, en razón de su cercanía, se mani-

fiesta en forma más intensa: de los $50''$ que recorre cada equinoccio sobre la eclíptica en un año, $34''$ se atribuyen a la acción lunar y sólo $16''$ a la del Sol.

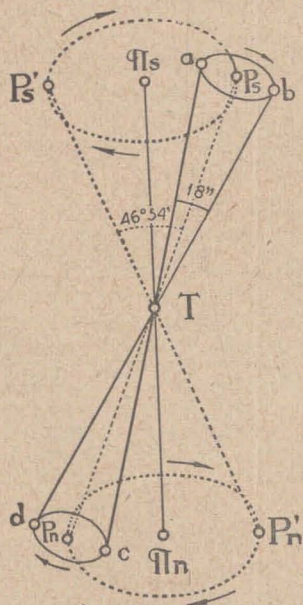


Fig. 74. — Nutación.

103. LA NUTACION: CAUSA Y EFECTOS. — Al igual que la Tierra, la Luna tiene un movimiento de precesión, cuyo período es tan sólo de 18 años y 8 meses. Dicho movimiento presenta al satélite en distintas posiciones con respecto a la Tierra, de modo que su acción gravitatoria tomando direcciones variables, origina un balanceo del eje terrestre alrededor de su posición media, que se traduce en el cielo en pequeñas elipses descriptas por los polos celestes en el período de tiempo mencionado.

A este movimiento del eje terrestre (y en consecuencia del Ecuador), se le conoce con el nombre de nutación (fig. 74).

En la figura, $P_s P_s'$ y $P_n P_n'$ son las circunferencias paralelas a la eclíptica descriptas por los polos celestes alrededor del eje eclíptico en los 26000 años que dura la precesión. Las pequeñas curvas ab y cd son las elipses recorridas por los polos celestes en virtud de la nutación en 18 años y 8 meses alrededor de sus posiciones medias P_s y P_n . El eje mayor de estas elipses, cuya amplitud es de unos $18''$, está siem-

pre dispuesto sobre un círculo de longitud (81) y el menor que abarca alrededor de 13" sobre un círculo de latitud (82).

Si combinamos los movimientos del polo celeste derivados de la precesión y la nutación, obtendremos como resultado una curva sinuosa con unos 1400 bucles originados por la nutación durante los 260 siglos que dura la precesión. El trompo (fig. 75), reproduce con cierta fidelidad los movimientos de precesión y nutación.

Como podrá observarse en la figura 74, en cada proceso de nutación, el eje del mundo, cuya posición real es *ac* o *bd*, engendra un cono elíptico cuyas bases (por tener dos hojas) son los bucles mencionados, *ab* y *cd*.

La nutación produce además de algunos efectos que perturban ligeramente a los vistos en la precesión, otros que les son particulares, y que se enuncian en seguida:

a) *Variación de la oblicuidad.* Cada 18 años y 8 meses, oscila el valor de esta magnitud angular en unos 9" a uno y otro lado del valor medio, lo que se traduce en un ligero balanceo del plano de la eclíptica con respecto al del Ecuador.

b) Durante el período de nutación, cada estrella aparece describiendo una pequeña elipse cuyos ejes tienen una amplitud de 18" y 13". Dichas elipses, análogas a los bucles *ab* y *cd*, tienen la misma orientación que éstos, por lo cual las longitudes estelares aumentan y disminuyen 9" alrededor de su valor medio cada 18 años y 8 meses, y las latitudes experimentan variaciones de igual condición pero de 6", 5 de amplitud en igual lapso.

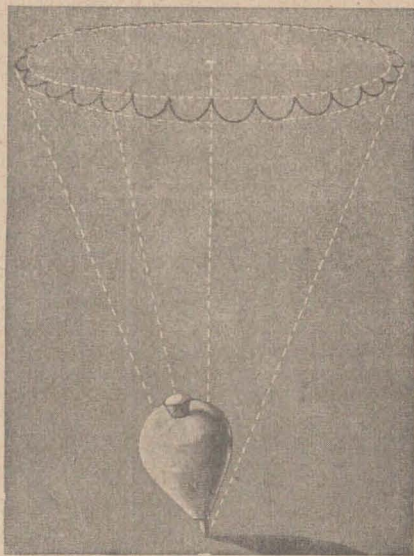


Fig. 75. — Precesión y nutación.

* **ROTACIÓN DE LA LÍNEA DE LOS ÁPSIDES.** — La línea perigeo - apogeo rota en el sentido directo a razón de 11", 5 por año tardando unos 550 siglos en invertirse, y el doble, o sean 110.000 años, para volver a su posición. En este movimiento cada ápside aparece describiendo una circunferencia en el espacio cuyo diámetro es, aproximadamente, de 300.000.000 de km. (2 unidades astronómicas de distancia).

* **VARIACIÓN DE LA EXCENTRICIDAD.** — En un período de 80.000 años, la excentricidad de la órbita solar pasa de un máximo de 0,02 a un mínimo de 0,0003. Actualmente su valor (92) es: $e = 0,01675$ en descenso, calculándose que dentro de 24.000 años alcanzará el mínimo citado, en cuyo caso la órbita del Sol será casi circular.

A partir de esa época se iniciará el proceso ascendente.

CAPITULO TERCERO

MEDIDA DEL TIEMPO

PRELIMINARES

104. UNIDAD FUNDAMENTAL DEL TIEMPO: EL DIA Y SUS FRACCIONES.— Para medir el tiempo, debe utilizarse una unidad rígidamente ligada a un astro real o ficticio, en sus desplazamientos diurnos sobre la esfera celeste. En general: *día de un astro A, es el tiempo que transcurre entre dos culminaciones consecutivas del mismo, en el semimeridiano de un lugar.*

En cuanto al ASTRO REGULADOR A, podrá ser *fijo*, es decir, con movimientos propios inapreciables desde nuestro planeta durante largos períodos de tiempo (caso de las estrellas), o bien *errante*, cuando ello es imprescindible, como en el caso del Sol, que al dar lugar a la sucesión del día y de la noche, regula los quehaceres del hombre sobre la Tierra.

Tomando el *día del astro A*, como *unidad de medida*, se le fracciona en 24 lapsos de igual duración, cada uno de los cuales representa 1h de tiempo del astro regulador. La hora a su vez se la divide en 60m y a cada uno de éstos en 60s, utilizándose este fraccionamiento para las pequeñas apreciaciones. Para mediciones temporales que requieran gran exactitud, suelen considerarse mitades, quintos, décimos y hasta centésimos de segundo.

105. TIEMPO DE UN ASTRO.— *Es el valor de su ángulo horario t tomado a razón de 15° por hora. Se le designa también bajo la denominación de hora del astro.*

Sentado esto, la 0 (cero) hora del astro A, corresponde al instante de su paso por el semimeridiano (culminación superior) y las 1h, 2h, 3h..., etc., cuando después de dicho instante, el astro ha recorrido 15° , 30° , 45° ..., etc., sobre su paralelo celeste, vale decir, los instantes en que su ángulo horario t toma aquellos valores angulares.

Si en general designamos por T_a al tiempo del astro, y por t a su ángulo horario, se tendrá en todo instante:

$$T_a = t.$$

Deducimos de esta equivalencia, tres consecuencias importantes:

1ª El tiempo T_a de un astro en todo instante, es el mismo para los lugares de la Tierra ubicados sobre el mismo semimeridiano (igual longitud terrestre).

2ª En dos lugares terrestres, la diferencia de tiempo relativa a un mismo astro, es igual a la diferencia de sus longitudes terrestres tomadas a razón de 1h por cada 15°. El tiempo más adelantado corresponde a la localidad situada más al Este.

3ª Para todo lugar L de la Tierra, la diferencia entre los tiempos relativos a dos astros A y A' , es igual a la diferencia entre sus ascensiones rectas.

106. UNIDADES USUALES: TIEMPOS QUE SE DERIVAN.

— En la medida del tiempo, las unidades fundamentales utilizadas son:

1º EL DÍA SIDERAL.

2º „ „ SOLAR VERDADERO.

3º „ „ „ MEDIO.

Los tiempos medidos en esas unidades, llevan el mismo nombre y los representaremos, respectivamente, por T_s , T_v y T_m .

107. TIEMPO SIDERAL. — Su unidad de medida es el día sidereal. Este día es constante en duración, ya que equivale al tiempo que emplea la Tierra en su rotación diaria (medida con nuestros relojes 23h56m4s).

Como ya se dijo, se toma como origen del día sidereal, el instante de culminación superior del punto vernal γ . En dicho instante el reloj sidereal acusará 0h0m0s. Por otra parte, recordemos que:

El tiempo sidereal T_s , en todo instante, es igual al ángulo horario θ del punto vernal, es decir:

$$T_s = \theta$$

108. RELACION ENTRE EL TIEMPO SIDERAL T_s , EL TIEMPO DE UN ASTRO T_a , Y LA ASCENSION RECTA α DEL MISMO. — Sean, $P_s E P_n$ el semimeridiano de un lugar; EE' el ecuador celeste; A un astro cualquiera del Cielo, y γ el punto vernal. Tracemos $P_s A P_n$, o sea, el semicírculo horario del astro (las flechas dan el sentido directo del movimiento), y designemos con θ y t , los ángulos horarios del punto vernal y del astro, respectivamente. Siendo T_s el tiempo sidereal, y T_a el del astro A , se tendrán (fig. 76):

$$T_s = \theta = \text{arc. } E\gamma \quad ; \quad T_a = t = \text{arc. } EA' \quad [1]$$

Si llamamos α a la ascensión recta $\gamma A'$ del astro A , obtendremos, observando la figura:

$$\theta = t + \alpha,$$

o sea, teniendo en cuenta las igualdades [1]:

$$T_s = T_a + \alpha.$$

Deducimos de esta relación el importante enunciado que sigue:
El tiempo (u hora) sidereal, es igual al tiempo (u hora) de cualquier astro, más su ascensión recta.

En algunos casos, la fórmula última da un exceso o defecto de 24h sobre el tiempo sidereal a calcular, pero se subsana el inconveniente restando o sumando, respectivamente, las 24h al segundo miembro.

Las transformaciones de dicha fórmula permiten calcular también la hora de un astro despejando T_a , y su ascensión recta aislando a α . Se tiene para ambos casos:

$$T_a = T_s - \alpha \quad ; \quad \alpha = T_s - T_a$$

CONSECUENCIA IMPORTANTE. Si en la relación:

$$T_s = T_a + \alpha,$$

suponemos que el astro regulador del tiempo T_a culmina en el semimeridiano de un lugar, su tiempo será en ese instante:

$$T_a = 0,$$

valor que reemplazado en la expresión de T_s la transforma en:

$$T_s = \alpha,$$

que traducida al lenguaje corriente expresa que:

La hora sidereal en un lugar, es igual a la ascensión recta del astro que culmina superiormente. Este enunciado permite la determinación meridiana de la ascensión recta de los astros (50).

Ejm.: Sirio culmina en el semimeridiano de cualquier lugar a las 6h42m30s tiempo sidereal. Su ascensión recta será:

$$\alpha = 6h42m30s.$$

Al adoptar al punto vernal como regulador (astro ficticio) del tiempo sidereal, se desliza un pequeño error con respecto a la duración del día sidéreo, que es el día de las estrellas, puesto que aquel punto no se desplaza exactamente como éstas en el movimiento diurno, al ser perturbado por la precesión (101) y la nutación (103). Como dicho error no alcanza a valer $\frac{1}{100}$ de segundo, se le desestima, ya que el tiempo sidereal no es acumulativo.

109. TIEMPO SOLAR VERDADERO.—*Está dado en todo instante por el ángulo horario del centro del Sol.*

Este tiempo no puede ser medido por aparatos de relojería desde que aquel ángulo varía irregularmente. En consecuencia ha tenido

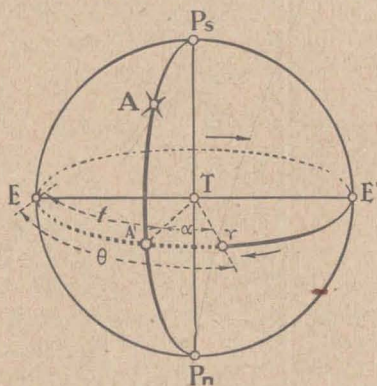


Fig. 76. — Tiempo sidereal.

que crearse el tiempo medio, confeccionando una unidad constante, a la cual hemos llamado día solar medio.

110. TIEMPO SOLAR MEDIO.—Se mide en días solares medios. Es constante en duración y lo registran los relojes y cronómetros comunes.

A *mediodía medio y medianoche media*, los relojes acusan las 12h y las 24h (o 0h) tiempo local, respectivamente.

En todo momento, *el tiempo medio de un lugar es igual al ángulo horario del sol medio más 12 horas.*

111. TIEMPO MEDIO ASTRONÓMICO Y TIEMPO MEDIO CIVIL. TIEMPO UNIVERSAL.—El tiempo medio astronómico se cuenta a partir de mediodía medio, instante en el cual el ángulo horario del Sol medio es nulo. En cambio, el tiempo medio civil se cuenta desde medianoche media, o sea, cuando el ángulo horario del sol medio es de 12h. La diferencia entre ambos tiempos es, pues, de 12 horas.

Desde el año 1925, se adopta para las diversas reducciones, el llamado *tiempo universal*, que no es más que el *tiempo medio civil correspondiente a Greenwich*. Serán las 12h, *hora universal*, en el instante en que el sol medio culmina en el semimeridiano de Greenwich. Los tiempos simultáneos de los diversos puntos de la Tierra se regulan con respecto al tiempo universal de acuerdo a la convención de los husos horarios que se verá en el párrafo 114.

112. LA ECUACION DE TIEMPO.—Llamaremos así, en lo sucesivo, a la *magnitud* (positiva o negativa) *que hay que sumar al tiempo medio universal, para obtener el tiempo verdadero de Greenwich*. Designándola por E , se tendrá:

$$T_v = T_m + E,$$

donde T_v es el tiempo verdadero de Greenwich y T_m el tiempo universal.

En el instante del mediodía verdadero de Greenwich el tiempo universal será:

$$T_m = 12^h - E,$$

y en el de la medianoche verdadera:

$$T_m = -E.$$

Se sigue, que si la ecuación de tiempo es *positiva*, el centro del Sol pasa por el semimeridiano *antes de las 12h*, y si es *negativa* *después de las 12h*.

El valor de E se anula cuatro veces durante el año: a mediados de abril (entre el 15 y el 16); mediados de junio (entre el 14 y 15);

finis de agosto o principios de setiembre (entre el 1 y el 2 de este mes); y casi a fines de diciembre (entre el 25 y 26). Las fechas consignadas entre paréntesis son las que corresponden para el año 1940.

El gráfico de la figura 77, pone de manifiesto las variaciones de E a lo largo del año. El valor de la ecuación de tiempo se ha

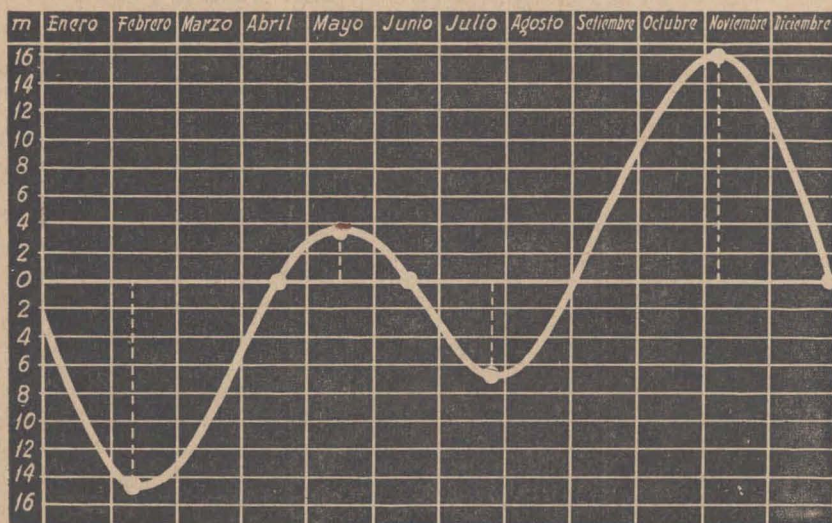


Fig. 77. — La ecuación de tiempo: $E = T_v - T_m$.

tomado en ordenadas, y en las abscisas se han llevado los meses del año.

113. HORA LOCAL Y HORA LEGAL. — La *hora local* de un lugar cualquiera de la Tierra, es la que se obtiene tomando como *origen del tiempo medio a su semimeridiano*. Bajo este aspecto, en el *instante de culminación superior* del centro del sol medio, serán las 0h (*tiempo astronómico*) y las 12h (*tiempo civil*).

La adopción del tiempo local, es materialmente imposible en un país, por la serie interminable de trastornos que ocasionaría para amoldar los relojes a los semimeridianos de sus distintas poblaciones, subsanándose el inconveniente con la adopción de una hora oficial correspondiente a uno de sus semimeridianos centrales.

Durante muchos años la hora oficial adoptada en nuestra República fué la del meridiano de Córdoba que atrasa 4h17m sobre la de Greenwich, y 23m respecto a la de Buenos Aires. En la actualidad y desde el 1 de mayo de 1920, la hora oficial o legal del país es dada por el *semimeridiano de 60° oeste*, amoldándose con ello a la convención internacional de los husos horarios.

114. HUSOS HORARIOS. — Si se supone al ecuador terrestre fraccionado en 24 arcos iguales de 15° cada uno, y trazados por los puntos de división los respectivos semimeridianos, la superficie del planeta quedará dividida en 24 husos esféricos de igual amplitud que pueden numerarse de 0 a XXIII a partir de un origen y siguiendo un determinado sentido. Por convención internacional se toma como *origen* al huso bisecado por el *semimeridiano de Greenwich* ($7^{\circ}30'$ a cada costado) y se numeran los demás de I a XXIII en el sentido *Oeste-Este*, correspondiendo al primer huso la graduación 0, ó XXIV (fig. 78).

Todas las localidades situadas en un mismo huso, tendrán la misma hora, y si suponemos que son las 0h en Greenwich, serán las 1h, 2h, 3h, ..., 23h en los husos I, II, III, ..., XXIII, correspondiendo en tal forma la hora más adelantada a las localidades situadas más al Este, de acuerdo al movimiento del Sol.

El territorio argentino está comprendido, parte en el huso XX y parte en el XIX. Para evitar la diferencia de 1h entre las localidades de ambas porciones del país, y atendiendo a que la última es reducida y comprende la zona más despoblada, se ha adoptado como hora oficial en toda la República, a la que corresponde al huso XX, con lo cual nuestros relojes están atrasados en 4h con respecto a los del huso de Greenwich.

Se deriva de ello para Buenos Aires, una diferencia de 6m32s entre la hora legal así obtenida, y la hora local dada por su semimeridiano, siendo ésta la más adelantada.

En el Brasil, por su gran extensión, se adoptan cuatro horas distintas, ya que su territorio comprendido en la mayor parte dentro de los husos XX y XXI (4h y 3h de diferencia con Greenwich) presenta porciones al Oeste y Este, respectivamente, ubicadas en los husos XIX y XXII (5h y 2h). En el Uruguay por decreto del 1 de noviembre de 1936, se ha establecido como hora oficial, la media aritmética de los husos XX y XXI, por cuya razón su hora atrasa 3h30m, respecto a Greenwich, y adelanta 30m con relación a la Argentina. Perú y Chile utilizan la del huso XIX que las contiene (5h atraso con Greenwich) y el Paraguay la del huso XX (4h), igual entonces a la Argentina.

En el desarrollo cilíndrico de la superficie terrestre que presentamos en la figura 78, pueden apreciarse las partes del globo abarcadas por los distintos husos horarios.

De ser adoptada por toda la humanidad la convención horaria de los husos, todos los relojes de la Tierra marcarían el mismo número de minutos y segundos, diferenciándose sólo en las horas.

EL CALENDARIO Y SUS REFORMAS

115. AÑO TROPICO Y AÑO CIVIL: EL CALENDARIO. PERIODO JULIANO. — En el párrafo 78 hemos definido al año trópico como el lapso transcurrido entre dos coincidencias consecutivas del centro del Sol y el punto vernal γ . Dijimos además que su duración aproximada es de:

$$365d5h48m46s.$$

Vimos también que las estaciones reguladoras de las actividades

agrícolas, se determinan por los sucesivos encuentros del Sol con los equinoccios y solsticios. A raíz de ello, una de las grandes preocupaciones del hombre desde las épocas más remotas, fué poder contar su tiempo en forma tal, de conocer sin dificultad los días en que se inician las estaciones, y en consecuencia las épocas apropiadas para determinadas faenas agrícolas, sin descuidar, por otra parte, el cómputo cronológico de acontecimientos religiosos, astronómicos, históricos, etc. En razón de tan fundamentales necesidades, se creó el año civil, año artificial, en el cual hubo fatalmente que relacionar la duración del movimiento diurno del Sol sobre un paralelo celeste, con el tiempo empleado en su recorrido a lo largo de la eclíptica entre dos encuentros con el punto vernal.

Las dificultades para poner en concordancia las duraciones del año civil con el año astronómico, el primero compuesto de un número entero de días, y el último prácticamente *inconmensurable* con esta unidad, fueron apareciendo con el transcurso del tiempo en forma tal, que los egipcios, que asignaron a su año civil la duración de 365 días, acabaron por perderse en el cómputo del tiempo, y los romanos para llevar el equinoccio a su lugar, tuvieron que asignar al año llamado de confusión, una duración superior en dos meses sobre la corriente.

El calendario es el conjunto de reglas adoptadas por las distintas civilizaciones para el año civil, tendiendo a ponerlo en concordancia, dentro de las posibilidades, con el año trópico y también con las festividades religiosas a las cuales en toda época la humanidad asignó excepcional importancia. Por el calendario aparecen los años divididos en meses, semanas y días. El mes está relacionado al ciclo en que la Luna pasa por todas sus fases, o sea, al período que transcurre entre dos novilunios consecutivos. Los antiguos asignaban una duración de 30 días a cada "Luna": en realidad dicha duración es de unos 29 $\frac{1}{2}$ días. El año trópico contiene más de 12 de tales períodos y menos de 13, y al asignar al año una duración de 12 meses lunares, se comete un error que pasa de los 11 días. Un año de 12 "Lunas" duraría aproximadamente 354 días.

La semana proviene probablemente de las fases lunares, ya que entre el novilunio y el cuarto creciente, transcurren aproximadamente 7 días. A cada día de la semana se asignó el nombre de uno de los 7 astros errantes conocidos en la antigüedad, domingo (día del Sol); lunes (de la Luna); martes (de Marte), etc.

El año de los egipcios constaba de 12 meses de 30 días y 5 días complementarios, durando entonces 365 días.

PERÍODO JULIANO. — En 1582, JUSTUS SCALIGER, propuso el cómputo del tiempo puramente en días, que es la unidad natural más familiar al hombre, a partir del 1 de enero del año —4712, que corresponde al año 4713 a. de J. C. Las fechas contadas así, "período juliano", tienen el grave inconveniente de llevar a números muy grandes: ejm.: al 31 de diciembre de 1939, corresponde el día 2429629. Sin

embargo para ciertos cálculos astronómicos este modo de contar el tiempo ofrece grandes ventajas. Además, se obtiene el día de la semana, correspondiente a cualquier fecha expresada en período juliano, teniendo en cuenta que si los restos de la división por 7 del número correspondiente son 0, 1, 2, ..., 6; los días serán: lunes, martes, miércoles, ..., domingo; respectivamente.

116. REFORMA JULIANA.— El año civil de 365 días adoptado por los egipcios, y después por los romanos, es inferior en duración al año trópico en $5h48m46s$, o sea, aproximadamente, $\frac{1}{4}$ de día. La fecha del calendario en esas condiciones, correspondiente al equinoccio, se va adelantando en un día *cada 4 años*, o sea, en 25 días *por siglo*.

En el año —45 de nuestra era (708 de la fundación de Roma) JULIO CÉSAR buscando la concordancia entre el equinoccio y las fechas del calendario, reglamentó la primera reforma sería que es la que lleva su nombre, a propuesta del astrónomo alejandrino SOSÍGENES.

Para llevar el equinoccio a su fecha en el año siguiente al de la reforma, hubo que asignar a éste (año de confusión) 445 días de duración. La reforma juliana estipula la creación de un *año bisiesto* de 366 días *cada 4 años*. El día agregado (bissexto) se intercalaría entre el 23 y el 24 de febrero, y con ello después de tres años consecutivos de 365 días, en que febrero tiene 28 días, sigue un año bisiesto de 366 días con 29 días de duración para dicho mes.

En esta forma, *la duración media del año juliano es de 365d6h*. El emperador AUGUSTO dispuso que fueran bisiestos los años expresados por números que fueran *divisibles por 4*.

El mundo cristiano adoptó este calendario desde el *Concilio de Nicea*, efectuado en el año 325 de nuestra era.

117. REFORMA GREGORIANA.— A propuesta del astrónomo italiano LILIO, el papa GREGORIO XIII introduce otra reforma en el calendario, que es la que lleva su nombre.

El año medio juliano tiene, según vimos, una duración de:

$$365d6h,$$

mientras que la del año trópico o astronómico es de:

$$365d5h48m46s,$$

es decir, $11m14s$ *inferior* a aquel año civil. Esta diferencia acarrea un retardo de 1d *cada 128 años*, en la fecha del equinoccio (casi 3 días en 4 siglos), por lo que en el año 1582, o sean, 1257 después del *Concilio de Nicea*, la diferencia apuntada era de 10 a 11 días y el equinoccio se produjo entre el 10 y el 11 de marzo, en lugar del 21 de dicho mes.

Para subsanar el inconveniente en lo sucesivo, y llevar el equinoccio al 21 de marzo en el año siguiente, 1583, el papa GREGORIO XIII, dictaminó:

19 Lllamar 15 de octubre al día 5 de dicho mes en el año de la reforma (1582).

20 Suprimir 3 años bisiestos cada 4 siglos.

Se estipuló para conseguir esto último, que los años que finalizan siglos sólo serían bisiestos cuando el número de sus centenas es divisible por 4, es decir, que de los años 1600, 1700, 1800 y 1900, es bisiesto únicamente el primero, mientras que por el calendario juliano lo son todos.

Actualmente el calendario juliano está retardado en 13 días con respecto al gregoriano, a saber: los 10 días de corrección introducidos en el año de la reforma, y otros 3 por haber considerado bisiestos a los años 1700, 1800 y 1900.

El calendario gregoriano fué adoptado muy pronto por el mundo católico, no así por los protestantes, pues los ingleses recién lo ponen en vigor en el año 1752. Rusia adhirióse a dicho calendario en 1918, y Rumania al año siguiente. Los chinos lo adoptan también desde febrero de 1912.

La duración del año trópico puede expresarse así:

$$1 \text{ año trópico} = 365\text{d},2422,$$

o lo que es lo mismo:

$$1 \text{ año trópico} = 365\text{d} + \frac{1}{4}\text{d} - \frac{3}{400}\text{d} - \frac{3}{10000}\text{d}.$$

En conformidad con esta última expresión, puede confeccionarse el cuadro que sigue donde se pueden apreciar las discrepancias en duración de los años civiles de los distintos calendarios, con el año astronómico o año trópico:

Año trópico	$365\text{d} + \frac{1}{4}\text{d} - \frac{3}{400}\text{d} - \frac{3}{10000}\text{d}.$
Año civil egipcio	365d
Año Juliano	$365\text{d} + \frac{1}{4}\text{d}$
Año Gregoriano	$365\text{d} + \frac{1}{4}\text{d} - \frac{3}{400}\text{d}.$

Puede observarse en el cuadro anterior, que nuestro calendario, o sea el gregoriano, adopta una duración media para su año civil, que sólo discrepa por exceso de la del año trópico en $\frac{3}{10000}$ de día

(26s,5 por año), o sea, en 3 días por cada 100 siglos. En consecuencia, cada 3333 años (exactamente 3533 por ser el año trópico igual a 365,242217d), había que adelantar las fechas en un día para llevar el equinoccio al 21 de marzo, es decir, que recién en el año 4915 deberá llevarse a cabo esa corrección, ya que dicho calendario entró en vigencia en 1582.

MEDIDAS RELATIVAS AL SOL. PARALAJE

118. PARALAJE. — La distancia a los astros se obtiene previa determinación de una magnitud angular denominada paralaje (del gr. parállaxis, cambio, diferencia).

En general: *Paralaje de un punto A con respecto a un segmento LL', es el ángulo p formado por las visuales dirigidas a él desde los extremos del segmento* (fig. 79).

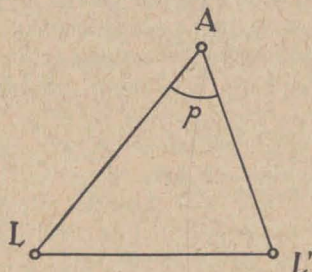


Fig. 79. — Paralaje.

En Astronomía, tratándose de astros cercanos a la Tierra (astros errantes) se llama paralaje al ángulo, con vértice en el astro, comprendido entre las dos supuestas visuales dirigidas al astro desde el centro de la Tierra y desde un punto de la superficie.

En este caso (fig. 80), la paralaje se toma con respecto al radio terrestre TL.

En consecuencia, la paralaje de un astro, a distancia constante de la Tierra, es un ángulo variable que toma su valor máximo P al ubicarse el astro en el horizonte del observador, y el mínimo al situarse en el semimeridiano del lugar (a su menor distancia cenital).

Consideraremos, pues, dos especies de paralajes:

a) PARALAJE HORIZONTAL P: es la que corresponde a los astros cuando su centro se encuentra en el horizonte.

b) PARALAJE EN ALTURA p: es la que corresponde, en cambio, a cualquier altura del astro distinta de 0° . Los valores de esta paralaje varían de instante a instante, y en el caso particularísimo de pasar el astro por el cenit sería: $p = 0^\circ$.

Se sigue de aquí que:

Las paralajes horizontales de dos astros cualesquiera, son inversamente proporcionales a las distancias que los separan de la Tierra (2).

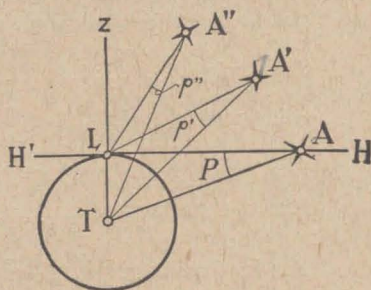


Fig. 80. — Paralajes horizontal y en altura.

Designando por P y P' a las paralajes horizontales de dos astros y por d y d' a sus distancias a la Tierra, se tendrá:

$$\frac{P}{P'} = \frac{d'}{d}.$$

De lo que precede, podemos definir a la paralaje horizontal de un astro como el radio aparente de la Tierra, visto desde el centro del astro.

119. RELACION ENTRE LA PARALAJE HORIZONTAL P , LA DISTANCIA d DEL ASTRO A LA TIERRA Y EL RADIO r DE ESTA. — Sea P la paralaje horizontal del astro A , relativa al lugar L . Del triángulo rectángulo ALC deducimos (fig. 81):

$$\text{sen } P = \frac{r}{d},$$

y por ser siempre pequeño el valor del ángulo P , podrá reemplazarse su seno por su arco correspondiente, con lo que la expresión anterior podrá escribirse así (en radianes):

$$P = \frac{r}{d}; \quad [1]$$

es decir que: la paralaje horizontal de un astro, es sensiblemente igual a la razón entre la longitud del radio terrestre, y la distancia Tierra-astro.

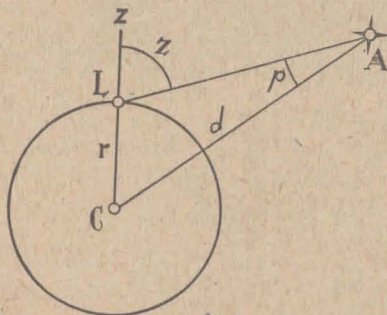


Fig. 82. — Relación entre las paralajes horizontal y en altura.

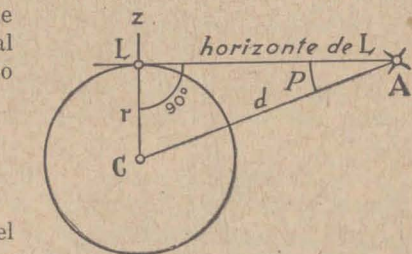


Fig. 81. — Valor de la paralaje horizontal en función de r y d .

Siendo variable el valor de r (máximo en el Ecuador y mínimo en los polos) se acostumbra en Astronomía tomar siempre el valor del radio ecuatorial (6378km.,249) obteniéndose con ello la paralaje horizontal ecuatorial.

120. EXPRESION DE LA PARALAJE HORIZONTAL, EN FUNCION DE UNA PARALAJE

EN ALTURA. — Designemos por Z (fig. 82), a la distancia cenital del astro A en el instante de la determinación para el observador situado en L .

Por el teorema del seno se deduce del triángulo oblicuángulo *ALC*:

$$\frac{r}{d} = \frac{\text{sen } p}{\text{sen } (180^\circ - Z)} = \frac{\text{sen } p}{\text{sen } Z},$$

y por ser pequeño el ángulo *p*:

$$\frac{r}{d} = \frac{p}{\text{sen } Z}.$$

Recordando el valor [1] del parágrafo anterior:

$$P = \frac{p}{\text{sen } Z} \quad \therefore \quad p = P \text{ sen } Z. \quad [2]$$

La primera de estas igualdades permite obtener el valor de la *paralaje horizontal* *P*, conociendo una *paralaje de altura*, y la *distancia cenital* correspondiente.

121. DETERMINACION PRACTICA DE LA PARALAJE HORIZONTAL. — Sean dos observadores situados en *L* y *L'* sobre un mismo semimeridiano de la Tierra, procurando que la diferencia

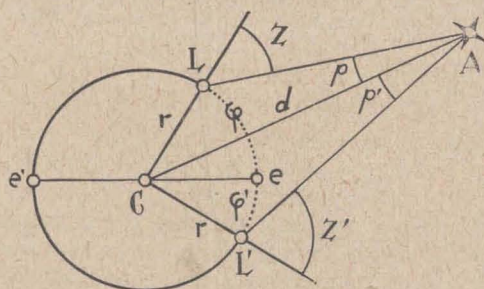


Fig. 83. — Determinación de *P*.

de sus latitudes tenga el mayor valor posible (para mayor aproximación del resultado), y supongamos que el astro *A* está en culminación superior (17).

En tal instante, que es el mismo para ambos observadores, toman éstos con el teodolito (24; 25) las distancias cenitales *Z* y *Z'* del astro (fig. 83).

Por otra parte siendo *ee'* el ecuador terrestre, las latitudes *φ* y *φ'* dadas por los arcos *Le* y *L'e*, son conocidas de antemano. Los ángulos del cuadrilátero *ALCL'*, tienen los siguientes valores:

$$\text{áng. } A = p + p'; \quad \text{áng. } L = 180^\circ - Z;$$

$$\text{áng. } C = \varphi + \varphi'; \quad \text{áng. } L' = 180^\circ - Z',$$

donde *p* y *p'* son paralajes en altura.

Se tendrá como expresión de su suma:

$$(p + p') + (180^\circ - Z) + (\varphi + \varphi') + (180^\circ - Z') = 360^\circ$$

de la cual:

$$p + p' = Z + Z' - (\varphi + \varphi'). \quad [3]$$

Pero por la fórmula [2] del par. anterior:

$$p = P \operatorname{sen} Z \quad ; \quad p' = P \operatorname{sen} Z',$$

obteniéndose por reemplazo:

$$P (\operatorname{sen} Z + \operatorname{sen} Z') = Z + Z' - (\varphi + \varphi') \quad \therefore$$

$$P = \frac{Z + Z' - (\varphi + \varphi')}{\operatorname{sen} Z + \operatorname{sen} Z'};$$

igualdad ésta, que permite obtener el valor de la paralaje horizontal del astro *A* en función de cuatro magnitudes medibles cual lo son las distancias cenitales tomadas en la culminación y las latitudes de los observadores.

Esta determinación de la paralaje horizontal de los astros, sólo da resultados aprovechables cuando se trata de cuerpos celestes cercanos a la Tierra, como ser la Luna.

122. PARALAJE SOLAR. OPOSICIONES DE EROS. PASOS DE VENUS. — Siendo imposible calcular directamente un valor aprovechable para la paralaje horizontal del Sol, los astrónomos deter-

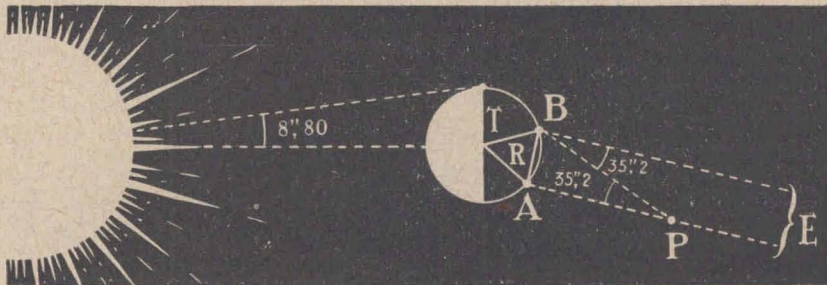


Fig. 84. — Paralaje del Sol. (Oposición de Eros o Marte).

minan su *paralaje relativa* por comparación con la que corresponde a otro astro situado en la misma dirección, (se asignan preferencias a Venus, Marte y a algunos asteroides, sobre todo Eros).

OPOSICIONES DE MARTE Y EROS. — Las distancias relativas de los distintos planetas al Sol se conocen con mucha exactitud aplicando la tercera ley de Kepler. También se conocen por observaciones directas las excentricidades y las inclinaciones de los planos de las órbitas. Marte en algunas oposiciones suele distar de la Tierra menos de 0,4 (distancia Tierra — Sol = 1) y Eros llega a distar de nosotros en su oposición alrededor de 0,25 unidades astronómicas. En estas condiciones, supongamos que desde dos puntos de la Tierra *A* y *B*, situados sobre un mismo semimeridiano (fig. 84), se enfoque

al planeta comparando su posición con la de las estrellas vecinas. En la figura se ha supuesto que el observador *A* ve al planeta *P* en coincidencia con una estrella *E*, en tanto que el observador *B*, en el mismo instante, percibe al planeta a una distancia angular de $35''.2$ de la misma estrella. Supongamos que en ese instante la distancia Tierra - Planeta sea igual a $\frac{1}{4}$ y que la diferencia de latitud entre ambos observadores sea de 60° . La distancia *AB* será igual, entonces, a un radio terrestre y la paralaje del planeta será en consecuencia en ese momento de $35''.2$.

La paralaje del Sol será, de acuerdo a lo supuesto, por distar cuatro veces más que el planeta: $35''.2 \div 4 = 8''.80$.

Por la oposición favorable de EROS de 1931 el astrónomo real de Gran Bretaña, H. SPENCER JONES, obtuvo en 1940 el valor $8''.793$ con un error probable de sólo $0''.0025$. En los laboriosos cálculos se tuvieron en cuenta las observaciones llevadas a cabo por varios observatorios, entre las cuales fueron muy eficaces las efectuadas por el *O. de Córdoba*, integrante de la Unión Astronómica Internacional.

PASOS DE VENUS. — La determinación con respecto a Venus se hace aprovechando los pasos de este planeta frente al disco del Sol. En dichos pasos, el planeta aparece como un pequeño disco oscuro desplazándose lentamente sobre el fondo luminoso del Sol, y en tal condición, la distancia aparente del centro del planeta al borde del Sol, se determina con mucha

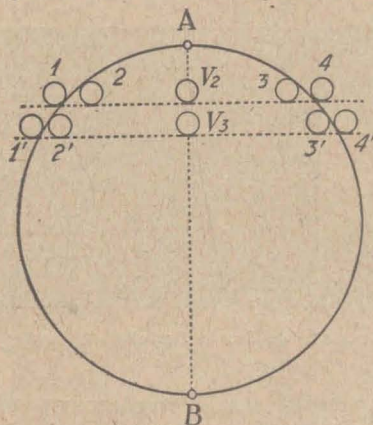


Fig. 85. — Pasos de Venus.

exactitud y será distinta para observadores situados en diversos lugares de la Tierra. Las comisiones encargadas de la determinación, miden con aparatos apropiados esas distancias aparentes y los instantes en que han sido obtenidas. Sometidos los resultados a minuciosos cálculos y controles, se alcanza a obtener el valor de la *paralaje relativa del Sol*.

En la figura 85, exagerando el diámetro aparente de Venus con relación al del Sol, se muestra un paso de aquel planeta visto por observadores situados en distintas latitudes de la Tierra. Se ha colocado al planeta en las posiciones que más interesan para la determinación, en los instantes de contactos interiores y exteriores de los respectivos discos.

En el paso de 1882, más de 50 comisiones de astrónomos se encargaron de tomar los datos apuntados; entre ellas una se estableció en nuestro país (Bahía Blanca), y otra en Chile sobre el estrecho de Magallanes (Punta Arenas). Después de ser sometidos al cálculo los resultados de todas las mediciones, el astrónomo NEWCOMB dedujo el valor, $8''.86$ para la *paralaje horizontal ecuatorial media del Sol*. Hoy se considera como definitivo el valor:

$$P = 8''.80.$$

Venus pasa frente al disco del Sol, cuatro veces en un período de 243 años. Dichos pasos son espaciados durante ese período, en: 8 años;

121 años 6 meses; 8 años; y 105 años 6 meses. A continuación se citan las fechas de los pasos en dos de esos periodos:

6 de diciembre de 1631	9 de diciembre de 1874
4 " " " 1639	6 " " " 1882
6 " junio " 1761	8 " junio " 2004
3 " " " 1769	6 " " " 2012

123. DISTANCIA SOL - TIERRA: ERROR QUE SE COMETE EN LA DETERMINACION. — Para obtenerla, conocida la paralaje del astro, no hay más que aplicar la fórmula determinada en par. 119:

$$P = \frac{r}{d} \quad \therefore \quad d = \frac{r}{P},$$

donde r es la longitud del radio ecuatorial de la Tierra, o sea:

$$r = 6378 \text{ km.}, 249.$$

El valor de P expresado en radianes está dado por:

$$P = 8'',80 = \frac{8'',80 \times 2\pi}{(360 \times 60 \times 60)''} = \frac{43}{1000000} \quad (\text{aproxim.}),$$

y llevado este valor en la expresión de la distancia d , se obtiene:

$$d = 23400 \, r.$$

Reemplazando a r por su valor métrico:

$$d = 149.300.000 \text{ km. (aproxim.)}$$

En números redondos admitiremos:

$$d = 150.000.000 \text{ km. (unidad astronómica de distancia).}$$

Un error de sólo $0'',01$ en la determinación de la paralaje ocasiona una variación de 170.000 km. en el cálculo de la distancia Sol-Tierra.

ARISTARCO (siglo III a. J. C.) a raíz de ciertos cálculos, dedujo que el Sol estaba 20 veces más alejado de la Tierra que la Luna (fig. 86). Posteriormente, HIPARCO y después TOLOMEO en coincidencia con el astrónomo citado, asignaron el valor de $3'$ a la paralaje del Sol, lo que correspondería a una distancia de 1200 radios terrestres, y este resultado se consideró como verdadero, durante 14 siglos.

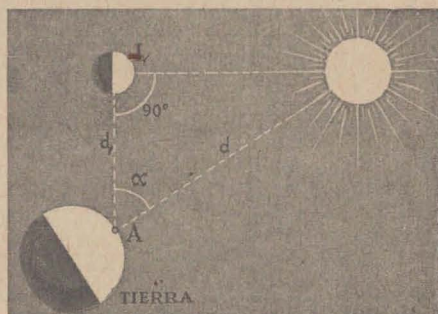


Fig. 86. — Aristarco trató de determinar la distancia d , al Sol, tomando como unidad la distancia d_1 a la Luna, midiendo el ángulo α comprendido entre las visuales a dichos astros en el instante en que aparece iluminado justamente la mitad del disco lunar.

durante 14 siglos.

124. DIMENSIONES DEL SOL. — Calculado el valor de la paralaje P del Sol, que según lo visto en par. 122 es: $P = 8'',80$, se puede determinar el valor de su radio, y en función de éste, la superficie y el volumen.

1º RADIO. — El diámetro aparente del Sol visto desde la Tierra es dado por: $\delta = 32'$ (68). El de la Tierra a igual distancia es el doble de la paralaje horizontal del Sol, es decir: $2P = 17'',60$. Si designamos por R y r , respectivamente, a los radios del Sol y la Tierra, se tendrá (2):

$$\frac{\delta}{2P} = \frac{R}{r},$$

o lo que es lo mismo:

$$\frac{R}{r} = \frac{32'}{17'',60} = 109 \text{ (aprox.)}$$

Deducimos de la anterior:

$$R = 109r,$$

lo que expresado en kilómetros da, aproximadamente, 695.200. Admitiremos:

$$R = 700.000 \text{ km.}$$

2º SUPERFICIE. — Designándola por S , y llamando s a la de la Tierra, se tendrá:

$$\frac{S}{s} = \frac{R^2}{r^2} = 109^2 = 11881;$$

en números redondos:

$$S = 12.000 \text{ s.}$$

3º VOLUMEN. — Llamando V al del Sol y v al de la Tierra:

$$\frac{V}{v} = \frac{R^3}{r^3} = 109^3 = 1.295.029,$$

y con aproximación:

$$V = 1.300.000 \text{ v.}$$

4º MASA. — Siendo M y m las que corresponden en ese orden al Sol y a la Tierra, se encuentra por el cálculo aplicando la ley de Newton (268):

$$M = 333.400 \text{ m. (aprox.)}$$

5º DENSIDAD. — Siendo D la densidad del Sol, M su masa y V el volumen, se tendrá:

$$D = \frac{M}{V},$$

y como $M = 333.400\ m$, y $V = 1.300.000\ v$, según se acaba de ver, se obtiene por reemplazo:

$$D = \frac{333.400\ m.}{1.300.000\ v} = \frac{3.334}{13.000} d = \frac{d}{4} \text{ (aprox.)}.$$

donde d es la densidad de la Tierra.

Como el valor de d es 5,5, reemplazando obtendremos:

$$D = 5,5 \cdot 0,25 = 1,375,$$

o sea, aproximadamente, 1,4.

69 GRAVEDAD. — Por las fórmulas de Newton, designando por G y g , a las aceleraciones de la gravedad en las superficies del Sol y de la Tierra, respectivamente, obtendremos:

$$G = k \frac{M}{R^2}; \quad g = k \frac{m}{r^2};$$

de las cuales:

$$\frac{G}{g} = \frac{M}{m} : \left(\frac{R}{r} \right)^2 = \frac{333.400}{109^2} = 28 \text{ (aprox.)}.$$

De la anterior obtenemos:

$$G = 28\ g.$$

Lo que expresa, que en la superficie del Sol, la aceleración de la gravedad es 28 veces mayor que en la de la Tierra, donde:

$$g = 9,80 \frac{m}{seg.^2}$$

ECUACIÓN DE LA LUZ. — Es el tiempo que invierte el rayo luminoso en hacer el recorrido Sol - Tierra (150.000.000 km.).

Dicho tiempo tomando como valor de la velocidad de la luz:

$$c = 300.000 \frac{km.}{s.},$$

estará dado por:

$$t = \frac{150.000.000}{300.000} s = 500s = 8m20s.$$

CAPITULO QUINTO

FISICA DEL SOL

125. LUZ Y CALOR DEL SOL. — Utilizando un cristal bien oscuro, y con las debidas precauciones, podremos observar con cierta detención el disco del Sol, y notaremos en seguida que su luminosidad va en descenso del centro a la periferia.

Calcula RUSSELL, a base de numerosas determinaciones fotométricas, que la iluminación producida por el Sol sobre la Tierra es alrededor de 465.000 veces mayor que la producida por la Luna llena.

En realidad, sólo llega a la Tierra una parte de la luz y el calor irradiados por el Sol, debido a la absorción de la atmósfera terrestre.

Los cálculos verificados por POUILLET sobre el calor emitido por el Sol, le llevan a la conclusión de que en 24 horas podría fundir una capa de hielo de 37 centímetros de espesor que envolviera a toda la Tierra, siempre que los rayos solares incidieran normalmente en todos los puntos de su superficie. Colocándonos dentro de las condiciones reales, teniendo en cuenta que dichos rayos no llegan perpendicularmente sino en determinados lugares y momentos, y que además el Sol sólo en una parte del día está sobre el horizonte de un lugar, puede admitirse como valor medio, un espesor de 9,2 cm. para la capa de hielo capaz de ser fundida en 24 horas por el calor irradiado por el Sol.

Se llama *constante solar*, al número de calorías recibidas del Sol en 1 minuto sobre cada centímetro cuadrado de la superficie terrestre en el supuesto de que los rayos solares incidieran normalmente y que nuestra atmósfera no los debilitara por absorción. Se ha tratado de determinar la constante solar por distintos procedimientos, habiendo obtenido POUILLET el valor 1,8, y LANGLEY, 3,1. Se admite actualmente 1,94 como valor medio.

Se puede determinar la temperatura de la superficie del Sol, con bastante aproximación, por varios procedimientos (279), los cuales arrojan un valor aproximado de 6.000° C.

126. ORIGEN DE LA ENERGIA IRRADIADA POR EL SOL.

— a) TEORÍAS ANTIGUAS. — Constituye éste uno de los problemas más serios de la astrofísica actual. En una época se pensó que la enorme cantidad de calor irradiada por el Sol podría provenir de reacciones químicas, con lo cual se asimilaba a aquel astro con una enorme hoguera donde se efectuarían procesos especiales de combustión. Un sencillo cálculo demuestra, sin embargo, que aun conside-

rando que toda la masa solar estuviera constituida por carbono y la cantidad de oxígeno necesaria para su combustión total, la energía así producida alcanzaría solamente para mantener la actividad solar durante un período (en este caso insignificante), de 50 ó 60 siglos.

Se pensó también en que el origen de la energía irradiada podría encontrarse en la *contracción* de la masa solar por la propia acción gravitatoria de la misma (hipótesis de HELMHOLTZ y LORD KELVIN).

Aplicando, lo que es probablemente legítimo, las leyes de los gases a una masa en esas condiciones, se encuentra que a medida que se va contrayendo, a pesar del calor irradiado, su temperatura va aumentando (paradoja de LANE). Se sabe, además, la energía total que irradia el Sol actualmente por año, deducida del valor de la constante solar, con lo cual se puede calcular, que irradiando cada año en la misma proporción en que lo hace actualmente, la temperatura del Sol habría sido, hace unos veinte millones de años, la mitad de la actual. Habría que considerar entonces que la "edad" del Sol, es sólo de unas decenas de millones de años, y hechos físicos, biológicos y geológicos se oponen a que se le considere tan "joven", pues la edad de la Tierra se calcula en unos 2.000 millones de años.

Tampoco ha tenido éxito la hipótesis según la cual la energía del Sol provendría de la transformación de la energía correspondiente a la caída más o menos continua de bólidos u otros cuerpos celestes sobre su superficie, pues, si así fuera, debería aumentar la masa y el diámetro aparente del Sol. Al aumento de la masa solar correspondería una disminución en el tiempo de revolución de los planetas a su alrededor que, desde luego, no ha sido observada.

b) TEORÍAS ACTUALES. — Se admite en la actualidad que en el Sol y las estrellas se producen fenómenos especiales capaces de provocar el aniquilamiento de parte de su masa, transformándola en energía. De acuerdo a la teoría de la relatividad de EINSTEIN, materia y energía serían solamente aspectos de una misma cosa, de tal modo, que a una masa de determinados gramos corresponderá una energía de un cierto número de ergios, e inversamente. La relación que vincula la masa con la energía es la siguiente:

$$E = mc^2,$$

donde E es la energía que corresponde a la masa m , siendo c la velocidad de la luz. Según esto el aniquilamiento de sólo un gramo de materia daría origen a una energía de 25 millones de kilovatios-hora.

CONSTITUCION FISICOQUIMICA DEL SOL. LAS CAPAS SOLARES Y LAS ATMOSFERAS ENVOLVENTES

127. ESTRUCTURA DEL SOL. — Para el mejor estudio del Sol, lo consideraremos compuesto de un núcleo central, envuelto en capas opacas, rodeadas a su vez por atmósferas transparentes, entre las cuales no pueden definirse límites precisos.

Prescindiendo del núcleo por sernos poco menos que desconocido y marchando hacia la periferia del astro, consideraremos:

a) *La fotosfera constituida por un conglomerado de gases incandescentes*, que forman la parte visible del Sol en las condiciones ordinarias, en la cual parecen flotar partículas o corpúsculos líquidos o sólidos, sin que ello signifique que tales partículas existan.

Su espesor se calcula sólo en unos 20 km.* (veinte).

b) La capa reversible o de inversión, integrada por gases y vapores a menor temperatura que los de la fotosfera, por lo cual absorben las radiaciones luminosas de ésta, dando lugar al espectro discontinuo que nos presenta el Sol en condiciones normales (rayas negras sobre fondo luminoso).

c) *La cromoesfera*, especie de atmósfera de coloración rosada o gris perla, constituida sobre todo por hidrógeno y vapores de calcio, invisible a simple vista, y poniéndose de manifiesto durante los eclipses totales de Sol, como un estrecho anillo envolvente.

d) *La corona*, o envoltura externa del Sol, visible en las mismas condiciones que la atmósfera anterior, y al parecer formada por un conjunto de gases relativamente fríos.

En los parágrafos que siguen, damos las características esenciales de cada una de esas envolturas.

a) FOTOESFERA

128. FOTOESFERA: MANCHAS SOLARES, PERIODICIDAD.

— 1. La superficie brillante del Sol que apreciamos a simple vista, es la de la fotosfera, superior en brillo a cualquiera de las fuentes artificiales.

Si se la observa con un antejo, tomando las debidas precauciones, se notará en seguida que el brillo de la fotosfera disminuye sensiblemente desde el centro al borde del Sol, donde puede considerarse reducido a la mitad, apreciándose además grupos de manchas oscuras bordeadas de masas brillantes llamadas *fáculas*. En su aspecto general, la superficie de esta capa solar es granulosa, dando la imagen aproximada de ella, una masa de agua con arroz en suspensión.

Los *gránulos* se aprecian con más nitidez en la región central, variando sus diámetros aparentes, según JANSSEN, desde varios décimos de segundo hasta 3" ó 4", con lo cual sus tamaños alcanzan a 200 km. para los menores, y hasta cerca de 3.000 km. para los mayores (a la distancia del Sol 1" de diámetro aparente equivale a unos 725 km.). Dichos gránulos se desplazan a veces sobre la fotosfera con velocidades que pueden llegar a los 40 km. por segundo, variando constantemente sus formas, que en ocasiones

* Esto significa que el 80 % de la luz que recibimos del Sol proviene de una capa de ese espesor, un 10 % de capas internas a ella, y el otro 10 % de las capas exteriores.

es casi circular y más comúnmente elíptica o poligonal. En algunas regiones del Sol suelen ser perfectamente visibles, y en otras forman abigarradas aglomeraciones donde es difícil notar las separaciones entre unos y otros.

Sobre esta granulación, se destacan las fáculas o formaciones brillantes, revistiendo el aspecto de llamas encorvadas situadas a un

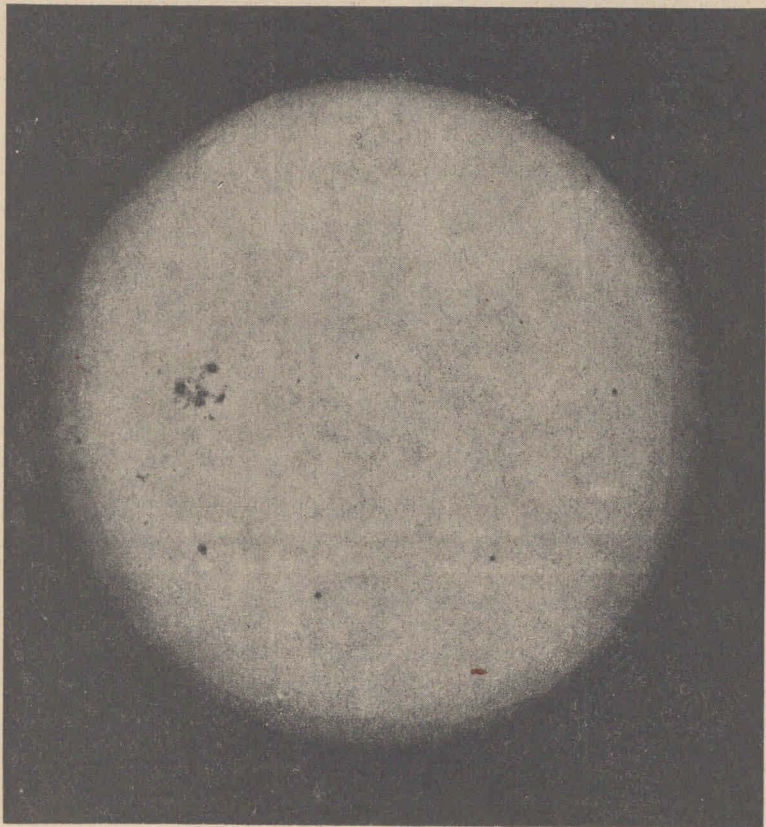


Fig. 88. — Fotografía del disco solar tomada el 7 de agosto de 1917 desde el Observatorio de Yerkes, donde pueden notarse grandes y numerosas manchas.

nivel superior al de los gránulos. Dichas fáculas, entrelazándose en formas caprichosas, son cambiantes en figura y en intensidad, viéndoselas muy nítidas en las cercanías del borde solar, y desdibujándose a medida que se avanza hacia el centro del astro donde prácticamente son invisibles. Este hecho revela que las fáculas están elevadas sobre el nivel general de la fotosfera. Una misma fácula no puede identificarse al cabo de algunos días por las variaciones experimentadas en ese lapso, tanto en forma como en posición.

2. MANCHAS SOLARES. — Muy a menudo suelen aparecer sobre la superficie brillante de la fotosfera, algunas formaciones oscuras llamadas manchas del Sol.

Cada mancha presenta a la observación una parte central o *núcleo*, más oscura que la porción circundante denominada *penumbra*, que aparece constituida por materia granulosa, como la vista en la fotosfera, formando estrias dispuestas casi radialmente, como si una fuerza central orientara a los gránulos. Los núcleos de las

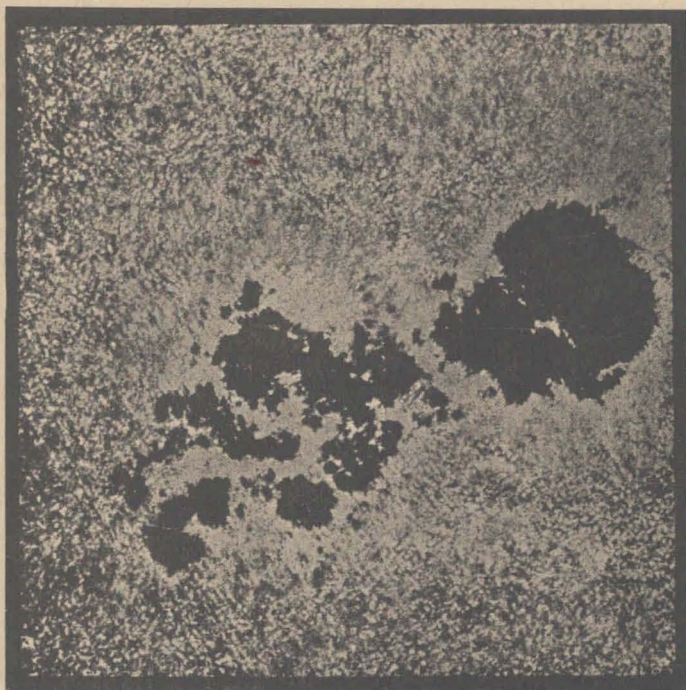


Fig. 89. — Mancha solar fotografiada por Janssen, desde el Observatorio de Meudón.

manchas parecen ser negros por contraste con el brillo fotosférico, pero se ha observado durante algún paso de Mercurio o Venus frente al disco del Sol, que su coloración es más bien gris oscura.

Las manchas tienen un movimiento sobre el disco solar de Este a Oeste, y si suponemos a una de ellas apareciendo en el borde oriental del Sol, al cabo de 13 ó 14 días desaparecerá en el occidental, para reaparecer otra vez al Este, después de un espacio igual de tiempo. Por sus movimientos dedujo SCHEINER, que el Sol rota alrededor de un eje inclinado en unos 83° con respecto

al plano de la eclíptica, y que el período de rotación es, aproximadamente, de 25 días. El movimiento observado de las manchas de Este a Oeste revela, que la rotación del Sol se efectúa en sentido directo.

Algunas manchas solares se forman y desaparecen en pocos días, mientras otras permanecen sobre el disco solar varias semanas, y en ocasiones meses, acompañando al Sol en varias rotaciones.

En cuanto a dimensiones, algunas manchas han alcanzado hasta 2' de diámetro aparente, equivalentes a unos 87.000 kilómetros, abarcando, por consiguiente, una superficie siete veces mayor que la de nuestro planeta.

La mayoría de las manchas solares aparecen en la zona ecuatorial del astro entre los $\pm 30^\circ$ de latitud, siendo muy raras las que sobrepasan ese límite.

El primero en observar manchas del Sol con un anteojo fué GALILEO en 1610, pero según algunas crónicas, los chinos tenían conocimiento de esas formaciones desde 16 siglos antes. SCHEINER publicó un libro relativo a manchas solares en el año 1630, considerándolas como pequeños planetas que pasaban frente al Sol; Galileo rebatió esta hipótesis, afirmando que las manchas pertenecían a la misma superficie del astro.

Hasta hace menos de 2 siglos, se las consideró como escorias flotantes sobre la superficie fundida de la fotosfera, y recién en 1771 fué SCHÜLEN quien aventuró la hipótesis de que las manchas eran cavidades o pozos que tenían su núcleo a mucha profundidad con relación al nivel general de la fotosfera. Según la hipótesis esbozada, la forma real de cada una de esas cavidades es la de un embudo cuya parte más ancha está en la superficie del Sol: en tal supuesto, la penumbra no es más que el talud de la oquedad.

Más tarde, FAYE las considera como vacíos cónicos provocados por torbellinos solares, confirmando este modo de ver, las observaciones hechas por HALE, valiéndose del *espectroheliógrafo*, aparato de cuya descripción nos ocupamos más adelante. Por otra parte, se ha comprobado posteriormente que los remolinos son muy frecuentes en el Sol, y que el sentido de su rotación no parece obedecer a reglas fijas. Según el mismo Hale, la velocidad de algunos torbellinos solares alcanza a 140 kilómetros por segundo en ciertas ocasiones.

A raíz de verificaciones hechas también por Hale, hoy se considera a las manchas solares como torbellinos con cargas eléctricas capaces de provocar el desdoblamiento de algunas rayas del espectro (efecto Zeeman) como lo hace notar con respecto a las del *hierro* y el *titanio* que se desdoblán en 2 y 3 componentes, respectivamente.

Numerosas observaciones hechas en el *Observatorio de Mount Wilson*, proporcionan interesantes detalles sobre los efectos magnéticos producidos por las manchas, y el Sol en general, que muestran al astro comportándose, al igual que la Tierra, como una esfera magnética con el eje poco inclinado respecto al de rotación. En la actualidad se ha determinado esa inclinación en unos 60° , girando el eje magnético alrededor del eje de rotación del astro en unos 32 días. La intensidad del campo magnético solar se considera 80 veces superior a la del campo magnético de la Tierra.

Agreguemos aún el hecho comprobado de que por la oquedad que constituye la mancha, desciende una corriente de *hidrógeno* y *vapores de calcio* a razón de 2 kilómetros por segundo, velocidad que disminuye a más bajo nivel.

3. PERIODICIDAD DE LAS MANCHAS. — Numerosas observaciones hechas del disco solar, demuestran que en un período de unos once años (undecenal), las actividades del Sol en cuanto a manchas pasan por un máximo y por un mínimo, habiéndose comprobado también que el ascenso del mínimo al máximo se verifica con más rapidez que el descenso. La duración del período dada por WOLF, quien le asignó el valor $11\frac{1}{9}$ años, no puede considerarse más que como una media aritmética, pues en la larga serie de períodos registrados desde 1715 a 1940 relativos a los máximos, se han registrado duraciones comprendidas entre 17,1 años y 7,3 años, ocurriendo algo análogo con los mínimos. De ello deducimos, que el período de variación de las manchas solares es un valor oscilante entre los 7 y 17 años, pudiéndose tomar como valor medio aproximado el de *11 años 9 meses*.

Las fáculas, vistas en la fotosfera, lo mismo que las protuberancias que se estudiarán en la cromoesfera, están sujetas al período undecenal según lo comprueban numerosas observaciones.

En la actualidad se ha llegado a la conclusión que las causas de las manchas hay que buscarlas en el Sol mismo, no existiendo aún una teoría satisfactoria que explique su origen.

Se han encontrado analogías entre los períodos de manchas del Sol y otros relacionados con el magnetismo terrestre, pues la variación de los elementos magnéticos de nuestro planeta está en concordancia con el período de actividad solar y con el número e intensidad de las auroras polares.

Por otra parte, al aumentar el número de manchas, suelen observarse bruscas oscilaciones en la inclinación y declinación magnética, perturbándose a veces los servicios telegráficos internacionales.

Tales efectos pueden explicarse considerando al Sol como una gran estación electromagnética que actúa por inducción sobre el magnetismo terrestre. De todas maneras, puede afirmarse, que fenómenos electromagnéticos desempeñan un papel muy importante en todos los efectos solares, según las observaciones efectuadas últimamente en el Observatorio de Mount Wilson.

129. ROTACION DEL GLOBO SOLAR. — Por el desplazamiento de las manchas sobre el disco solar, siempre en el sentido Este-Oeste, nos damos cuenta de que el Sol está animado de un movimiento rotatorio alrededor de un cierto eje, y que el ecuador solar no coincide con el plano de la eclíptica, dado que aquellos desplazamientos no son rectilíneos vistos desde la Tierra.

Según el camino recorrido por diversas manchas sobre el disco del Sol, dedujo SCHEINER que el eje de rotación del Sol está inclinado en unos $7^{\circ}30'$ con respecto al eje eclíptico, y que además el período es de $25\frac{1}{2}$ días. Determinaciones posteriores demostraron diferencias de cierta importancia con estos cálculos.

Se llaman *polos solares*, los puntos donde el eje de rotación del Sol intercepta a la fotosfera. Uno de dichos polos es boreal, y el otro austral.

El *ecuador solar* está determinado por el plano normal al eje de rotación que pasa por el centro del Sol, y los *paralelos solares* son secciones producidas sobre el astro, por planos paralelos al del Ecuador. Lo mismo que sobre la Tierra, y la esfera celeste, podrán considerarse *meridianos solares* que son círculos máximos que contienen a su eje de rotación.

La distancia angular de un punto de la superficie del Sol al ecuador del astro, tomada sobre un meridiano solar, se llama *latitud heliográfica*. Esta es al Sol, lo que la latitud geográfica es a la Tierra. La otra coordenada solar sería la *longitud heliográfica* análoga a nuestra longitud, con la diferencia que no es posible encontrar, sobre el Sol, un punto fijo de referencia.

La intersección del plano de la eclíptica con el ecuador solar, se llama *línea de los nodos*. El *nodo ascendente* es aquel donde los puntos del ecuador solar durante la rotación del astro, atraviesan la eclíptica de Sur a Norte, y el *descendente* donde la cruzan marchando de Norte a Sur.

En la figura 90 se muestra el desplazamiento de una mancha sobre el disco del Sol. Durante el mismo, el diámetro de la mancha, normal al ecuador del astro, permanece invariable, mientras que el diámetro paralelo se ensancha interin la mancha se dirige al centro del disco, y se acorta a medida que se aleja de él, lo que demuestra la redondez del Sol.



Fig. 90. — Desplazamiento de una mancha sobre el disco del Sol.

Para que una mancha ocupe dos veces consecutivas la misma posición sobre el disco del Sol, vista desde la Tierra, transcurren por lo general de 27 a 28 días, pero el valor real de la rotación es inferior a ese lapso. Para comprenderlo, consideraremos dos rotaciones en el Sol:

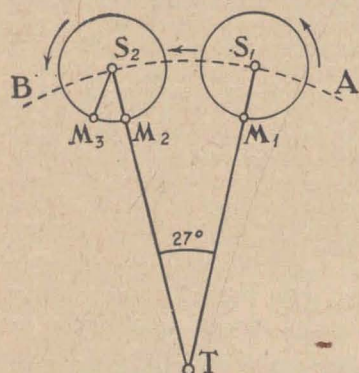
a) *Rotación sideral* (verdadera).

b) *Rotación sinódica* (aparente).

Supongamos al centro del Sol en la posición S_1 sobre la eclíptica AB (fig. 91), en el instante en que una mancha M_1 se divise desde la Tierra T en el centro del disco.

Entre los 27 y 28 días, la misma mancha volverá a ser central en M_2 , cuando el centro del Sol se ha ubicado en S_2 sobre su recorrido anual. En ese lapso el astro ha cumplido una rotación sinódica, pero la rotación sideral la ha cerrado casi dos días antes al ocupar la mancha la posición M_3 , o sea, cuando el radio S_2M_3 se dispuso paralelamente a su posición inicial S_1M_1 . La diferencia de casi

dos días entre ambas rotaciones, se explica atendiendo a que durante los 27 ó 28 días empleados por la mancha en pasar de la posición M_1 a la M_2 , el Sol ha recorrido sobre la eclíptica el arco S_1S_2 de unos



27° de amplitud, de modo que la mancha ha debido rotar en $360^\circ + 27^\circ$, es decir, en 387° aproximadamente. Con estos datos, una simple proporción permitirá calcular el tiempo empleado por el astro en su rotación sideral (360°). Designándolo por t , medido en días, se tendrá:

$$\frac{t}{27} = \frac{360}{387} \text{ días,}$$

de la cual:

$$t = 25 \text{ días (aprox.).}$$

Fig. 91. — Rotación sideral y rotación sinódica del Sol. (N. D.).

En realidad no se puede asignar un período fijo para la rotación del Sol, porque según lo había observado SCHEINER el globo solar no se mueve exactamente como un todo rígido, sino que la velocidad de rotación en sus distintas regiones decrece con las latitudes heliográficas de las mismas.

b) CAPA DE INVERSION

130. CAPA DE INVERSION: ESPECTRO DEL SOL. — La segunda de las envolturas solares consideradas en el par. 127, es la que lleva el nombre del epígrafe, invisible en las condiciones ordinarias, pero observable directamente durante algunos segundos en los eclipses totales de Sol. El espesor de esta capa está calculado en unos 600 km.

Ubicada entre la fotosfera, ya vista, y la cromoesfera que se estudia en el párrafo siguiente, se la puede considerar como parte a bajo nivel de la última, estribando su importancia en el hecho de absorber parte de las radiaciones luminosas de la fotosfera.

Se han tomado espectros de la capa de inversión durante los contados segundos en que se la observa en los eclipses totales de Sol. Tales espectros a rayas brillantes (espectros de emisión), presentan la particularidad de que dichas rayas coinciden en posición con las de Fraunhofer del espectro del Sol tomado en las condiciones ordinarias, lo que comprueba la condición antes asignada a esta capa y de la cual proviene su nombre.

ESPECTRO DEL SOL. — El físico KIRCHHOFF (1824-1887), hizo resaltar la relación existente entre los poderes emisivos y de absorción de los gases incandescentes, por la cual las rayas de absorción

obtenidas en los espectros astrales revelaban la presencia de elementos químicos en sus atmósferas. Comparando las rayas que aparecen en experiencias de laboratorio, actuando con sustancias diver-



Fig. 92. — Espectro solar.

sas, con las que se obtienen en el espectro del Sol, dedujo Kirchhoff que en las atmósferas solares existe gran número de los elementos químicos conocidos por el hombre en el planeta que habita.

Agreguemos además, que otras de las rayas del espectro del Sol, no pertenecen en realidad a sustancias solares, siendo de origen *telúrico*, es decir, ocasionadas por la absorción que ejerce nuestra atmósfera sobre los rayos luminosos del astro. Estas rayas telúricas tienen tanta mayor intensidad en el espectro solar, cuanto mayor es el espesor de la capa de aire atravesada por los rayos de luz, por lo cual el efecto telúrico es máximo cuando el Sol nos envía su luz desde el horizonte.

El espectro de la fotosfera solar presenta diferencias con el espectro que se obtiene de las manchas, las cuales, pese a su aparente oscuridad, son más luminosas que las fuentes de luz artificial, más potentes.

Del estudio de las rayas del espectro, se han encontrado en el Sol, o con más propiedad en su capa de inversión, los siguientes elementos químicos, para no citar sino los más importantes:

Hidrógeno, helio, calcio, hierro, vanadio, cromo, titanio, manganeso, carbono, magnesio, cobalto, níquel, cinc, sodio, bario, estroncio, silicio, cobre, aluminio, cadmio, potasio, estaño, galio, germanio, plomo, nitrógeno, oxígeno, tungsteno, plata, platino, etc. En particular puede decirse que los metales conocidos en la Tierra con peso atómico

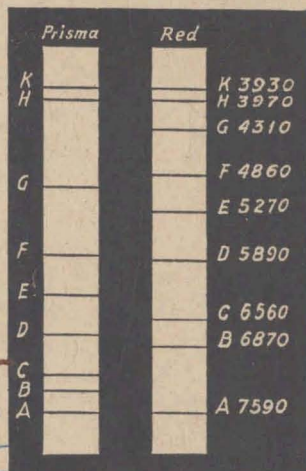


Fig. 93. — Espectro del Sol de prisma y red con las principales líneas de Fraunhofer. A y B son originadas por el oxígeno de la atmósfera terrestre; C y F por el hidrógeno; D por el sodio; E y G por el hierro. Las líneas H y K de la región violeta son originadas por átomos de calcio ionizados y tienen una gran importancia en astrofísica.

inferior a 120, están casi en su totalidad contenidos al estado de vapor en la capa de inversión, aparte de algunos otros de peso más elevado, así como también diversos metaloides. La hipótesis cosmogónica de LAPLACE, relativa al origen común del Sol y de la Tierra, parece tener en ello un principio de confirmación.

c) CROMOESFERA

131. CROMOESFERA; PROTUBERANCIAS: ESPECTROHELIOGRAMAS. — La capa de inversión está rodeada directamente por una atmósfera de gases incandescentes que constituyen la cro-

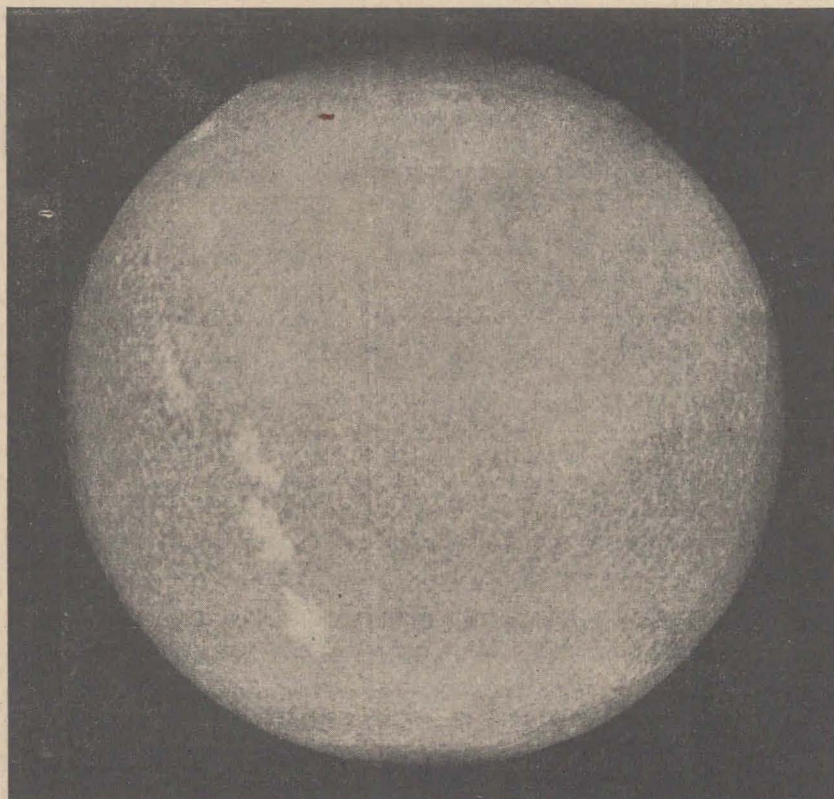


Fig. 94. — Espectroheliograma del disco solar mostrando flóculos de calcio. (Fotografía tomada por el Observatorio de Yerkes).

moesfera, llamada así por la coloración rosada o gris perla que pone de manifiesto en los instantes en que puede ser observada durante la fase total de un eclipse de Sol.

Desde hace alrededor de medio siglo, la aplicación del espectroscopio permite observar a la cromoesfera fuera de los eclipses tota-

les, mostrándola como un estrecho anillo luminoso. Su espesor se calcula en unos 4.000 km. y de su seno emergen llamas inmensas llamadas *protuberancias*, que se elevan a 50.000, 100.000 y hasta 800.000 km. sobre el borde del Sol, adoptando las más caprichosas formas.

En el año 1892, HALE y DESLANDRES conciben el *espectroheliógrafo* (ver libro VI) maravilloso acoplamiento de la cámara fotográfica al espectroscopio, que desde una veintena de años antes, veníase aplicando con éxito creciente en el estudio físicoquímico de los astros. Por medio del espectroheliógrafo se consiguen fotografías de toda la capa cromoesférica, utilizando luz monocromática proveniente de una de las rayas espectrales. En particular, las rayas *K* y *H* del calcio, lo mismo que algunas de las de la serie de Balmer del hidrógeno, han dado lugar a revelaciones trascendentales relativas a la constitución físicoquímica del Sol.

Las fotografías espectrales obtenidas por este medio, llamadas *espectroheliogramas*, muestran a las fáculas brillantes de las cuales

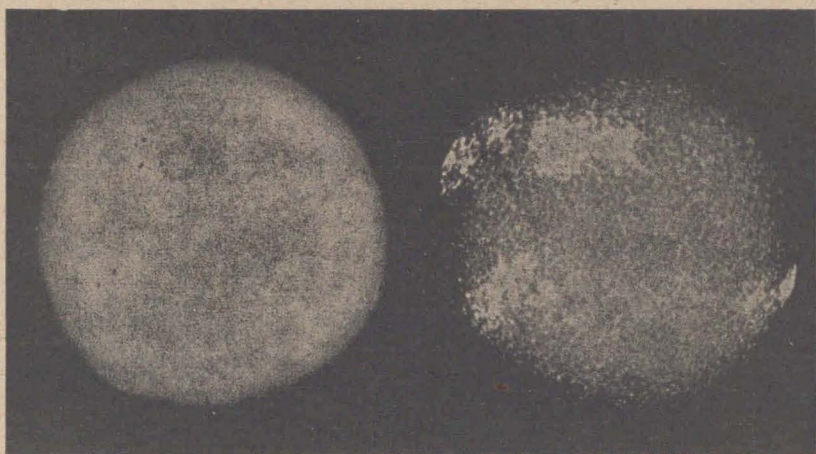


Fig. 95. — Fotografía directa del Sol y espectroheliograma a calcio mostrando los flóculos. (Observatorio de Mount Wilson).

nos hemos ocupado en la fotosfera, con una nitidez asombrosa, tan claras en el centro como en los bordes del Sol, mientras que en las fotografías ordinarias sólo aparecen las de los bordes.

A las fáculas brillantes vistas en los espectroheliogramas (que en general no son las mismas vistas en la fotosfera, por más que éstas también aparezcan), las ha llamado HALE, *flóculos* (de *floculi*, copos) siendo provocados éstos en gran parte, por vapores de calcio abundantes en la cromoesfera, y en parte menor, por hidrógeno incandescente de la misma.

Resumiendo, se puede afirmar que el espectroheliógrafo ha puesto de manifiesto que la cromoesfera está constituida casi en su totalidad por vapores de calcio y de hidrógeno.

PROTUBERANCIAS.— Ya las hemos mencionado al comienzo del párrafo llamando la atención sobre sus extraordinarias dimensiones. Se las aprecia durante los eclipses solares dando lugar a un espectáculo sorprendente al desaparecer el último rayo de Sol al ser éste cubierto totalmente por el disco opaco de la Luna. Aparecen entonces bordeando el círculo negro del satélite como inmensas lenguas de fuego de coloración rosada, adaptándose a las más caprichosas formas, que varían de momento a momento. Por más que ya habían sido observadas en muchos eclipses totales de Sol, recién en el siglo XIX se entra de lleno a su estudio, siendo JANSSEN quien desde la India durante el eclipse total de 1868, las observa espectroscópicamente, llegando a la conclusión confirmada posteriormente, de que tales formaciones son debidas a hidrógeno incandescente, y desechándose en consecuencia la idea de que pudieran ser nubes flotantes en las atmósferas del Sol.



Fig. 96. — Grupo de protuberancias solares fotografiadas desde el Observatorio de Yerkes.

Por la forma de presentarse, se han clasificado las protuberancias en *tranquilas*, adoptando la forma de nubes que caen lentamente sobre la superficie del Sol, y *eruptivas* que emergen violentamente de la superficie del astro como si fueran efectos de verdaderas explosiones. A estas últimas se las llama también *metálicas* porque en sus espectros aparecen rayas de *vapores metálicos* no contenidos en los de las tranquilas, donde sólo se manifiestan las del *hidrógeno*, el *calcio* y el *helio*. Parece comprobado el hecho de que las protuberancias eruptivas están estrechamente ligadas a las manchas solares, pues aparecen en las latitudes de éstas, y están sujetas al mismo período undecenal. De este período participan también las protuberancias tranquilas, con la salvedad que éstas se forman en todas las latitudes y aun en los mismos polos del Sol.

Mientras la mayor parte de las protuberancias adquieren por lo general alturas inferiores a 1', algunas alcanzan hasta 10', o más,

registrándose el caso de una vista desde el Observatorio de Yerkes, cuya altura abarcaba 19' equivalentes a unos 830.000 km., algo más del diámetro de la órbita lunar (cada minuto de ángulo a la distancia del Sol, equivale a unos 43.000 km.).

d) CORONA

132. CORONA. LUZ ZODIACAL. — La cuarta envoltura del Sol, o sea, la atmósfera más externa del astro, está constituida por la *corona*.

Durante los eclipses totales de Sol, la Luna se deja ver como un disco de un negro intenso orlado por una aureola sumamente

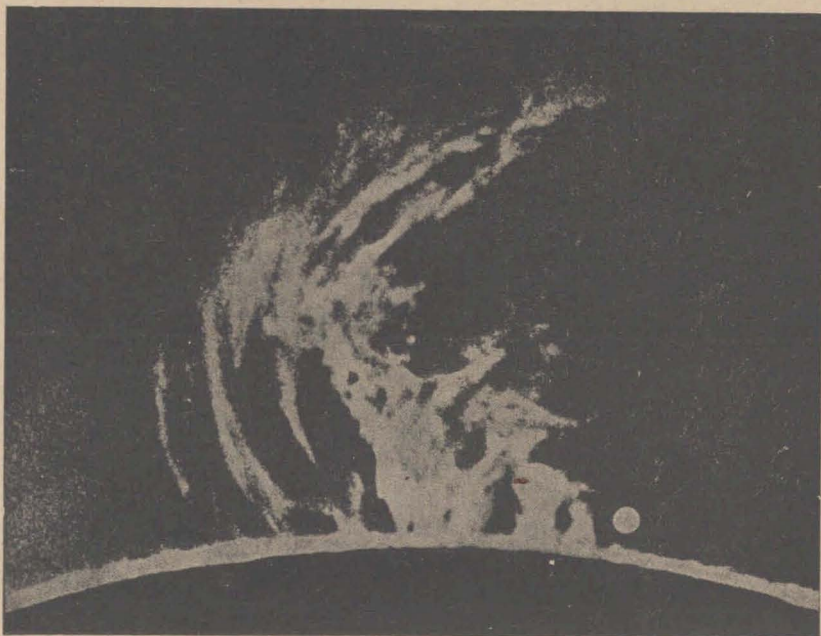


Fig. 97. — Enorme protuberancia eruptiva de 225.000 km. de altura, fotografiada desde el Observatorio de Mount Wilson. El círculo muestra en escala a la Tierra.

luminosa, que es la corona. La forma de ésta varía de uno a otro eclipse, presentándose a veces casi cuadrada, y en ocasiones estrellada debido a la presencia de penachos que a modo de banderolas se extienden a largas distancias del borde del Sol. Estas banderolas suelen alcanzar hasta el millón y medio de kilómetros, en longitud.

Hay que distinguir dos especies de coronas, diferenciadas por características que les son propias: 1º, la *corona interior* formando casi un anillo luminoso de algunos minutos de amplitud; 2º, la *corona exterior* de menor brillo que aquélla, de forma y dimensiones

variables de eclipse a eclipse. La luminosidad de esta corona se va atenuando a medida que se aleja del astro y de ella emergen las banderolas que en ocasiones le dan un aspecto aureolado.

La forma y dimensiones de la corona están ligadas al período undecenal del Sol relativo a manchas; en los mínimos de éstas, la corona parece condensarse hacia el ecuador solar, apareciendo en los polos algunos penachos cortos y tomando en conjunto una forma alargada. En cambio, en las épocas de los máximos de manchas, los penachos se muestran casi iguales en los polos que en el Ecuador, y toda la corona va regularizando su forma hasta hacerse casi anular.

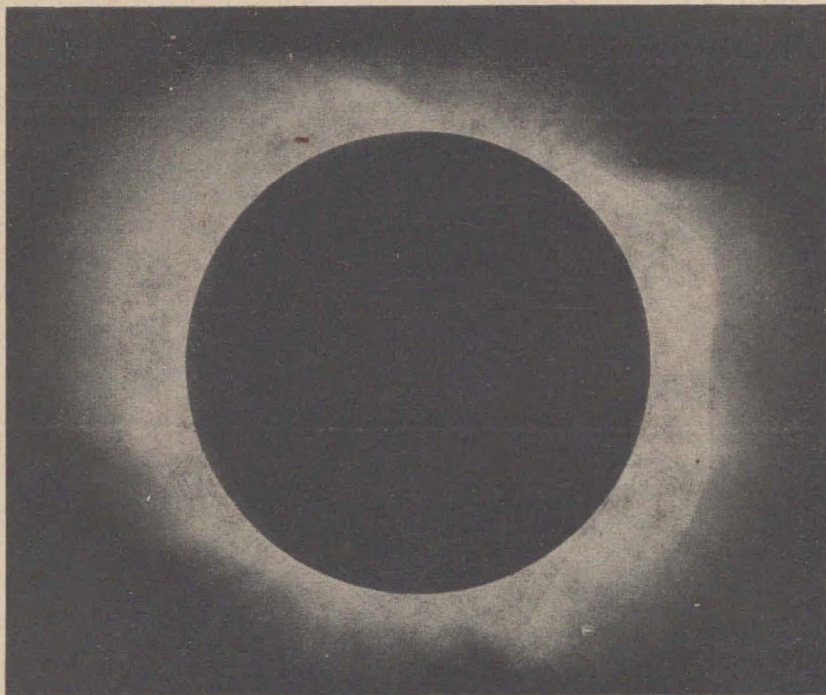


Fig. 98. — Aspecto de la corona durante la fase total del eclipse de Sol del 28 de mayo de 1900. (Fotografía tomada por el Observatorio de Yerkes).

La luz emitida por la corona, es en parte *polarizada*, según las comprobaciones de YOUNG. Este astrónomo encontró que el tanto por ciento de luz polarizada crece con la distancia al borde del Sol, llegando a un máximo de 37 % a los 5' de tal distancia, para decrecer después lentamente. Eclipses posteriores confirman la hipótesis de Young, de la cual puede deducirse que *buena parte de la luz de la corona es reflejada*.

En cuanto a la constitución de la corona, parece ser una mezcla de gases y partículas sólidas muy finas y aisladas entre sí, provenientes de las explosiones solares que originan las protuberancias, al enfriarse los gases incandescentes que las integran. Estas partículas o residuos se mantienen en equilibrio por el efecto de dos fuerzas: la atracción

newtoniana que las impele hacia el centro del Sol, y la repulsión ejercida por las radiaciones luminosas (presión de la luz) que tiende a alejarlas.

LUZ ZODIACAL. — El Sol se encuentra rodeado por una nube de polvo cósmico cuya forma es la de un inmenso lente biconvexo. El plano central de éste coincidiría con el plano de la eclíptica. El centro de dicho lente es ocupado por el Sol, y la longitud del semieje mayor abarca unos 50° , mientras que todo el menor sólo alcanza a unos 20° .

Cuando el Sol está bajo el horizonte antes de la salida y después de la puesta, y sobre todo en las épocas de los equinoccios, suele observarse desde ciertos lugares intertropicales, una iluminación pálida cercana a los puntos de salida o puesta del astro, adoptando la forma de una semielipse. Este fenómeno, que se conoce bajo la denominación de luz zodiacal (figura 99), se atribuye a la iluminación del polvo cósmico del lente antes mencionado, por los rayos del Sol.



Fig. 99. — Luz zodiacal en el Japón, según Jones.

LIBRO TERCERO
LA TIERRA (ô)

CAPITULO PRIMERO

ESTRUCTURA, FORMA Y DIMENSIONES

133. LA TIERRA CONSIDERADA COMO ASTRO. — La Tierra presenta en el espacio el mismo aislamiento que muestran el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas en general. Su forma, más o menos esférica, la apreciamos en los eclipses de Luna, donde siempre la sombra proyectada por el cuerpo que habitamos, aparece circular.

Las dimensiones del globo terrestre comparadas a las del Sol, ya vistas en parágrafo 124, son muy reducidas. Situada a 150.000.000 km. de distancia al Sol, la Tierra rota en un día sideral (29) alrededor de un eje inclinado en $66^{\circ}33'$ respecto al plano de la eclíptica (72) en el sentido directo. Consecuencia inmediata de esta rotación, es el movimiento aparente diurno de la esfera celeste (7; 30) del cual participan todos los astros, y cuyas leyes se han estudiado en el libro I.

Como cuerpo opaco, y por su traslación anual alrededor del Sol, la Tierra debe ser considerada como uno de los *planetas primarios*, ocupando en orden de distancia al astro central, el tercer lugar, después de *Mercurio* y *Venus*.

FORMA Y DIMENSIONES DE LA TIERRA

134. PRUEBAS RELATIVAS A LA REDONDEZ DE LA TIERRA. — La antigüedad griega, según lo expone TOLOMEO en el "*Almagesto*", desechó la hipótesis de una Tierra plana, admitiendo en cambio la de su redondez, después de haber meditado sobre las siguientes observaciones, aducidas aun en el día como pruebas de la última hipótesis mencionada:

19 *Los instantes de salida y puesta de un mismo astro aparecen adelantados en las localidades situadas más al Este. Esta comprobación permite a Tolomeo afirmar que "la Tierra es redonda de Este a Oeste".*

20 *Viajando hacia el Sur, los astros que culminan al norte del cenit bajan hacia el horizonte boreal, y los que lo hacen al sur de aquel punto se elevan sobre el horizonte austral. Este hecho complementa la observación anterior, permitiendo prever que "la Tierra*

también es redonda de Norte a Sur", y que el plano del horizonte es cambiante en posición de lugar a lugar.

3º Las embarcaciones al alejarse de la costa parecen irse hundiéndose pausadamente en las aguas hasta desaparecer, observándose desde ellas un efecto análogo respecto a las elevaciones de la tierra

firme, como ser edificios, arboledas, montes, etc. Luego la superficie de los mares es convexa.

4º Los eclipses de Luna se inician con antelación en las localidades más occidentales, siendo siempre circular la sombra proyectada por la Tierra sobre el disco del satélite.

Estas comprobaciones de Tolomeo pueden completarse con las que se siguen enunciando:

5º La depresión de horizonte (ver parágrafo siguiente), es poco menos que constante en todos

los lugares de la Tierra, para una misma altura sobre el nivel del mar (altitud).

6º Los viajes de circunnavegación, tan frecuentes en nuestros días, pueden efectuarse en toda dirección y sentido.

Las seis pruebas citadas alejan toda duda sobre la forma aproximada del planeta que habitamos. En los párrafos que siguen, trataremos de dar idea de la forma verdadera de la Tierra, valiéndonos de sucesivas aproximaciones.

135. DETERMINACION APROXIMADA DEL RADIO DE LA TIERRA POR LA DEPRESION DE HORIZONTE.—

Sean C el centro de la Tierra, L un punto de la superficie del mar, y O la posición del ojo de un observador situado a la altitud h sobre el nivel de las aguas (fig. 100).

La depresión de horizonte (14) permite calcular, aun cuando con grosera aproximación, el valor de la longitud r del radio de la Tierra.

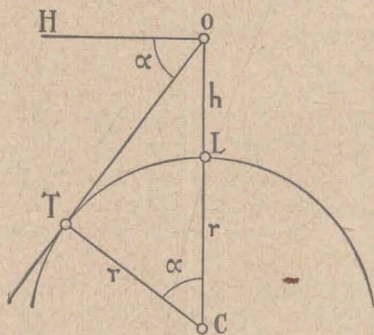


Fig. 100. — El radio de la Tierra y la depresión del horizonte.

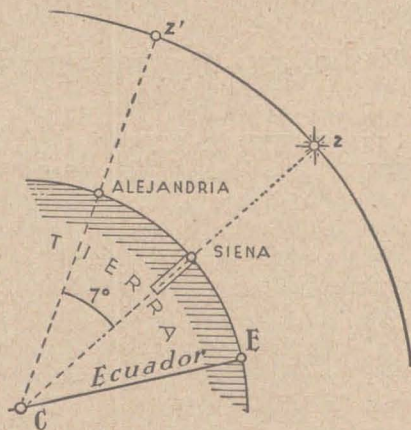


Fig. 101. — Eratóstenes calculó las dimensiones de la Tierra teniendo en cuenta que cuando el Sol estaba en el cenit de Siena, distaba aun 7° del cenit de Alejandría. Obtuvo como longitud del radio terrestre 40 107 estadios que equivalen a unos 6.300 kilómetros (1 estadio = 157 mts.).

Del triángulo OTC rectángulo en T , obtenemos:

$$r = OC \cos TCO;$$

pero:

ángulo $TCO = \text{ángulo } HOT = \alpha$ (lados perpendiculares),
valor que llevado en la expresión de r nos da de acuerdo a la figura:

$$r = (r + h) \cos \alpha = r \cos \alpha + h \cos \alpha$$

de la cual:

$$r = \frac{h \cdot \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}.$$

Se obtienen por este método, midiendo cuidadosamente las magnitudes h y α , valores comprendidos entre 6.500 km. y 7.000 km. Como se verá más adelante, dichos valores son exagerados por exceso. Debe tenerse en cuenta que los valores obtenidos en las medidas de α son algo oscilantes, y además hay que someterlos a correcciones de refracción (27).

ÁLCANCE VISUAL. — Llamaremos así a la distancia $OT = d$, aproximadamente igual al arco TL por ser h pequeño con respecto al radio r . El triángulo rectángulo OTC nos da:

$$\begin{aligned} r^2 + d^2 &= (r + h)^2 = \\ &= r^2 + 2rh + h^2, \end{aligned}$$

de la cual despreciando el término en h^2 , resulta:

$$d = \sqrt{2rh}$$

De acuerdo a esto desde una altura de unos 10 m. sobre el nivel del mar se divisa la superficie de un casquete esférico de 12,2 kilómetros de radio, y si $h = 100$ m., $d = 38,5$ km. como resulta haciendo el cálculo numérico.

136. DETERMINACION DE LA FORMA DE LA TIERRA. —

Las mediciones de arcos de meridianos terrestres efectuadas en distintas latitudes, y en función de las cuales se deduce la forma más o menos exacta del planeta, demuestran que cada meridiano es aproximadamente una elipse, cuyo eje menor PP' , coincide con el de rotación de la Tierra, y en consecuencia, el mayor EE' , no es más

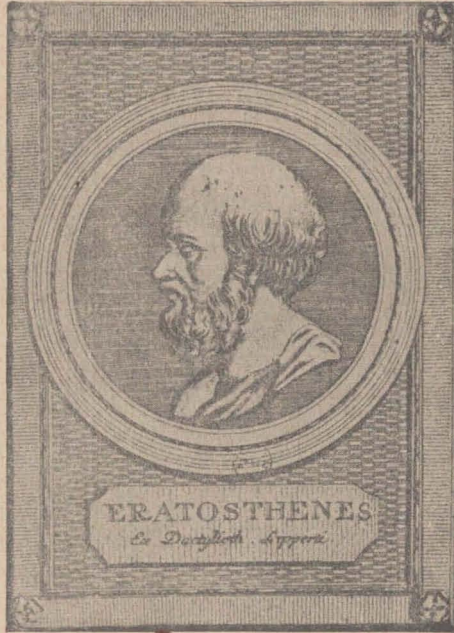


Fig. 102.

que la traza del meridiano sobre el Ecuador (fig. 103). Además, las mismas mediciones confirman que las distintas elipses meridianas, son sensiblemente iguales, de modo que la Tierra puede considerarse

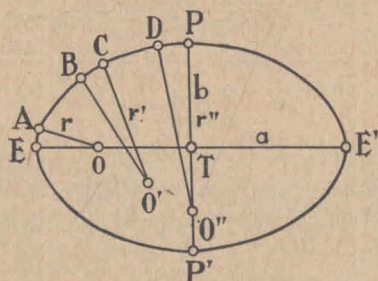


Fig. 103. — Forma aproximada del meridiano terrestre.

como el elipsoide engendrado por la rotación de una de ellas alrededor del eje común PP' . Se sigue de tales consideraciones, que los radios de curvatura en distintas regiones del mismo meridiano, crecen desde el Ecuador a los polos, es decir:

$$r < r' < r''.$$

Luego: supuestos de igual amplitud angular los arcos EA , BC y DP (p. ejm., de 1°), sus longitudes son desiguales, porque se les puede considerar como arcos de 1° correspondientes a circunferencias de radios distintos con centros en $O, O', O'', \dots$, etc.

La mayor longitud del arco meridiano de 1° , se obtiene en los polos de la Tierra y la menor en el Ecuador, es decir, que:

$$\text{arc. } DP > \text{arc. } BC > \text{arc. } EA.$$

Supongamos haberse ya medido los arcos EA y DP , correspondientes a 1° de meridiano en el Ecuador y un polo de la Tierra y sean:

$$\text{arc. } EA = 1^\circ = 110,6 \text{ km.}$$

$$\text{arc. } DP = 1^\circ = 111,7 \text{ km.}$$

En tal caso, el *radio de curvatura* correspondiente al Ecuador (en fig., r), será:

$$r = \frac{110,6 \times 360}{2\pi} \text{ km.} = 6.337 \text{ km. (aprox.),}$$

y el correspondiente al polo (r'' en fig.), tendrá por valor:

$$r'' = \frac{111,7 \times 360}{2\pi} \text{ km.} = 6.410 \text{ km. (aprox.).}$$

Conocidos los radios de curvatura mínimo y máximo de la elipse cuyos semiejes son a y b , los valores de éstos (geometría analítica) podrán calcularse por las ecuaciones siguientes:

$$r \text{ (mín.)} = \frac{b^2}{a} = 6.337 \text{ km.}$$

$$r'' \text{ (máx.)} = \frac{a^2}{b} = 6.410 \text{ km.}$$

las cuales resueltas conducen a:

$$a = \sqrt[3]{r''^2 \cdot r} \text{ km.} = 6.383 \text{ km.}$$

$$b = \sqrt[3]{r^2 \cdot r''} \text{ km.} = 6.361 \text{ km.}$$

Este cálculo, como se comprenderá, es sólo aproximado.

El aplanamiento del elipsoide terrestre en conformidad con los números obtenidos estaría expresado por:

$$\frac{a - b}{a} = \frac{6.383 - 6.361}{6.383} = \frac{1}{290}.$$

Los relieves continentales no afectan mayormente la forma de la Tierra, ya que siendo el radio terrestre superior a 6.300 kilómetros, las mayores alturas del Himalaya (9.000 m.), sólo representan los 0,0007 del diámetro de la Tierra, apareciendo entonces el pico más elevado como un relieve de 1 mm. sobre una esfera de 1,40 m. de diámetro.

NOCIONES DE GEODESIA

137. MEDICION DE ARCOS DE MERIDIANOS. TRIANGULACION. — La forma y dimensiones de la Tierra, vistas en parágrafo anterior, se han determinado con mucha aproximación, midiendo previamente arcos de meridianos tomados en distintas latitudes del planeta*.

La *geodesia* (del gr. geodaisia; de gê, tierra, y daio, dividir), es la rama de la astronomía que trata de la forma y dimensiones de la Tierra. Ambas finalidades se llenan midiendo las longitudes de arcos de meridianos de 1° de amplitud. Para ello deben efectuarse dos operaciones extremadamente delicadas:

a) *Medir la distancia que separa a dos lugares determinados de la superficie terrestre.*

b) *Medir la distancia angular (2) entre los cenits de dichos lugares.*

Sea (fig. 104), AB el arco de meridiano a medirse. El procedimiento geodésico para determinar su longitud es el que se conoce con el nombre de *triangulación*.

Ante todo, se eligen estratégicamente ubicados los puntos extremos del arco AB, cuyas longitudes geográficas deben ser igua-

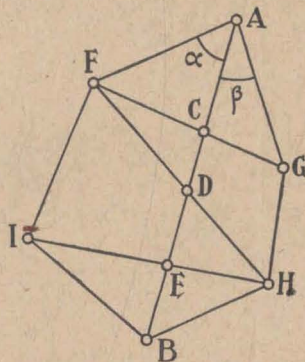


Fig. 104. — Triangulación.

* Es muy digno de mención el hecho de que el médico FERNEL, en el año 1550, efectuó la primer medición de un arco de 1° de meridiano comprendido entre *Paris* y *Amiens*, aprovechando de que ambas ciudades están casi sobre el mismo meridiano. Utilizó para ello un carruaje cuyas ruedas estaban munidas de contadores de vueltas. Obtuvo como longitud del grado medido, 57.070 toesas (1 toesa = 1,95 m.), es decir, 111,286 km. En 1669, PICARD halló 57.060 toesas, o sea, 10 menos.

les, puesto que deben pertenecer a un mismo meridiano. A continuación se mide con la mayor exactitud posible la longitud de una base AF de triangulación, reduciendo el resultado, como así todos los que se obtengan posteriormente, al nivel del mar. De la mayor o menor exactitud de esta medida, dependerán las sucesivas, por lo cual en esta medición básica suelen invertirse largos períodos de tiempo, si se considera que la longitud obtenida debe someterse después a rigurosos controles.

A continuación se establece un vértice o estación G , al cual puedan dirigirse con comodidad, desde A y F , las visuales AG y FG , cuyos ángulos con la base AF se miden con la mayor precisión posible. Llegados a este punto, del triángulo AFG se conocen un lado AF y los ángulos adyacentes al mismo, es decir, A y F , por lo cual trigonométricamente pueden calcularse sus demás elementos, o sean, los lados AG y FG , y el ángulo G comprendido entre ambos.

Por otra parte, como es conocida la dirección del meridiano objeto de la medición, los ángulos α y β también son conocidos, y permiten resolver los triángulos parciales ACF y ACG , de cada uno de los cuales se conocen un lado y los ángulos adyacentes. Al resolverlos, obtendremos dos valores para el arco de meridiano AC , provenientes uno de cada triángulo, valores que debieran ser coincidentes, cosa que no ocurre en la práctica donde los resultados sólo pueden ser aproximados debido a la acumulación de los pequeños errores inherentes a toda medición.

Calculado el valor AC , se establece una nueva estación H , después otra I , y así sucesivamente, que permiten por procesos análogos al que se acaba de ver, obtener las longitudes de los arcos de meridiano CD , DE y EB que sumadas a la de AC , integrarán la longitud del arco AB objeto de la determinación. Conocida finalmente ésta, se calcula fácilmente la de todo el meridiano, suponiéndolo circular.

Esta operación, repetida en distintas latitudes, proporciona diversos valores relativos a la longitud del meridiano, en función de los cuales se trata de buscar la verdadera, con la aproximación posible. Al mismo tiempo, la desigual longitud de arcos de 1° en las diversas latitudes, permite obtener la forma del meridiano con mucha aproximación, y en consecuencia la de la Tierra considerada como elipsoide engendrado por la rotación de aquél alrededor de uno de sus ejes.

El aplanamiento polar, comprobado por estas mediciones, se atribuye a la rotación de la Tierra, cuando ésta, durante el proceso de formación, se encontraba al estado pastoso en razón de su elevada temperatura.

* MEDICIÓN DE UN ARCO DE MERIDIANO EN LA ARGENTINA. — Por iniciativa del actual director del Observatorio de La Plata, ingeniero FÉLIX AGUILAR, y bajo su inmediata dirección, se comenzó, en abril de 1938 a medir un gran arco de meridiano que se extiende desde el extremo norte

al sur de nuestro territorio (fig. 105). La figura 106 muestra una parte del trabajo ya efectuado, consistente en el reconocimiento trigonométrico del terreno. Se ven en ella las bases de La Carlota y Hucal, que se medirán directamente con un alambre *Invar* (aleación de coeficiente de dilatación pequeño y de propiedades rigurosamente controladas). Estas bases están escalonadas de dos en dos grados de meridiano aproximadamente, oscilando sus longitudes entre 12.000 y 18.000 metros. El terreno de cada base se nivela en forma precisa pudiéndose garantizar hasta el centímetro en una longitud de 10.000 metros. Para lograr semejante exactitud, las marcas del alambre, distantes en 24 metros, se observan al microscopio, estando aquél tendido por pesos apropiados.

Cada vértice de la red de triángulos está constituido por un pequeño faro colocado en la parte más alta de una torre, que puede ser observado desde los vértices vecinos distantes de 20 a 30 kilómetros. Las mediciones de ángulos son siempre nocturnas, alcanzándose a determinar los mismos con una aproximación de tres décimos de segundo.

En la figura se ve que la base realmente medida no es uno de los lados de la red de triángulos sino la diagonal menor de un cuadrilátero (casi un rombo), cuya diagonal mayor, calculable, será el primer lado de la red propiamente dicha.

Con esta determinación que se piensa terminar en el año 1950, se podrá conocer la forma del *Geoide* en nuestro país y servirá de base para la confección de cartas exactas de nuestro territorio, cuya importancia de todo orden es incuestionable.

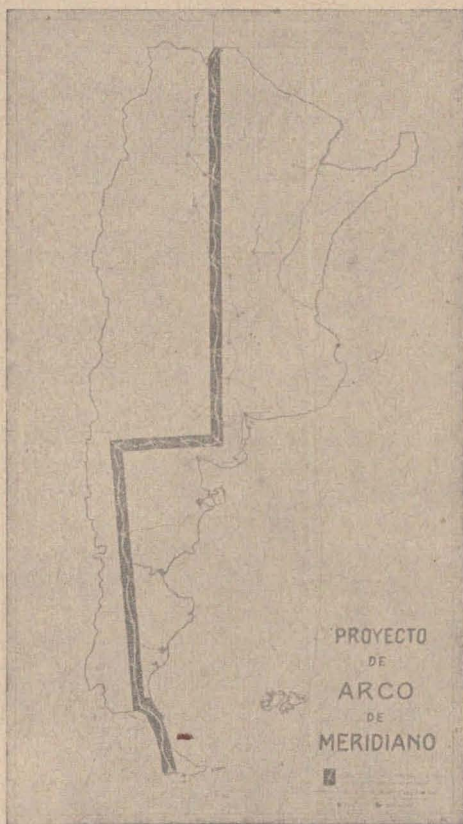


Fig. 105. — Medida de un arco de meridiano en la Argentina.

138. DIMENSIONES DE LA TIERRA. ELIPSOIDE DE HAYFORD. — Las primeras mediciones serias de arcos meridianos, fueron las que llevaron a cabo las expediciones francesas destacadas en el Perú (zona ecuatorial) y en Laponia (zona polar), entre los años 1735 y 1744. La primera obtuvo para el arco de 1° , una longitud de 56.734 toesas, que equivalen a 110.631 metros, mientras la segunda encontró 57.438 toesas, o sean, 112.004 metros. Dichos resul-

DIMENSIONES TERRESTRES

A U T O R	Año	Semieje mayor en metros	Semieje menor en metros	Achatamiento
Bessel	1841	6.377.397	6.356.079	1 : 299,2
Clarke	1880	6.378.249	6.356.515	1 : 293,5
Hayford	1909	6.378.388	6.356.912	1 : 297
Helmert	1912	6.378.192	—	—

En conformidad con las medidas de Hayford, la longitud del meridiano terrestre está dada por:

$$L = 40.007.472 \text{ metros.}$$

Luego el “metro patrón”, confeccionado con los resultados obtenidos por MECHAIN y DELAMBRE después de la medición del arco de meridiano comprendido entre Dunkerque y Barcelona, es *algo menor que la cuarenta millonésima ava parte de la longitud del meridiano*, revelando, en consecuencia, un pequeño error en la medición apuntada.

A continuación se dan otras medidas relativas a la Tierra, deducidas del elipsoide de Hayford:

Longitud del Ecuador	40.075 km. 721 m.
“ “ trópico	36.778 “
“ “ círculo polar	15.996 “
“ de 1° de meridiano en el Ecuador	110 “ 564 “
“ “ 1° “ “ la latitud de 45° .	111 “ 121 “
“ “ 1° “ “ el polo	111 “ 680 “
“ “ 1° “ Ecuador	111 “ 307 “
“ “ 1° “ trópico	102 “ 129 “
“ “ 1° “ círculo polar	44 “ 508 “

* 139. EL PENDULO Y LA FORMA DE LA TIERRA. — El período de oscilación de un mismo péndulo varía con la latitud del lugar, alcanzando su valor máximo en el Ecuador. Dichas variaciones obedecen a dos causas:

a) La fuerza centrífuga, originada por la rotación del planeta cuya magnitud en el Ecuador equivale a $\frac{1}{289}$ de la gravedad, siendo nula en los polos.

b) El achatamiento polar de la Tierra.

Si la Tierra fuera un planeta esférico y homogéneo, carente de rotación, el período t de oscilación del péndulo de longitud cons-

tante sería invariable. Designando por l a la longitud de un péndulo y por g a la aceleración de la gravedad en la latitud φ , el período t de la oscilación simple para pequeñas amplitudes es dado por:

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ de la cual: } g = \frac{\pi^2 l}{t^2}.$$

Obtenidos con el péndulo una serie de valores $g, g', g'' \dots$, los radios terrestres en los lugares correspondientes podrán determinarse en una escala arbitraria r , y los números que los miden darán la imagen de la forma de la Tierra.

Por este método, y en base a numerosas determinaciones, obtuvo HELMERT en 1901, el número 1 : 298,3 como expresión del achatamiento polar.

140. FORMA VERDADERA DE LA TIERRA: EL GEOIDE. —

Cuando NEWTON enunció su célebre ley de la gravitación universal, previó que los meridianos terrestres serían curvas muy parecidas a la elipse, pero sin alcanzar a concebir la forma exacta que debía tomar la Tierra bajo las acciones conjuntas de la gravedad y la fuerza centrífuga.

Supongamos a la Tierra durante el proceso de su formación tomando en cierta época la forma elipsoidal bajo el efecto de su rotación. Esta forma no sería aún la definitiva, porque al deformarse el planeta se originarían cambios en la dirección e intensidad del campo gravita-

torio, que darían lugar a un nuevo cambio de forma. Se desprende de ello, que la Tierra no puede ser una esfera aplanada en los polos como se la suele considerar en una primera aproximación, ni siquiera un elipsoide, al cual parecen conducir las determinaciones vistas en parágrafos anteriores. La forma verdadera, a la cual LISTING llamó geoide (del gr. geoeidés; de gc, tierra, y eoidés, forma), no tiene expresión geométrica posible, pero se caracteriza la superficie del geoide, por ser normal a todas las verticales (13).

Basándose en resultados obtenidos por medio del péndulo en la determinación de la forma de la

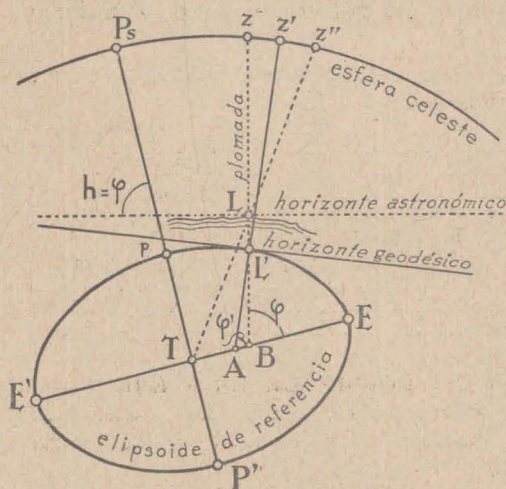


Fig. 107. — Vertical astronómica, vertical geodésica y vertical geocéntrica.

Tierra, encontró HECKER, que el geoide es un cuerpo que sólo difiere del elipsoide achatado de revolución cuyas dimensiones se dieron en parágrafo 138, en elevaciones y depresiones onduladas, que no alcanzan a 100 metros de altura, y que en algunas partes del planeta, sólo llegan a algunos decímetros.

En el supuesto de que los mares cubrieran a los continentes, la superficie de las aguas se dispondría según la del geoide.

141. VERTICAL Y LATITUD GEODESICA. — La dirección de la gravedad en cualquier punto de la Tierra, o sea, la dirección del hilo a plomo, se llama *vertical verdadera* o *vertical astronómica* y es, según lo que acabamos de ver, constantemente normal a la superficie del *geoide*. Para cálculos geodésicos, se utiliza frecuentemente la *vertical geodésica*, perpendicular siempre a la superficie del *elipsoide terrestre de referencia* (HAYFORD), la cual no se identifica en general con la del geoide. Se deduce que ambas verticales no coinciden en todos los lugares de la Tierra, y al ángulo que comprenden se le llama *desviación de la vertical*. Se derivan de ello, para un mismo lugar, dos latitudes en general distintas: la *latitud astronómica* y la *latitud geodésica*, según que se trate del ángulo formado con el Ecuador, por una u otra de las verticales definidas.

En la figura 107, si suponemos que zB es la vertical astronómica, o verdadera, y $z'A$ la vertical geodésica del lugar L de la Tierra, los ángulos $zBE = \varphi$, y $z'AE = \varphi'$, son, respectivamente, las latitudes astronómica y geodésica del lugar L .

También se ha trazado en la figura, a la llamada *vertical geocéntrica* $z''T$, considerada en algunos cálculos. Pasa por el centro T de la Tierra y forma con el Ecuador EE' un ángulo que es la latitud geocéntrica de L .

La vertical astronómica es obtenida directamente por la observación, mientras que la geodésica es determinada por el cálculo. El ángulo de desviación permite seguir de punto a punto de la Tierra, la mayor o menor separación de las superficies del geoide y del elipsoide terrestre, y su valor máximo apenas si pasa de los 30".

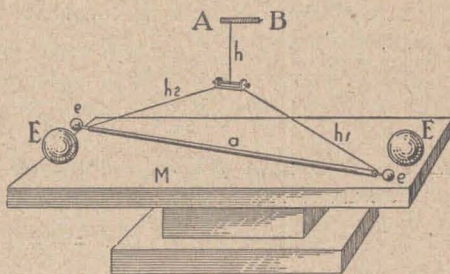


Fig. 108. — Balanza de Cavendish. La densidad terrestre se calcula atendiendo a la magnitud de las atracciones ejercidas por dos grandes esferas de plomo, sobre dos esferillas pendientes de un balancín. La torsión del hilo h permite el cálculo, teniendo en cuenta la magnitud de las masas actuantes.

142. SUPERFICIE Y VOLUMEN DE LA TIERRA. — Si consideramos a la Tierra como una esfera de 6.370 km. de radio (radio medio) su superficie será:

$$S = 4\pi r^2 = 4\pi (6.370 \text{ km.})^2 = 500.000.000 \text{ km.}^2,$$

y su volumen quedará expresado por:

$$V = S \frac{r}{3} = 1.080.000 \text{ millones de km.}^3,$$

y con menos aproximación, pero en números redondos:

$$V = 10^{12} \text{ km.}^3 = 1 \text{ billón de km.}^3.$$

143. MASA Y DENSIDAD DE LA TIERRA. — Siendo:

$$g = k \frac{m}{r^2},$$

da expresión de la aceleración de la gravedad, donde k es la constante de gravitación, que se determina en otro lugar de esta obra, resulta:

$$m = \frac{g \cdot r^2}{k},$$

de la cual, introducidos los valores numéricos de g , r y k , se obtiene:

$$m = 5,96 \cdot 10^{27} \text{ gr.}$$

Designando por D a la densidad media de la Tierra, la calculamos por la expresión:

$$D = \frac{m}{V},$$

donde m es la masa y V el volumen del planeta.

Se admite como valor aproximado:

$$D = 5,5.$$

CAPITULO SEGUNDO

MOVIMIENTOS DE LA TIERRA. ROTACION

144. INTERPRETACION DEL MOVIMIENTO DIURNO: LAS DOS HIPOTESIS. — El movimiento diurno de las estrellas sólo puede explicarse por dos hipótesis A y B, que se excluyen mutuamente.

La hipótesis A, abonada por la visión directa del Cielo, supone una *Tierra inmóvil* y a los astros rotando en conjunto alrededor del eje del mundo en el *sentido retrógrado de Este a Oeste*, en un día sideral.

La hipótesis B, admite para la Tierra un *movimiento real de rotación* alrededor del eje mencionado, en el mismo espacio de tiempo, y en el *sentido directo de Oeste a Este*, a consecuencia del cual todo el Cielo estrellado se desplaza aparentemente en el sentido opuesto.

En resumen: para la hipótesis A, es *real* el movimiento diurno de los astros, mientras que en la hipótesis B sólo es *aparente*.

La primera de esas hipótesis imperó como verdadera durante decenas de siglos; la segunda, admitida universalmente en el día, cimenta su validez en una larga serie de pruebas del todo irrefutables.

145. EQUIVALENCIA CINEMATICA DE AMBAS HIPOTESIS. — Antes de ocuparnos de las pruebas e indicios que abonan en pro de la rotación del planeta que habitamos, debemos demostrar que tal movimiento es posible, o en otros términos, que el movimiento diurno de los astros en el sentido Este a Oeste, conservará todas sus características, al admitir que la Tierra rota alrededor de un eje de Oeste a Este.

Por lo pronto, cuando viajamos, p. ejm., en tren en un sentido dado, nos parece que los objetos fijos situados a ambos costados de las vías, *se mueven en sentido contrario al de la marcha*, siendo más completa la ilusión, si la marcha se verifica sin oscilaciones ni trepidaciones sensibles. Este efecto se aprecia con más apariencias de realidad en los viajes por agua, cuando se concentra la vista desde la cubierta de la embarcación sobre la superficie de aquélla.

Sean p y p' los polos terrestres Sur y Norte, respectivamente, y $P_s P_n$ el eje del mundo. Si admitimos que $P_s A_1 P_n$ es el semimeridiano de longitud geográfica λ , el astro A_1 estará culminando

superiormente en el instante que lo muestra la figura 109, para todos los observadores de la Tierra cuya longitud sea la ya consignada, mientras el astro A_2 lo

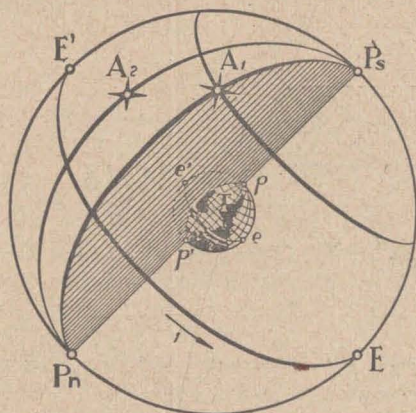


Fig. 109. — Equivalencia cinemática de las hipótesis A y B.

hará algún tiempo después, por ejm. una hora si la diferencia $t_1 - t_2$ entre sus ángulos horarios fuera de 15° . Dicho efecto, que es el que acontece en la realidad, se lleva a cabo, bien asignando a la esfera celeste $P_s E P_n E'$ una rotación en el sentido retrógrado de flecha 1 en un día sideral, bien admitiendo una rotación de la Tierra, $p e p'$ en el sentido directo de flecha 2 con igual velocidad angular que la ya consignada. En este supuesto, el semimeridiano cualquiera $P_s A_1 P_n$ barrerá

en veinticuatro horas siderales toda la esfera celeste, poniéndose en coincidencia uno tras otro con la totalidad de los semicírculos horarios de los diversos astros del Cielo, los cuales irán culminando sucesivamente en dicho semimeridiano.

Estas consideraciones ponen de manifiesto la equivalencia cinemática de las hipótesis A y B, y por consiguiente la falsedad de una de ellas al ser verdadera la otra.

146. EL MOVIMIENTO DIURNO DE LAS ESTRELLAS ES APARENTE. — La posibilidad del movimiento de rotación de la Tierra, es indicio más que suficiente para concebir la inverosimilitud de un movimiento real de las estrellas alrededor del eje del mundo con *velocidad angular constante*. Este punto de vista se fortalece por diversas consideraciones, las cuales, por contraste, robustecen la hipótesis relativa a la rotación del planeta.

Enumeramos a continuación dichas consideraciones, que si bien no constituyen pruebas absolutas excluyentes de tales movimientos estelares, son, sin embargo, indicios casi convincentes de la inexistencia de los mismos.

1º Es aventurado admitir que las estrellas situadas a distancias tan desiguales de la Tierra, puedan girar alrededor de un eje que pasa por el centro del planeta con *velocidades lineales rigidamente proporcionales a tales distancias*. Además, esa posibilidad se hace más remota, si tenemos en cuenta que también participan en el movimiento diurno los astros errantes, *Sol, Luna, planetas, cometas*, etc.

2º La física moderna considera a la velocidad de la luz (300.000 kilómetros por segundo), como un límite insuperable para la mate-

ria en movimiento. De ser real el movimiento diurno de las estrellas, resultaría que una de ellas, la más cercana, situada a la distancia de cuatro años luz y supuesta sobre el Ecuador, se desplazaría en el espacio a razón de 2.600.000.000 de kilómetros por segundo, es decir, con una velocidad casi 9.000 veces superior a la de la luz. Otras lo harían con velocidades de decenas y centenas de veces mayores a la ya apuntada.

147. ROTACION DE LA TIERRA: PRUEBAS EXPERIMENTALES. — Estas pruebas, basadas algunas en experiencias físicas, y otras en fenómenos controlados por el hombre sobre la superficie del planeta, son en realidad las que llevan a la convicción de que la Tierra rota diariamente en el sentido directo de Oeste a Este, alrededor de un eje coincidente con el que hemos llamado eje del mundo.

Consideramos como principales *pruebas directas*, las que a continuación se expresan:

1.º DESVIACIÓN DE LOS CUERPOS EN LA CAÍDA. — Si se supone real la rotación terrestre de Oeste a Este, la teoría prevé que los cuerpos que caen deben desviarse hacia el Este de la vertical. En efecto: sean T (fig. 110), el centro de gravedad del planeta, P un punto del ecuador terrestre, y A un cuerpo situado en la parte superior de una torre a la altura h sobre el nivel de P . Al efectuar la Tierra la rotación α , los puntos A y P participando en el movimiento toman las posiciones A' y P' , y la vertical AT se dispone según $A'T$. En este movimiento, las velocidades lineales de A y P , son proporcionales a los radios de rotación $r + h$, y r , respectivamente, de modo que si las designamos por V y V' , se tendrá:

$$\frac{V}{V'} = \frac{r + h}{r} = 1 + \frac{h}{r},$$

de la cual deducimos:

$$V - V' = V' \cdot \frac{h}{r}.$$

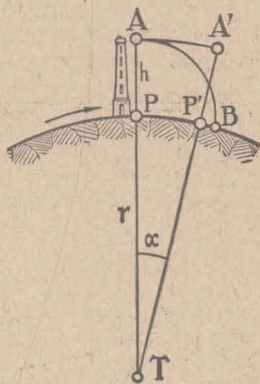


Fig. 110. — Los cuerpos al caer se desvían hacia el Este. (S. D.).

Si imaginamos que se deja caer desde lo alto de la torre al cuerpo A , el movimiento de éste en el espacio será la resultante de dos movimientos: uno uniformemente acelerado en el sentido AP , y otro uniforme en el sentido AA' . Su trayectoria en el espacio (vista desde fuera de la Tierra), será, por lo tanto, una parábola. Durante el tiempo t que dura la caída, el desplazamiento del cuerpo hacia el Este será Vt , pues conserva su velocidad inicial V que es la de la cúspide A de la torre. La base de ésta,

durante ese tiempo, se habrá desplazado hacia el Este en $V' t$, de modo que el cuerpo se le habrá adelantado (hacia el Este) en:

$$e = V t - V' t = (V - V') \cdot t. \quad [1]$$

Por otra parte:

$$h = \frac{1}{2} g t^2 \quad \therefore \quad t = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad [2]$$

y también, siendo T el tiempo empleado por la Tierra en su rotación:

$$V - V' = V' \cdot \frac{h}{r} = \frac{2\pi r}{T} \cdot \frac{h}{r} = \frac{2\pi h}{T}. \quad [3]$$

Llevando en la [1] los valores [2] y [3], resulta:

$$e = \frac{2\pi h}{T} \cdot \sqrt{\frac{2h}{g}},$$

Haciendo los cálculos se obtiene una desviación de 33 milímetros por cada 100 metros de altura. En 1832, FREIBERG obtuvo una desviación de 28 mm. en una experiencia realizada en un pozo de mina de Sajonia, explicándose la diferencia por las acciones que actúan sobre el cuerpo durante la caída. Experiencias posteriores confirmaron el resultado previsto por la teoría.

2ª VARIACIÓN APARENTE DEL PLANO DE OSCILACIÓN DEL PÉNDULO: EXPERIMENTO DE FOUCAULT. — En Mecánica se demuestra que el plano

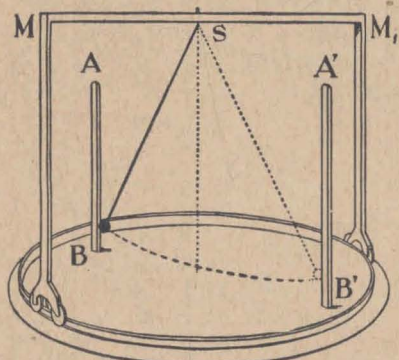


Fig. 111. — Invariabilidad del plano de oscilación del péndulo.

de oscilación del péndulo es invariable, es decir (fig. 111), que si suponemos un péndulo suspendido en un marco que pueda girar alrededor de la vertical que pasa por el punto S de suspensión, y lo hacemos oscilar en el plano de los jalones fijos AB y $A'B'$, el péndulo seguirá oscilando en este plano aun cuando se imprima cualquier rotación al soporte MM_1 alrededor de la vertical de S . La inalterabilidad del plano oscilatorio del péndulo, no es más que uno de los tantos efectos de la ley de inercia. A consecuencia

de ello, si admitimos que la Tierra rota alrededor de un eje en el sentido directo (de O. a E.) en veinticuatro horas siderales, deberán apreciarse los siguientes efectos sobre la superficie del planeta:

a) El plano de oscilación pendular, en uno de los polos de la Tierra, debe coincidir sucesivamente con todos los meridianos terres-

tres en un día sideral, describiendo para el observador una rotación de Este a Oeste (derecha a izquierda en el Polo Sur), con velocidad angular constante de 15° por cada hora sideral.

b) Si la oscilación pendular se lleva a cabo en un punto del ecuador de la Tierra, el plano de oscilación *no acusará giro alguno*.

c) En una *latitud intermedia* φ de la Tierra, el plano de oscilación pendular *aparecerá rotando alrededor de la vertical* que pasa por el punto de suspensión con un período T_1 dado por la relación:

$$T_1 = \frac{T}{\text{sen } \varphi},$$

donde T es igual a 24 h siderales.

PÉNDULO DE FOUCAULT. — Las previsiones tóricas a), b) y c) que venimos de estudiar, se ven ampliamente verificadas por la célebre experiencia realizada por el físico FOUCAULT en El Panteón de París en 1851, y repetida posteriormente en diversas latitudes de la Tierra.

Dicha experiencia, que constituye una de las pruebas más irrefutables de la rotación terrestre, se llevó a cabo utilizando un péndulo de 62 metros de longitud que a la latitud de París oscila en 8 segundos. La masa pendular la constituía una esfera de cobre de 28 kilogramos, y una baranda circular de dos metros de diámetro cubierta de arenilla, hacía las veces de limbo graduado para medir las desviaciones aparentes del plano oscilatorio del péndulo. El centro de dicha baranda estaba situado rígidamente sobre la vertical del punto de suspensión (fig. 112).

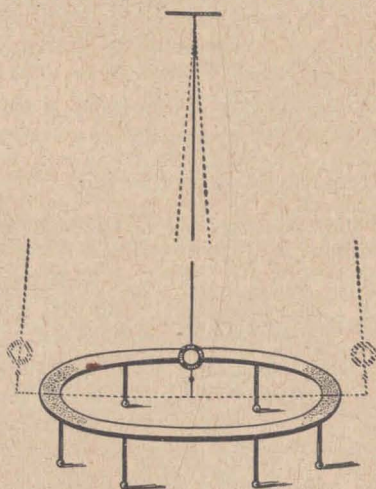


Fig. 112. — Experiencia de Foucault.

Puesto en movimiento el enorme péndulo con toda clase de precauciones, pudo observar Foucault, que a la latitud del Panteón de París la desviación aparente del plano de oscilación hacia el Oeste (de izquierda a derecha en el hemisferio norte), alcanzaba a $11^\circ 17'$ por hora, o lo que es lo mismo, que aquel plano describía con movimiento aparente en el sentido retrógrado, una rotación completa alrededor de la vertical en 31h52m, resultado éste, en un todo de acuerdo con las previsiones teóricas antes expuestas.

FLAMMARIÓN repitió en el mismo lugar la experiencia de Foucault en 1902, obteniendo análogos resultados.

Hoy día puede repetirse el experimento Foucault en cualquier laboratorio de física, revelándose la rotación terrestre en contados minutos,

3º VARIACIÓN APARENTE EN LA DIRECCIÓN DEL EJE ROTATORIO DEL GIRÓSCOPO. — La dirección del eje de rotación del giróscopo es invariable, según se demuestra en física. Luego, si la Tierra rota alrededor de un eje, el eje del giróscopo, salvo el caso de ser paralelo al de la Tierra, aparecerá describiendo alrededor de la dirección de este último, una superficie cónica de revolución de izquierda a derecha. Este efecto confirmado por numerosas experiencias, prueba igualmente la rotación terrestre de Occidente a Oriente.

4º AUMENTO DE LA ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD CON LA LATITUD. — La expresión numérica de la aceleración de la gravedad en el Ecuador es de 978 centímetros por segundo por segundo, alcanzando a 983 de tales unidades en los polos de la Tierra.

Esta diferencia obedece a las siguientes causas:

a) *Aplanamiento elipsoidal del planeta.*

b) *Fuerza centrífuga resultante de la rotación terrestre.*

La diferencia provocada por el aplanamiento entre los valores de la intensidad de la gravedad en el Ecuador y en cualquiera de los polos, no alcanza a valer dos centímetros por segundo y por segundo.

Como esta diferencia es inferior en algo más de tres de esas unidades, a la diferencia real apuntada, se sigue la existencia de la fuerza centrífuga como explicación de aquel efecto, y por consiguiente, la rotación de la Tierra.

Un cuerpo que pesa 1.000 gramos en el polo, sólo pesa 995 gramos en el Ecuador. De los cinco gramos de diferencia, más de tres se deben a la fuerza centrífuga, que en el Ecuador es de igual dirección y sentido contrario a la gravedad, y menos de dos al achatamiento polar del planeta.

También se explica por la rotación terrestre la desviación en el recorrido de los proyectiles y la dirección de los vientos alisios y contraalisios.

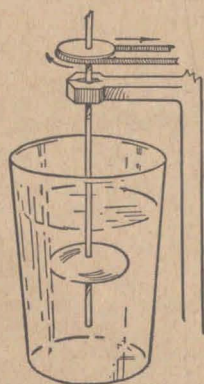


Fig. 113. — Experimento de Plateau.

5º EXPERIMENTO DE PLATEAU. — Las numerosas mediciones de arcos meridianos, comprueban la deformación elipsoidal de la Tierra. Cabe admitir que su aplastamiento no es más que consecuencia de su rotación en la época remota en que fué una masa flúida en ignición, según parecen atestiguarlo el calor central del planeta y los estudios geológicos de las distintas capas de su corteza.

Esta posibilidad tendría un principio de confirmación en el conocido experimento de PLATEAU, el que demuestra que una masa flúida y homogénea, que en su estado de reposo adopta la forma esférica, se convierte en un elipsoide de revolución cuando se la anima de un movimiento rotatorio alrededor de uno de sus diámetros.

Además, el elipsoide resultante, tanto más achatado cuanto mayor es la velocidad angular de rotación, presenta siempre su eje menor coincidente con el de rotación, dando lugar con ello a un abultamiento o protuberancia en la zona ecuatorial, que es precisamente lo que acontece en la Tierra.

La experiencia de Plateau, repetida constantemente en los gabinetes de física, consiste en obtener una mezcla de agua y alcohol con densidad igual a la del aceite. Echando en dicha mezcla un poco de este líquido, no tardará en tomar la forma de una esfera en suspensión a cualquier profundidad de la mezcla citada (fig. 113). La esferilla se pone en rotación alrededor de su diámetro vertical, utilizando al efecto un pequeño disco atravesado en su centro por una fina varilla de vidrio que hace girar el operador con todo cuidado.

Iniciada la operación, se observará en seguida un aplanamiento en la masa rotatoria, tanto mayor cuanto más velocidad se imprima al movimiento, comprobándose además que el eje menor del elipsoide es el de rotación.

Se explica la pequeña magnitud del achatamiento polar de la Tierra, que como antes se dijo sólo alcanza a $\frac{1}{297}$, por la pequeña velocidad rotatoria del planeta.

TRASLACION DE LA TIERRA

148. INTERPRETACION DEL MOVIMIENTO ANUAL DEL SOL: LAS DOS HIPOTESIS. — En el libro II de esta obra nos hemos ocupado del movimiento del Sol sobre el plano de la eclíptica (72).

Este movimiento será real o aparente, según que valga una u otra de las dos hipótesis siguientes:

HIPÓTESIS A. — El centro de la Tierra permanece inmóvil en el espacio, y el Sol describe a su alrededor, año tras año, en el sentido directo de Oeste a Este, una órbita en el plano de la eclíptica.

HIPÓTESIS B. — El Sol permanece inmóvil en el espacio, y la Tierra describe a su alrededor, año tras año, en el sentido directo de Oeste a Este, una órbita en el plano de la eclíptica.

El desplazamiento del Sol entre las constelaciones zodiacales (74), parecería confirmar la primera de dichas hipótesis (*teoría geocéntrica*) que predominó hasta fines del siglo XVI.

La hipótesis B (*teoría heliocéntrica*), explica el movimiento que el Sol ofrece a la observación directa, admitiendo la traslación anual de la Tierra alrededor del Sol.

Más adelante pasaremos revista a las pruebas por las cuales se admite hoy universalmente la teoría heliocéntrica correspondiente a la hipótesis B.

149. EQUIVALENCIA CINEMATICA DE AMBAS HIPOTESIS. — Sea $SS'A$ la órbita elíptica que parece describir el Sol en un año sobre el plano de la eclíptica y en la cual la Tierra T ocupa

un foco (91) y supongamos que el Sol, partiendo del perigeo S , recorra en un tiempo t el arco SS' (fig. 114).

Al llegar el astro a S' , se le ve desde la Tierra proyectado sobre la esfera celeste en la dirección y sentido indicados por la flecha 1.

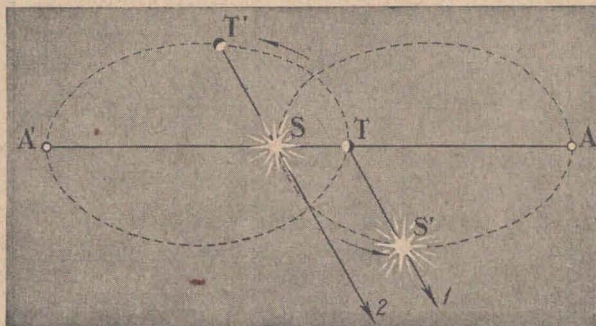


Fig. 114. — Equivalencia cinemática de las teorías geocéntrica y heliocéntrica. (N. D.).

Supongamos a continuación al Sol fijo en S , y a la Tierra desplazándose a su alrededor en un año según la elipse $TT'A'$ análoga a la supuesta órbita solar. Admitiendo que la Tierra en el tiempo t recorre el arco TT' igual al arco SS' , al ubicarse el planeta en T' se verá desde él al Sol proyectarse sobre la esfera celeste en la dirección y sentido indicados por la flecha 2. Siendo iguales los arcos SS' y TT' supuestos recorridos del Sol y de la Tierra en el tiempo t , deducimos:

$$\text{áng. } TST' = \text{áng. } STS',$$

de modo que los rayos visuales TS' y $T'S$ dirigidos desde la Tierra al Sol en ambas hipótesis, son paralelos, y siendo además de igual sentido incidirán en un mismo punto de la esfera celeste, situada teóricamente a distancia infinita, en el cual punto se habrá proyectado el Sol en una u otra de las hipótesis consideradas.

En consecuencia ambas hipótesis desde un punto de vista puramente

cinemático, son rigurosamente equivalentes. Se explica el desplazamiento del Sol en la zona del zodiaco, observando la figura 115, en la cual se considera a la Tierra T , describiendo alrededor del Sol la órbita (circular en la figura), $T_1T_2T_3...T_4$, en el plano

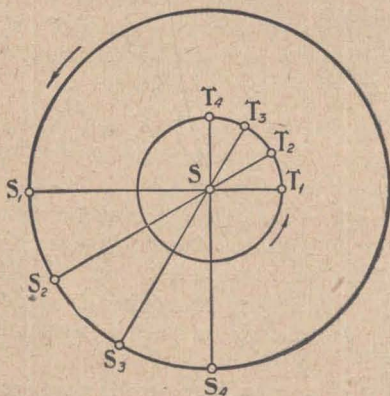


Fig. 115. — Desplazamientos del Sol en el zodiaco en la teoría heliocéntrica. (N. D.).

de la eclíptica, cuya intersección con la esfera celeste es la circunferencia mayor $S_1S_2S_3\dots, S_1$.

Suponiendo que la Tierra, en los meses de *abril, mayo, junio, julio...*, se vaya moviendo en las inmediaciones de los puntos $T_1, T_2, T_3, T_4\dots$, el Sol en dichos meses se irá proyectando sucesivamente sobre la esfera celeste en las proximidades de los puntos $S_1, S_2, S_3, S_4\dots$, ubicados en la zona del Cielo ocupada por las constelaciones zodiacales (74) de *Aries, Tauro, Géminis, Cáncer...*, que son, como ya se ha visto, las que efectivamente jalonan mes tras mes, el camino del Sol en el plano de la eclíptica.

Las flechas de la figura indican que de ser real el movimiento de traslación de la Tierra, el sentido de ese movimiento debe ser el directo, de Oeste a Este, en conformidad con el sentido del movimiento aparente anual del Sol.

PRUEBAS DE LA TRASLACION DE LA TIERRA

150. PARALAJE ANUAL DE LAS ESTRELLAS.— En el párrafo 118, hemos definido a la paralaje, como el radio aparente de la Tierra, visto desde el centro de astro. Pero, la paralaje bajo ese aspecto, tiene siempre un valor nulo cuando el astro de referencia es una estrella. En efecto: en tales condiciones la longitud del radio terrestre, cuyo valor medio es de 6.370 kilómetros, es tan insignificante ante la magnitud de la distancia que nos separa de cualquier estrella, que el ángulo bajo el cual se apreciaría desde uno de estos astros, escapa a toda medición.

De ahí, que para poder determinar distancias de estrellas al planeta que habitamos, los astrónomos se han visto en la necesidad de adoptar un nuevo tipo de paralaje que es la llamada *paralaje anual*.

Para definirla, debemos considerar a la Tierra en traslación alrededor del Sol del cual dista en números redondos 150.000.000 de kilómetros.

Se llama *paralaje anual de una estrella, al radio aparente de una esfera con centro en el Sol, y radio igual a la distancia Sol-Tierra, visto desde aquélla*.

Teóricamente, dicho ángulo puede determinarse así:

Sean e una estrella cualquiera y T y T_1 dos posiciones de la Tierra sobre su órbita anual alrededor del Sol, tomadas con seis meses de diferencia (fig. 116). Las visuales Te y T_1e forman un ángulo TeT_1 cuya mitad ω es la paralaje anual de la estrella e .

Es evidente, que si la Tierra fuera un cuerpo inmóvil en el espacio, no habría paralaje anual puesto que en tal caso coincidirían las visuales Te y T_1e , o en otros términos, todas las paralajes estelares serían nulas.

Las minuciosas mediciones verificadas con muchas estrellas del Cielo a partir del segundo tercio del siglo XIX, han permitido de-

terminar paralajes anuales de muchas estrellas, obteniéndose siempre valores inferiores a $1''$ de ángulo. El primer valor efectivo fué obtenido por *Bessel* en 1838, quien encontró como expresión de la paralaje de la estrella 61 del Cisne $0'',31$.

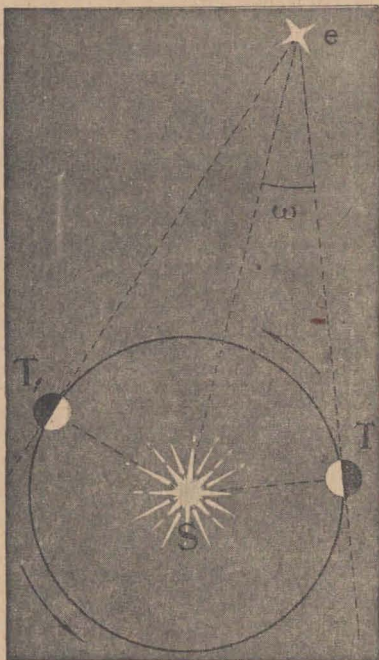


Fig. 116. — Paralaje anual. (N. D.).

Esta determinación permitió obtener por primera vez la distancia de una estrella a la Tierra.

Debido a la paralaje anual, las estrellas parecen describir en un año pequeñas elipses en el Cielo, en sentido contrario al del movimiento de traslación de la Tierra. Para una estrella ubicada en las cercanías de un polo de la eclíptica (α del Dragón), dicha elipse es casi circular; en cambio, para una estrella ubicada sobre el plano de la eclíptica, la elipse paraláctica degenera en un segmento de recta. El semieje mayor de tales elipses da en su amplitud la paralaje de las correspondientes estrellas.

La determinación de las primeras paralajes estelares, proporcionaron la más sólida de las pruebas relativas a la revolución anual de la Tierra alrededor del Sol. Es instructivo hacer notar que

TYCHO-BRAHE aducía como argumento contrario a tal hipótesis, el hecho de que las estrellas no presentaban paralaje anual, pues en su tiempo los medios empleados para tales determinaciones eran insuficientes.

151. ABERRACION ANUAL. — Otra prueba importante de la traslación de la Tierra, la proporciona la aberración anual de la luz que nos llega de las estrellas, fenómeno éste descubierto e interpretado por *BRADLEY* en 1728, mientras trataba de determinar la paralaje de la estrella γ del Dragón.

La aberración consiste en un desvío aparente experimentado por los astros alrededor de sus posiciones verdaderas.

Sea (fig. 117), *AB* un anteojo dirigido a la estrella *e*. Si consideramos inmóvil al mismo, el rayo luminoso *eA* proveniente de la estrella, después de atravesar el objetivo seguirá en el interior del tubo la dirección *AC*. Pero si consideramos a la Tierra en movimiento en la dirección y sentido de la fecha 1, el anteojo partici-

pando en el mismo, se habrá desplazado algo a la derecha mientras el rayo de luz recorre la longitud del tubo del instrumento, de modo que el recorrido del rayo luminoso respecto del tubo será el AD .

Luego, en el tiempo que emplea la luz en el recorrido AC , la Tierra, juntamente con el anteojo, se habrá desplazado en el espacio en un segmento DC de su trayectoria.

En cuanto al valor del *ángulo de aberración* eAe' , depende, en primer lugar de la relación existente entre las velocidades de la Tierra y de la luz, y en segundo, de la dirección del rayo luminoso con respecto a la del movimiento de la Tierra, siendo máximo cuando éstas son normales entre sí.

Este ángulo de máxima desviación, igual para cualquier estrella del Cielo, se llama *constante de aberración*, y podemos calcularlo teóricamente. Sean c y v las velocidades de la luz y de la Tierra en su traslación, respectivamente. Designando por α al valor de la constante de aberración, el valor de su tangente es dado por la relación existente entre los valores de c y v , es decir:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{DC}{AC} \quad \therefore \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{c} \quad [1]$$

Determinaciones astronómicas de gran precisión, dan como valor medio más aproximado de la constante de aberración anual:

$$\alpha = 20'',47.$$

Reemplazando este valor en [1] y siendo $c = 300.000$ km. —, resulta para la velocidad v de traslación de la Tierra: seg.

$$v = \operatorname{ctg} \alpha = 29,78 \frac{\text{km.}}{\text{seg.}} \approx 30 \frac{\text{km.}}{\text{seg.}}$$

Considerando la órbita de la Tierra circular, puede calcularse su radio, o sea la distancia al Sol, sabiendo que a esa velocidad dicha órbita es recorrida en 365,25 días. Se obtiene así:

$$R = \frac{29,78 \cdot 365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{2\pi} = 149.300.000 \text{ km.}$$

Cada estrella, en razón de la aberración anual aparece describiendo en el cielo alrededor de su posición verdadera, una elipse cuyo eje mayor paralelo al plano de la eclíptica es el doble de la constante de aberración, es decir unos $41''$. En cuanto al eje menor de tales elipses depende de la posición de la estrella sobre la esfera celeste con respecto al plano de la eclíptica: si la estrella está ubicada en la



Fig. 117. —
Aberración
anual.

proximidad de uno de los polos eclípticos, su elipse de aberración es casi circular, y si el astro está sobre el plano de la eclíptica, su elipse de aberración degenera en un segmento de recta de 41" de amplitud. Para posiciones intermedias, las elipses de aberración son tanto más alargadas, cuanto menor sea la distancia angular del astro a la eclíptica.

CONSECUENCIAS DE LA TRASLACION DE LA TIERRA

152. LA ORBITA TERRESTRE: CARACTERISTICAS. PERIHELIO Y AFELIO. — La órbita o trayectoria anual de la Tierra sobre el plano de la eclíptica tiene todas las características estudiadas en el libro II de esta obra para la órbita aparente del Sol en su movimiento entre las constelaciones del Zodíaco. Como se dijo entonces, dicha órbita es una elipse cuya excentricidad, que hemos

calculado (92), llega apenas a $\frac{1}{60}$. El Sol ocupa en ella uno de los

focos, y la Tierra la recorre en el sentido directo siguiendo la ley de las áreas (95) y por consiguiente, con velocidad angular variable a lo largo del año. El eje mayor o *línea de los ápsides*, presenta sobre la órbita dos puntos, el *perihelio* y el *afelio*, a los cuales llega la Tierra a principios de enero y julio, respectivamente, colocándose a la mínima y máxima distancia del Sol.

153. POSICIONES DE LA TIERRA EN LAS CUATRO ESTACIONES DEL AÑO. — En el movimiento anual de la Tierra alrededor del Sol, su eje de rotación, permanece constantemente paralelo a sí mismo.

Este carácter de la traslación terrestre, unido al hecho de que el eje rotatorio del planeta forma con el plano de la eclíptica un ángulo de 66°33", da lugar a importantes y variadas consecuencias relativas a las estaciones, al tiempo, etc.

Las 4 estaciones del año, ya estudiadas en parágrafo 96, se derivan en realidad de las posiciones de la Tierra sobre su órbita anual, en la cual, como ya sabemos, el Sol ocupa uno de los focos. Según se vió, son opuestas en ambos hemisferios de la Tierra, y los instantes de su iniciación son aquellos en que el centro del Sol, en su movimiento aparente sobre la eclíptica, se ubica en los equinoccios y solsticios.

En la figura 118 pueden verse las posiciones ocupadas por la Tierra sobre su órbita en las fechas de los equinoccios y solsticios.

La figura, fielmente interpretada, muestra, como en los instantes en que la Tierra ocupa las posiciones T_s , T_d , T_m y T_j , el Sol será visto sobre la esfera celeste, recorriendo la eclíptica, en γ' (punto libra); S_d (solsticio de diciembre); γ (punto vernal); y S_j (solsticio de junio), respectivamente, iniciándose en tales ins-

tantes para el hemisferio austral, y en el orden que las citamos, la *primavera*, el *verano*, el *otoño* y el *invierno* (en el hemisferio boreal, las opuestas). Además, puede observarse la posición del eje de la Tierra *sn* constantemente paralelo a sí mismo durante la traslación, y dirigido por consiguiente, en uno y otro sentido, siempre a los mismos puntos P_s y P_n de la esfera celeste que son los

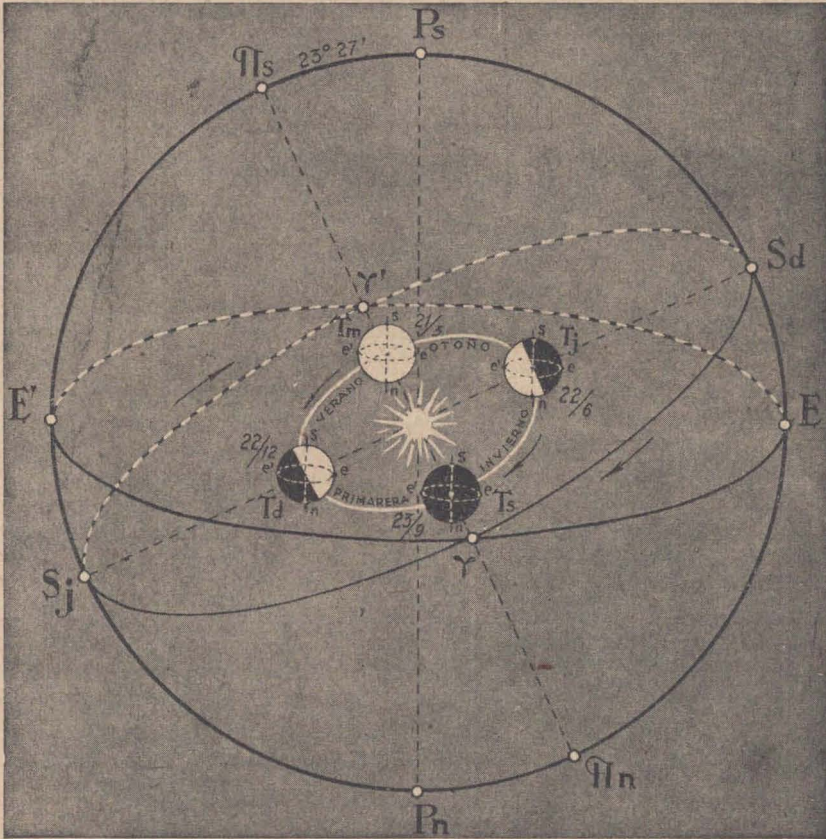


Fig. 118. — Posiciones de la Tierra sobre su órbita en las fechas de los equinoccios y solsticios.

polos celestes. También demuestra la figura las variantes ya estudiadas respecto a la duración del día y la noche en las diversas latitudes del planeta. Obsérvese al respecto, por el sombreado, como el polo Sur *s* de la Tierra, debe permanecer en las sombras en los seis meses comprendidos desde el 21 de marzo al 23 de setiembre, entre cuyas fechas estará constantemente iluminado por el Sol el polo Norte *n*, y como en los 6 meses restantes del año debe acontecer lo contrario. Un detalle interesante, y que no debe pasar inadvertido.

tido, es que cuando la Tierra durante 6 meses parece estar internada en el hemisferio celeste boreal $P_n EE'$, el Sol aparecerá declinando en el austral $P_s EE'$, y viceversa.

* 154. CARACTER ASTRONÓMICO DE LAS ZONAS. — Los paralelos terrestres situados a uno y otro lado del Ecuador a $23^{\circ}27'$ y $66^{\circ}33''$, dividen a la superficie de la Tierra en cinco zonas astronómicas cuyas características principales pasamos a detallar. En la figura 119 el círculo menor es un meridiano de la Tierra y la circunferencia mayor es la traza del mismo sobre la esfera celeste. Las trazas del ecuador celeste y terrestre están designadas por EE_1 y ee_1 , respectivamente; los trópicos celestes de Capricornio y Cáncer tienen por trazas AB y GF y los mismos en la Tierra, o sean los paralelos de $23^{\circ}27'$ Sur o Norte, están designados por ab y gf ; los círculos polares antártico y ártico

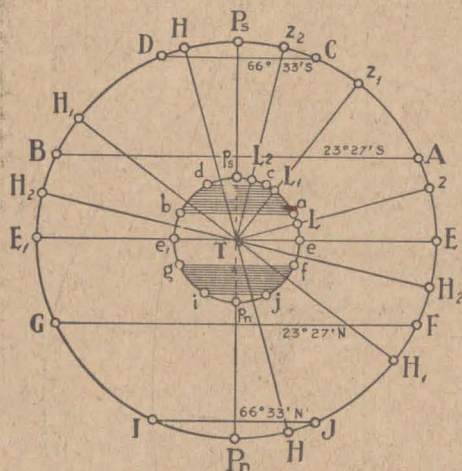


Fig. 119. — Zonas terrestres.

están representados en el cielo por CD e IJ , y en la Tierra por las mismas letras minúsculas y en cuanto al eje del mundo viene designado por $P_s P_n$ siendo $p_s p_n$ el eje de rotación de la Tierra.

1^o ZONA TÓRRIDA. — Es la comprendida entre los trópicos terrestres de Capricornio, ab , y Cáncer gf .

2^o ZONAS TEMPLADAS. — Son dos: una austral que se extiende entre el trópico terrestre de Capricornio ab y el círculo polar antártico cd , y otra boreal comprendida entre el trópico de Cáncer gf y el círculo polar ártico ij .

3^o ZONAS GLACIALES. — Forman sobre la Tierra dos casquetes esféricos comprendidos entre cada círculo polar y el respectivo polo terrestre.

* 155. VARIACION DE TEMPERATURA EN UN LUGAR DE LA TIERRA. — La cantidad de calor que recibe en la unidad de tiempo la unidad de superficie sometida a las radiaciones que emanan de una fuente calorífica, está regulada por las leyes siguientes:

1^o Es proporcional al coseno del ángulo formado por la dirección de los rayos con la normal a la superficie.

2º *Es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, entre dicha superficie y la fuente.*

Considerando al Sol como fuente única de irradiación colorífica sobre la superficie terrestre, y tomando como constante a la distancia Sol-Tierra en virtud de su poca variación, deducimos que el calor que envía aquel astro sobre un elemento de superficie terrestre en la unidad de tiempo, está dado por la primera de las leyes enunciadas, interviniendo también el espesor de las capas atmosféricas atravesadas por las radiaciones solares, las cuales ejercen una absorción que debe tomarse muy en cuenta.

En cuanto a la temperatura de un cierto lugar de la Tierra, no sólo depende de la cantidad de calor recibida del Sol, sino que también de una serie de factores complejos, como ser la *altitud del lugar* y ciertos fenómenos meteorológicos tales como *vientos, nublados, estado higrométrico del aire, electricidad atmosférica, etc.*

Prescindiendo de estos factores variables, y considerando únicamente los efectos producidos por la *radiación solar*, podremos considerar dos variaciones periódicas de temperatura a saber: *variación diurna y variación anual.*

VARIACIÓN DIURNA. — La cantidad de calor que recibimos del Sol en un cierto lugar en la unidad de tiempo, varía en igual sentido que la altura del Sol sobre el horizonte, creciendo entonces, desde la salida del astro hasta su culminación en el semimeridiano del lugar, y decreciendo desde este instante hasta el de la puesta. Al mismo tiempo, como la Tierra va perdiendo paulatinamente parte del calor recibido, resulta que la temperatura se eleva mientras la ganancia en calor supera a la pérdida y descende en el caso contrario. Por estas causas, la *temperatura máxima suele registrarse hacia las 14 horas, y la mínima poco después de la salida del Sol.*

VARIACIÓN ANUAL. — Estudiaremos esta variación para las distintas zonas terrestres, refiriéndonos en particular a las australes, bien entendido, que todo cuanto acontece en éstas, acontece también en las zonas boreales desplazando en 6 meses las fechas que mencionamos.

1º ZONA TEMPLADA AUSTRAL. — La cantidad de calor recibida en un lugar durante el día, depende de la altura de culminación del Sol en esa fecha y de la magnitud del arco diurno recorrido por el astro entre su salida y su puesta. Estos factores, en la zona templada austral, toman su valor máximo hacia el 22 de diciembre, o sea en el *solsticio de Capricornio* fecha en que el Sol, a mediodía, llega a su *mínima distancia cenital* y se registra además la *máxima diferencia entre las duraciones del día y de la noche.*

En general podemos decir, que para cualquier localidad de esta zona, el calor recibido del Sol *aumenta desde el solsticio del 22 de junio hasta el solsticio del 22 de diciembre.* En los 6 meses restantes, el calor proveniente del Sol, para cualquier lugar de esta zona, va en descenso.

El día de mayor temperatura parecería ser el 22 de diciembre, pero en realidad, las máximas temperaturas medias se registran *un mes después*, hacia fines de enero, por una especie de *inercia* análoga a la ya vista en la variación diurna.

Las temperaturas más elevadas en la zona templada, salvo factores de perturbación, deben corresponder a los lugares inmediatos al trópico donde los rayos solares el día del solsticio correspondiente, inciden casi normalmente a la superficie del suelo por ubicarse el Sol a mediodía próximo al *cenit* del lugar. En cambio las más bajas temperaturas de la zona deben registrarse sobre el círculo polar donde la dirección de los rayos solares aparece inclinada respecto a la normal a la superficie, en un ángulo mayor que en todo otro lugar de la zona.

29 ZONA TÓRRIDA. — Los rayos solares, en toda época del año, se alejan poco de la normal a la superficie del suelo, incidiendo casi verticalmente a mediodía por lo cual su poder calorífico es mayor que en toda otra zona de la Tierra. Se deriva de ello, una temperatura media superior a la de las demás zonas terrestres, temperatura que por otra parte, sólo experimenta variaciones poco apreciables en el transcurso del año. Si se tiene en cuenta, que además del factor apuntado, es muy reducida la diferencia entre las duraciones del día y de la noche (en el Ecuador son iguales), podrá afirmarse que en la zona tropical se vive un *verano perpetuo*. Algunos cambios sensibles en la temperatura corriente, pero de corta duración, hay que atribuirlos a factores locales.

30 ZONA GLACIAL AUSTRAL. — Desde el 23 de setiembre, comienzo de la primavera austral, el calor recibido del Sol va en aumento hasta el 22 de diciembre, en que se inicia el verano astronómico. La máxima temperatura se registra días después del solsticio de Capricornio, a *principios de enero*, y la mínima algún tiempo después del equinoccio de setiembre, en los *comienzos de octubre*, por cuya razón, en esta zona, pueden considerarse solo dos estaciones efectivas: un *verano corto de 3 meses*, y un *invierno dilatado de 9 meses* y muy riguroso. El verano, pese a su corta duración con respecto al invierno, es más cálido de lo que pudiera suponerse, en razón de los *largos días* que se suceden en las latitudes elevadas.

Los rayos solares llegan a esta zona muy debilitados en cuanto a poder calorífico, no sólo por su *gran inclinación con respecto a la normal a la superficie*, sino también por la considerable *absorción* ejercida por la gran capa de aire que atraviesan oblicuamente.

* 156. PRINCIPALES MOVIMIENTOS DE LA TIERRA. — Enumeramos a continuación los distintos movimientos del planeta, de los cuales ya han sido estudiados los más importantes, dando algunas características relativas a los que no han sido considerados en capítulos anteriores.

1º ROTACIÓN DIURNA ALREDEDOR DE UN EJE.

2º TRASLACIÓN ANUAL ALREDEDOR DEL SOL.

3º PRECESIÓN. — (101).

4º NUTACIÓN. — (103).

5º MOVIMIENTO DE LA LÍNEA DE LOS ÁPSIDES. — Consiste en un desplazamiento del perihelio y del afelio a razón de poco más de $11''$ por año, en el sentido directo de Oeste a Este. Por este movimiento, la órbita terrestre parece rotar alrededor de un eje que pasa por el Sol, en un periodo de tiempo que alcanza a unos 108.000 años. Este movimiento de la órbita terrestre se considera como una perturbación producida sobre la Tierra por la acción conjunta de los demás planetas del sistema solar.

6º VARIACIÓN DE LA OBLICUIDAD. — El ángulo comprendido entre los planos del ecuador terrestre y la eclíptica, que en tiempos de HIPARCO (hace 23 siglos), tenía el valor de $23^{\circ} 49'$, se ha reducido lentamente hasta valer en la actualidad $23^{\circ} 27'$. Esta reducción se debe a un movimiento de balanceo entre aquellos planos, originado por la atracción planetaria sobre la Tierra.

7º PERTURBACIONES QUE SEPARAN A LA TIERRA DE SU ÓRBITA ELÍPTICA. — La variación de la distancia que separa a la Tierra de cada planeta, origina variaciones en las acciones atractivas de los mismos que se manifiestan por una tendencia de la Tierra a separarse de su órbita anual, la cual en consecuencia, presentará de tiempo en tiempo algunas sinuosidades poco acentuadas sobre su forma elíptica.

8º VARIACIÓN DE LA EXCENTRICIDAD DE LA ÓRBITA TERRESTRE. — Dicha excentricidad experimenta en nuestros tiempos un ligero descenso, con lo cual la órbita se va acercando cada vez más a la circunferencia. Dentro de 240 siglos casi habrá tomado dicha forma, pero a partir de entonces la excentricidad irá en ascenso, con lo cual volverá a su forma de elipse poco alargada. Se atribuye este efecto, lo mismo que los anteriores, a la acción planetaria sobre la masa terrestre.

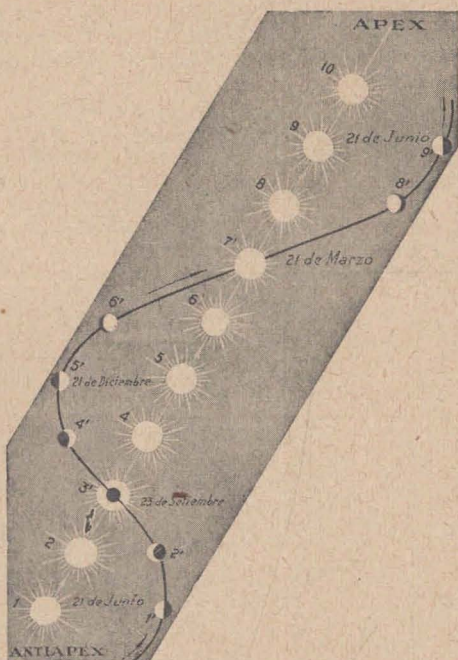


Fig. 120. — Forma aproximada de la trayectoria terrestre con respecto a las estrellas cercanas.

99 DESPLAZAMIENTO DE LA TIERRA HACIA EL ÁPEX ACOMPAÑANDO AL SOL EN SU MOVIMIENTO. — El Sol, lo mismo que las demás estrellas del Universo, tiene su propia traslación con respecto a las estrellas cercanas dirigiéndose hacia un punto del Cielo llamado ápex, ínterin se aleja de otro diametralmente opuesto denominado antiápex. En este movimiento lo acompañan la Tierra y demás astros del sistema solar.

Debido a esta traslación de todo el sistema, que se lleva a cabo con una velocidad de 20 kilómetros por segundo, la Tierra en su recorrido anual no pasa jamás por un mismo punto del espacio, lo que equivale decir, que su órbita alrededor del Sol no es una curva plana, sino que se asemeja a las espiras de un inmenso solenoide que va recorriendo una después de otra, año tras año (fig. 120).

109 MOVIMIENTO ALREDEDOR DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL PAR LUNA - TIERRA. — Las fuerzas atractivas correspondientes a los dos astros, forman un sistema cuyo centro de gravedad está 80 veces más cerca de la Tierra que del satélite, en razón de la mayor masa de aquella, y alrededor de dicho punto se desplazan mensualmente ambos astros, cumpliendo la Luna su revolución alrededor de la Tierra, y describiendo ésta una pequeña elipse.

119 MOVIMIENTO DE LOS POLOS SOBRE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA. — Los polos terrestres no permanecen fijos, sino que se mueven lentamente alrededor de su posición media describiendo una trayectoria casi en espiral. Este movimiento, cuya amplitud no pasa de quince metros, se debe a la plasticidad del globo terráqueo y da lugar a ligeras variaciones en la latitud de todos los lugares del planeta, variaciones por otra parte, que pasan casi inadvertidas. En este movimiento parecen superponerse dos períodos, de los cuales uno es de un año y el otro de catorce meses.

CAPITULO TERCERO

DETERMINACION DE LAS COORDENADAS GEOGRAFICAS

157. DETERMINACION DE LA LATITUD. — En el párrafo 20, nos hemos ocupado de las dos coordenadas geográficas. El valor numérico de la latitud se obtiene con gran precisión aplicando el teorema demostrado en párrafo 28, en conformidad con el cual, *la latitud de un lugar es igual a la altura del polo celeste sobre su horizonte.*

Como el polo celeste P es un punto invisible del Cielo, se determina su *altura* (o la distancia cenital), siguiendo un procedimiento ya visto (40.) y obtenemos:

$$\varphi = h = \frac{h_1 + h_2}{2},$$

donde h_1 y h_2 son las *alturas tomadas en las dos culminaciones de una estrella circumpolar*, y h la *altura del polo celeste.*

Para determinaciones rápidas, sobre todo en el mar, puede obtenerse fácilmente la latitud utilizando la fórmula determinada en el párrafo 52, es decir:

$$\delta = \varphi \pm Z \quad \therefore \quad \varphi = \delta \mp Z.$$

158. DETERMINACION DE LA LONGITUD. — En la actualidad para evitar las indeterminaciones en las longitudes geográficas derivadas de la adopción de diversos meridianos tomados como origen, se ha convenido en considerar siempre como primer meridiano al de Greenwich, a partir del cual se contarán las longitudes de 0° a 180° hacia el Oriente o hacia el Occidente.

Supongamos, que en un determinado instante, el círculo horario de un astro cualquiera A coincide con el semimeridiano de un lugar L de la Tierra (el astro culmina para ese lugar). Si imaginamos otros lugares terrestres L' , L'' , L''' , ..., etc., cuyos semimeridianos formen con el de L ángulos de 15° , 30° , 45° , ..., etc., resultará que el círculo horario del astro A empleará 1h, 2h, 3h, ..., etc., en tiempo del astro (si se trata del Sol, solares), para ponerse sucesivamente en coincidencia con los semimeridianos de los lugares L' , L'' , L''' , ..., etc., cuando estos lugares están a occidente de L .

De las anteriores consideraciones, se derivan las importantes proposiciones que pasamos a enunciar:

I. *La diferencia entre las longitudes geográficas de dos lugares de la Tierra, es igual a la diferencia de los ángulos horarios de un mismo astro tomados en igual instante desde ambos lugares.*

II. *La diferencia entre las longitudes geográficas de dos lugares de la Tierra, es igual a la diferencia entre sus tiempos locales en un mismo instante, tomada a razón de 15° por hora.*

En la actualidad, la longitud de un lugar se determina empleando casi exclusivamente las señales telegráficas inalámbricas, poniéndose el mayor cuidado en el registro de la hora local exacta, la cual se compara con la hora del primer meridiano (hora universal), transmitida varias veces durante el día y la noche por estaciones radiotelegráficas de numerosos países de la Tierra. La estación transmisora de la torre de Eiffel emite señales que dan la hora universal, dos veces por día, una durante la mañana y otra por la tarde. La diferencia entre la hora universal y la local da fácilmente, en virtud de la II proposición enunciada, la longitud geográfica del lugar.

MAPAS GEOGRAFICOS

159. **GLOBOS TERRESTRES.** — El elipsoide terrestre, lo mismo que la esfera celeste, puede representarse por globos contruidos

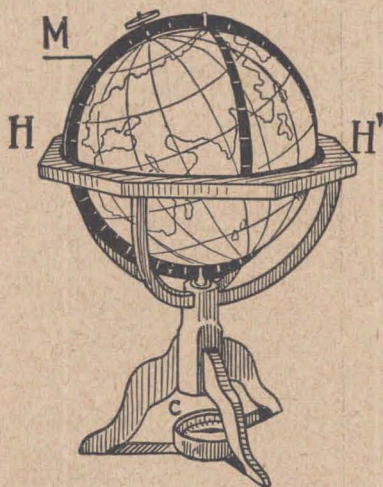


Fig. 121. — Globo terrestre.

en cartón o madera, de forma más o menos esférica, dadas las reducidas dimensiones del achatamiento polar y de los relieves continentales comparadas con el radio medio del planeta. Sobre dichos globos se representan los continentes por figuras que les son semejantes tomadas en una escala

r' , donde r' , es el radio del globo y r el radio medio de la Tierra. Las dimensiones que pueden asignarse a estos globos son de por sí completamente insuficientes como para representar a las distintas regiones del planeta con los detalles necesarios para su estudio, por lo cual trata de evitarse el inconveniente,

mediante la confección de mapas y cartas donde aparecen los detalles de toda naturaleza relativos a las regiones comprendidas, ya sean éstas de vasta extensión, ya de extensiones más reducidas.

160. **MAPAS GEOGRAFICOS.** — Son diseños ejecutados sobre una superficie plana, donde se representa en su totalidad, o en parte,

la superficie del planeta. En el mapa general o mapamundi, la Tierra está representada en sus dos hemisferios. La escala utilizada en este caso es muy restringida dada la gran extensión superficial del planeta.

Los mapas particulares pueden representar un continente, una nación, una provincia, un departamento, etc., siendo tanto mayor la escala empleada cuanto menor sea la extensión de la región representada.

Los mapas terrestres, en general, deforman las figuras de las regiones que representan, ya que la superficie esférica, como también la del elipsoide, no pueden extenderse sobre el plano, como pasa con las superficies llamadas regladas, entre ellas, las del cilindro y el cono.

Resulta de ello, que las figuras obtenidas sobre el mapa aparecen deformadas con relación a las figuras reales de las regiones representadas, o en otros términos, el diseño y la figura real no son figuras semejantes. Estas deformaciones, considerables en las cartas o mapas generales y en todos aquellos que abarcan grandes extensiones (continentes, países extensos), se atenúan considerablemente en los mapas particulares que abarcan extensiones pequeñas.

161. CONFECCION DE UN MAPA GEOGRAFICO: CANEVA.

— Los mapas geográficos pueden confeccionarse utilizando uno de los dos procedimientos fundamentales que siguen, en conformidad con las finalidades deseadas:

a) Aplicando a la zona a representar alguno de los *sistemas de proyección* estudiados en geometría, sobre todo el *ortogonal* y el *estereográfico*.

b) Utilizando los *desarrollos planos de las superficies regladas*, como son las del *cilindro* y el *cono*.

En este caso, las superficies esféricas se suponen llevadas primero sobre un cilindro o un cono envolvente de la esfera terrestre y luego desarrolladas sobre el plano.

Cada uno de los métodos utilizados tiene sus ventajas y sus inconvenientes, por lo cual en la confección de mapas y cartas se toma muy en cuenta la aplicación a que se las destina.

El *canevá* de un mapa está constituido por la red de líneas que se trazan con anterioridad, representando los *meridianos* y *paralelos*. Los distintos lugares pueden ubicarse sobre el mapa teniendo en cuenta que cada *semimeridiano terrestre* contiene a todos los lugares de *igual longitud* y cada *paralelo* a los de *igual latitud*. Resulta de ello, que conociéndose las *coordenadas geográficas* de un lugar, dicho lugar queda perfectamente determinado sobre la superficie del planeta, y el *canevá* permite fijarlo en el mapa en el punto de intersección de su paralelo y su semimeridiano,

162. PROYECCION ORTOGRAFICA. — Este sistema se utiliza para proyectar ortogonalmente sobre un plano todo un hemisferio de la Tierra supuesta rigurosamente esférica. El plano de proyección es la base del hemisferio representado, de modo que será siempre un *círculo máximo del planeta*, ya sea el *Ecuador*, ya un *meridiano*.

1º PROYECCIÓN ORTOGRÁFICA SOBRE EL ECUADOR. — Se utiliza para representar los hemisferios norte y sur de la Tierra en los mapas generales.

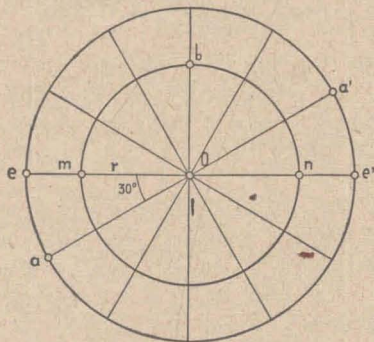


Fig. 122. — Proyección ortográfica sobre el Ecuador.

El canevá o red de paralelos y meridianos, se confecciona en la forma siguiente (fig. 122): el ecuador terrestre es el círculo *eae'a'*, y los paralelos, círculos concéntricos al anterior, tal como el *mbn*. Para determinar el radio *On* con el cual debe trazarse el paralelo de latitud φ , aplicamos la fórmula de fácil deducción:

$$On = r \cdot \cos. \varphi,$$

en la cual r es la longitud *Oe* del segmento representativo del radio de la Tierra, y φ la graduación del paralelo a diseñarse.

Se completa el canevá teniendo en cuenta que las trazas de los semimeridianos sobre el Ecuador *eae'a'*, son radios de este círculo. Si suponemos que *Oe* es el primer semimeridiano, trazáramos los demás formando con aquél ángulos iguales a los de sus respectivas graduaciones: así el semimeridiano de 30° , que en la figura es el *Oa*, se ha trazado formando con *Oe* el ángulo $eOa = 30^\circ$, y así con los demás.

En la figura se han trazado los semimeridianos de 30° en 30° , interceptándose en el punto *O* que es el polo terrestre del hemisferio que se diseña.

En las proyecciones ortográficas sobre el Ecuador, los *paralelos terrestres* se proyectan en su *verdadero grandor escalar*.

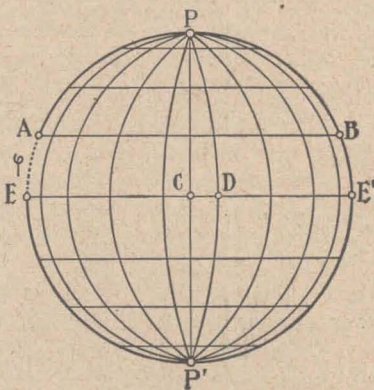


Fig. 123. — Proyección ortográfica sobre un meridiano.

2º PROYECCIÓN ORTOGRÁFICA SOBRE UN MERIDIANO. — En este caso, el meridiano sobre el cual se proyecta, aparece como un círculo *PEP'E'* (fig. 123), cuyo radio es en escala el radio de la Tierra.

El caneavá se diseña trazando semielipses correspondientes a los distintos semimeridianos. En la figura aparecen tomados de 20° en 20° , pasando todos por P y P' que son los polos de la Tierra.

El semieje menor CD de la elipse representativa del semimeridiano correspondiente a la longitud λ con respecto al meridiano central PCP' , es dado por la relación:

$$CD = r \operatorname{sen.} \lambda,$$

donde r es el segmento adoptado en escala como radio de la Tierra. En cuanto al Ecuador, está representado por el diámetro EE' normal a PP' , mientras que las trazas de los paralelos terrestres, paralelas a la anterior, aparecerán como cuerdas que no son más que los diámetros verdaderos de los respectivos paralelos. Uno de ellos, correspondiente a la latitud cualquiera φ , se trazará en el caneavá, tomando el arco $EA = \varphi$.

163. PROPIEDADES DE LA PROYECCION ORTOGRAFICA.

— En este sistema de proyección, las figuras aparecen deformadas tanto más, cuanto más nos alejamos del centro donde las deformaciones son nulas.

Si consideramos la proyección sobre el Ecuador, los paralelos se proyectan según sus verdaderas dimensiones, no pasando lo mismo con los meridianos, pues arcos iguales de uno de éstos son representados por segmentos de recta que disminuyen a medida que nos alejamos del centro O .

En consecuencia, las zonas polares de la Tierra son las que resultan de más perfecta interpretación, mientras que las ecuatoriales aparecen enormemente desfiguradas en el sentido de la latitud.

En la proyección ortográfica sobre un meridiano, aparecen muy deformadas las regiones situadas en las cercanías del meridiano de proyección, mientras que en aquellas cuya longitud difiere de tal meridiano en magnitudes cercanas a los 90° , la deformación es pequeña. Como en este caso los arcos iguales de un meridiano son segmentos elípticos tanto menores cuanto mayor sea la latitud, puede deducirse que las zonas polares aparecen fuertemente deformadas, en tanto que las ecuatoriales están bien representadas en el centro del mapa, y deformadas en el sentido de la longitud en la periferia del mismo.

En conclusión: *en cualquiera de las proyecciones ortográficas, sólo son fielmente interpretadas las regiones ubicadas en las cercanías del centro del mapa.*

164. PROYECCION ESTEREOGRAFICA. — En este sistema se representa un hemisferio terrestre por su perspectiva sobre el plano del círculo máximo MN que le sirve de base, tomando como punto

de vista al punto O diametralmente opuesto al polo P del hemisferio (fig. 124).

Se trata, pues, de una proyección, donde toda porción A del hemisferio a representarse, es vista desde O sobre el plano MN según a .

La proyección estereográfica puede hacerse con respecto a cualquier círculo máximo de la Tierra y tiene la ventaja que *el caneavá está formado por rectas y arcos de circunferencia*.

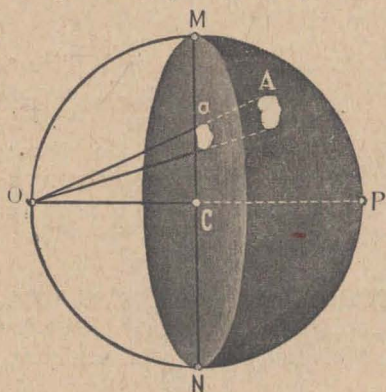


Fig. 124. — Proyección estereográfica.

1º PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA SOBRE EL ECUADOR. — En este caso siendo EE' el plano del ecuador terrestre, el punto de vista es V , de modo que el polo P del hemisferio a representarse se proyecta en el centro O del círculo EE' (fig. 125).

El caneavá puede apreciarse en la figura 126. El meridiano $PEVE'$ de la figura 125, que podemos tomar como meridiano de origen, se proyecta en el caneavá según su traza ee' que no es más que un diámetro del círculo ecuatorial eRe' .

Si se quiere llevar al caneavá cualquier semimeridiano, como ser el PSV de la figura 125, se tomará la magnitud del arco ES , o sea, la graduación del semimeridiano a representar, llevándola en la otra figura en eS , y uniendo S con O' se

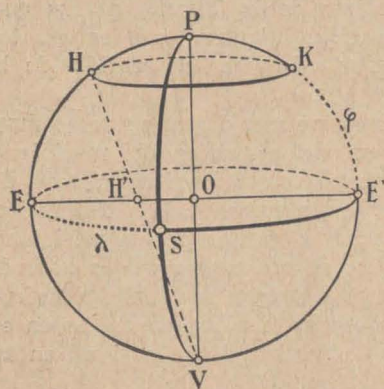


Fig. 125. — Proyección estereográfica sobre el Ecuador.

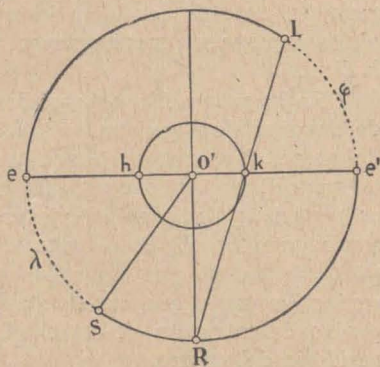


Fig. 126. — Caneavá de la proyección estereográfica sobre el Ecuador.

tendrá en el radio $O'S$ la proyección estereográfica pedida, procediéndose en igual forma para los demás semimeridianos.

Los paralelos dan lugar a proyecciones circulares con centro común en O' . Puede observarse en la figura 125 que el punto H

del paralelo HK se proyecta sobre el Ecuador, visto desde V , en H' , de modo que tomando en el caneavá un radio $O'h = OH'$, podrá trazarse en hk la proyección estereográfica del paralelo HK .

Pero también cualquier paralelo puede obtenerse sobre el caneavá de figura 126 sin el auxilio de la figura 125, en la forma siguiente:

Sea φ la latitud del paralelo a trazarse. Llevemos desde O' el radio $O'R$ perpendicular al diámetro ee' , y desde e' el arco $e'L = \varphi$. Uniendo L con R , este alineamiento cortará a ee' en el punto k y el segmento $O'k$ será el radio con el cual trazamos el paralelo hk correspondiente a la latitud φ pedida.

2º PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA SOBRE UN MERIDIANO. — Supongamos siempre que el meridiano sobre el cual se proyecta sea el meridiano de origen.

Para obtener el caneavá, se comienza por trazar dicho meridiano en $PEPE'$ donde la recta EE' será la traza del ecuador celeste, y su perpendicular PP' dará la posición de los polos de la Tierra en P y P' . Para trazar el semimeridiano correspondiente a la longitud λ de la Tierra, tracemos por P las semirectas PM y PN formando entre sí el ángulo λ , y tal que la primera sea normal a PP' (fig. 127). A continuación, llevamos desde P la perpendicular a la PN , la cual intercepta a la traza EE' del Ecuador en un punto C . Con centro en

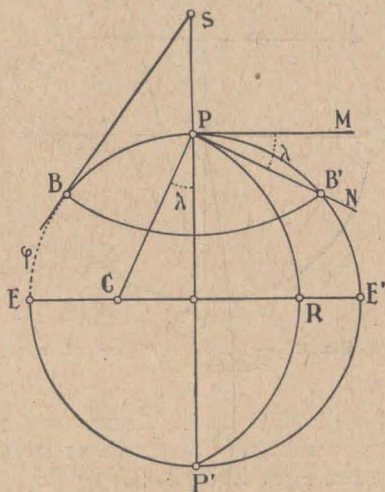


Fig. 127. — Proyección estereográfica sobre un meridiano.

este punto, y radio CP se traza el arco de circunferencia PRP' que será la proyección estereográfica del semimeridiano de longitud λ . Repitiendo este proceso se trazan todos los que se desean en el caneavá. Para abreviar el trazado del semimeridiano, puede tomarse directamente en P el ángulo $P'PC = \lambda$, con lo cual se obtiene el punto C .

Para el trazado del paralelo de latitud φ , llevamos esta magnitud angular a partir del Ecuador en EB . Trazamos en seguida por B , la tangente al círculo $PEPE'$, la cual corta a la prolongación de PP' en el punto S , desde el cual con radio SB se traza el arco de circunferencia BB' que será la proyección estereográfica sobre el meridiano, del paralelo correspondiente a la latitud φ .

165. PROPIEDADES DE LA PROYECCION ESTEREOGRAFICA. — A este sistema de proyección corresponden todas las propiedades que se estudian en la inversión (ver geom.), destacándose en particular las tres siguientes:

19 *Los ángulos permanecen inalterables.* Esta propiedad es consecuencia de la conocida proposición relativa al ángulo formado en un punto por dos curvas, el cual es igual al que comprenden las tangentes a las mismas trazadas por el punto común.

20 *La proyección estereográfica de un elemento de superficie, es semejante a la figura de dicho elemento, pero su escala es variable con la distancia al centro de la carta.* Por lo tanto, una figura esférica muy pequeña puede ser considerada como plana.

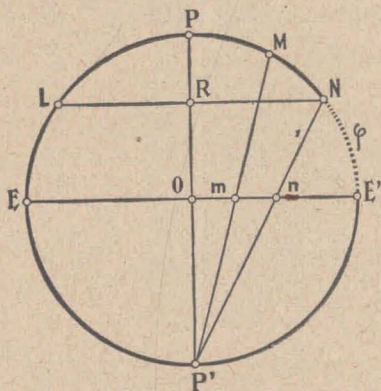


Fig. 128. — Escala en la proyección estereográfica.

Supongamos que se está proyectando el hemisferio sur de la Tierra EPE' sobre el plano del Ecuador EE' con punto de vista en el Polo Norte P' , y se quiere calcular la escala del mapa en una cualquiera de sus regiones (fig. 128).

Tomemos en la latitud φ del hemisferio a proyectarse, una figura muy pequeña MN cuya proyección sobre el Ecuador es mn , semejante a aquélla. Podremos escribir con mucha aproximación: [1]

$$\frac{mn}{MN} = \frac{P'n}{P'N} = \frac{P'O}{P'R} = \frac{P'O}{P'O + OR},$$

y tomando como unidad de medida al radio $P'O$ de la Tierra (en la escala del diseño), y teniendo en cuenta además que en tal supuesto el segmento OR es el seno de la latitud φ , la fórmula [1] dará:

$$\frac{mn}{MN} = \frac{1}{1 + \text{sen. } \varphi}, \quad [2]$$

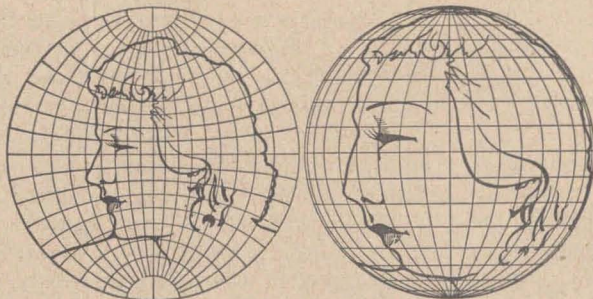


Fig. 129. — Deformación de las figuras en distintos sistemas de proyección.

fórmula que nos dice que la escala en una pequeña región del mapa sólo depende de la latitud φ de la misma, o lo que es igual, que para una misma latitud la escala es invariable.

Por la fórmula [2] se obtiene $\frac{1}{2}$ como valor de la escala en el centro de la carta, pero este valor crece desde el centro a la periferia donde alcanza el valor 1.

De lo que se acaba de exponer, deducimos que las deformaciones producidas por la proyección estereográfica son considerablemente menores que las provocadas por el sistema de proyección ortográfico visto anteriormente, presentando además notables ventajas en cuanto a la conservación de los ángulos e imágenes de las figuras obtenidas, las cuales son de notable parecido a las reales.

En la figura 129 se ha dibujado una cara sobre un caneavá correspondiente a la proyección estereográfica y luego se ha llevado punto por punto al caneavá de una proyección ortográfica. A simple vista se ve la deformación que experimenta la figura. Estas deformaciones tienen lugar en cualquier sistema de proyección.

LIBRO CUARTO

LA LUNA (C)

CAPITULO PRIMERO

MOVIMIENTOS DE LA LUNA

166. GENERALIDADES. — El cuerpo celeste más próximo a la Tierra es la Luna, cuyo movimiento permitió a Newton verificar su ley de Gravitación Universal. Su aspecto cambiante en el Cielo ha llamado la atención del hombre de todas las épocas, habiendo sido utilizados esos cambios, por diversas civilizaciones, para el cómputo del tiempo.

Se han atribuído a nuestro satélite las más diversas influencias sobre la Tierra, y aun en nuestros días el vulgo cree, sin que ningún hecho científico lo corrobore, en extraños efectos sobre la vida orgánica de nuestro planeta. Su atracción sobre las masas oceánicas produce el fenómeno de las mareas que se estudia en su lugar.

167. MOVIMIENTO DE LA LUNA CON RESPECTO AL SOL: MES LUNAR. — Observando durante un cierto número de días las posiciones relativas de la Luna y el Sol sobre la esfera celeste, nos percatamos de un rápido desplazamiento del satélite con relación al astro del día. Si para esas observaciones, desde una *localidad cercana al Ecuador*, tomamos como punto de partida un día en que Sol y Luna se ponen juntos a Occidente (novilunio) notaremos que siete días después, en el momento de ponerse el Sol, la Luna culmina en el semimeridiano del lugar, y que hacia los quince días de la primera observación, la Luna sale cuando el Sol se pone. Después de $29 \frac{1}{2}$ días de la observación inicial, los dos astros vuelven a ponerse juntos en el horizonte del Oeste *.

Estas observaciones, indican que la Luna se desplace con respecto al Sol sobre la esfera celeste en sentido directo a razón de algo más de 12° diarios, es decir, que si en cierta fecha Luna y Sol pasan juntos por un mismo semimeridiano, al día siguiente la Luna volverá a culminar en dicho semimeridiano unos 50 minutos después del Sol.

Se llama *mes lunar* o *lunación*, al lapso que transcurre entre dos coincidencias consecutivas de los semicírculos horarios de los centros del Sol y de la Luna.

Su duración *media* es de 29d12h44m3s, o bien 29d,530589 (solares medios).

* En general, para cualquier latitud, se puede controlar el desplazamiento observando que cada siete días, aproximadamente, el paso del satélite por el semimeridiano del lugar se retarda en unas seis horas con respecto al paso del Sol por el mismo.

168. MOVIMIENTO DE LA LUNA ENTRE LAS ESTRELLAS.

— El satélite se desplaza entre las estrellas con una velocidad angular algo mayor que la que acaba de verse con respecto al Sol, debido a que este astro, en su movimiento aparente anual (76), recorre las constelaciones del zodiaco también en el sentido directo, con una velocidad angular de casi 1° por día.

El movimiento de la Luna entre las estrellas, puede apreciarse al cabo de algunas horas de observación. Si cierta noche, la Luna y una estrella culminan juntas en un semimeridiano, a la noche siguiente, al pasar la estrella por el mismo, la Luna aparecerá desplazada hacia el Oriente en unos 13° , por lo cual culminará casi 55 minutos después de haberlo hecho la estrella. En las noches sucesivas la Luna se irá corriendo con respecto a la estrella cada vez más hacia el Oriente, dando una vuelta completa a la esfera celeste en 27d7h43m11s,5, después de cuyo tiempo volverá a culminar junto con la estrella en otro semimeridiano.

Considerando a las estrellas como puntos fijos de la esfera celeste, resultará que en el espacio de tiempo apuntado, la Luna habrá cerrado con movimiento propio una órbita en el espacio.

169. ELONGACION: SICIGIAS Y CUADRATURAS. — Se llama *elongación* de un astro con respecto a otro, a la diferencia λ entre las longitudes astrales (83) λ_1 y λ_2 de dichos astros.

La elongación de la Luna con respecto al Sol, toma todos los valores comprendidos entre 0° y 360° (fig. 130), dadas las posi-

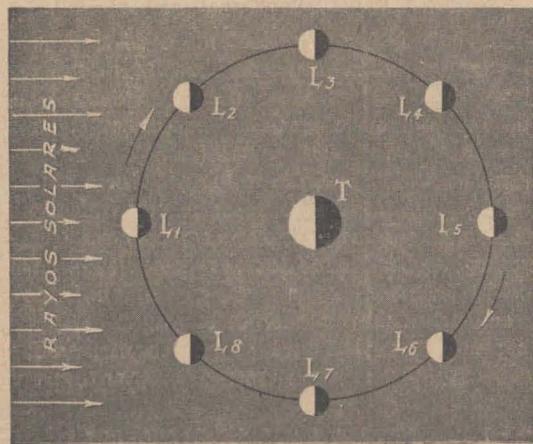


Fig. 130. — Posiciones relativas de la Luna con respecto al Sol y a la Tierra. (S. D.).

ciones relativas que ambos astros pueden ocupar con relación a la Tierra. En la figura se han considerado ocho posiciones de la Luna sobre su órbita y se han representado a los rayos solares, incidiendo paralelamente sobre el satélite en razón de la gran distancia que lo separa del Sol. Las flechas situadas sobre la órbita indican el sentido directo del movimiento.

En la posición L_1 de la Luna, las longitudes astrales λ_1 y λ_2 del Sol y del satélite son iguales, de modo que la elongación λ será:

$$\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = 0^\circ.$$

En este caso se dice que Luna y Sol están en *conjunción*, y si damos frente a uno de los astros enfrentaremos también al otro. En el instante de la conjunción los centros de ambos astros se ubican sobre el mismo semicírculo de longitud (81) de la esfera celeste.

En la posición L_5 de la Luna, diametralmente opuesta a la anterior, la diferencia entre las longitudes del Sol y del satélite es de 180° , y se dice que están en *oposición*. En este caso, si uno de los astros está a nuestro frente, el otro estará a nuestra espalda.

Generalizando, dos astros están en oposición, cuando se verifica:

$$\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = \pm 180^\circ.$$

A las posiciones ya vistas de la Luna y del Sol, es decir, a la conjunción y a la oposición, se las conoce bajo la designación común de *sicigias*.

Dos astros están en *cuadratura* cuando la elongación es de 90° ó 270° , o sea, cuando sus longitudes astrales difieren en dichas magnitudes. En la figura, la Luna está en cuadratura en las posiciones L_3 y L_7 , en las que se verifica:

$$\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = \pm 90^\circ, \text{ o bien: } \lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = \pm 270^\circ.$$

Por fin, las posiciones L_2 , L_4 , L_6 , y L_8 de la Luna sobre su órbita, llevan el nombre de *octantes*. Las elongaciones correspondientes a los octantes pueden ser:

$$\pm 45^\circ \quad ; \quad \pm 135^\circ \quad ; \quad \pm 225^\circ \quad \text{y} \quad \pm 315^\circ.$$

170. FORMA DEL DISCO LUNAR. DIAMETRO APARENTE.

— En las fechas en que puede observarse iluminado todo el disco del satélite, se comprueba que el mismo es perfectamente circular, dado que la magnitud angular de cualquiera de sus diámetros es invariable, según lo comprueban las mediciones.

El valor del diámetro aparente medio del satélite es de $31'4''$, casi igual al del Sol, experimentando variaciones periódicas que lo hacen oscilar entre un máximo de $33'$ (en el perigeo de la órbita) y un mínimo de $29'$ (en el apogeo) lo que comprueba que la distancia Luna - Tierra no permanece constante.

TRASLACION

171. PLANO DE LA ORBITA LUNAR; INCLINACION; NODOS.

— El desplazamiento de la Luna con respecto a las estrellas, en el sentido directo de Occidente a Oriente, pone de manifiesto un movimiento traslatorio de la Luna alrededor de la Tierra, en igual sentido, que se cumple en $27\text{d}7\text{h}43\text{m}4\text{s},7$, o sea, en el tiempo que emplea el satélite entre dos conjunciones consecutivas con una misma estrella.

El camino recorrido por la Luna sobre la esfera celeste en dicho lapso, puede determinarse en función de las coordenadas ecuatoriales absolutas del centro del satélite, ascensión recta y declinación. Se miden dichas coordenadas lunares una serie de días consecutivos en los instantes en que el centro del satélite culmina en el semimeridiano del lugar, y de los valores obtenidos se deducen los de sus coordenadas eclípticas (83), o sean, los de la longitud y latitud astral. Si se llevan estos valores sobre una esfera material que represente a la esfera celeste, y se unen con un trazo continuo los puntos resultantes como sucesivas posiciones de la Luna con respecto a un círculo

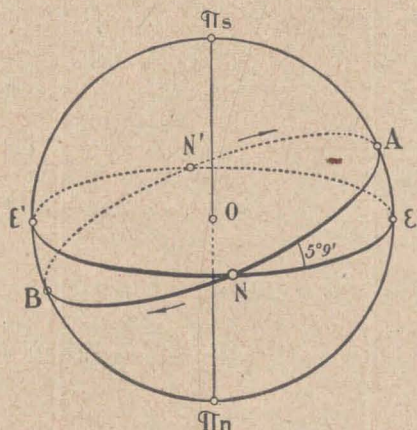


Fig. 131. — Inclinación de la órbita lunar. Nodos.

máximo que representa a la eclíptica, se tendrá sobre dicha esfera material una imagen de la trayectoria de la Luna sobre la esfera celeste. En la figura 131, el círculo máximo $\epsilon\epsilon'$ representa la eclíptica y $\pi_s \pi_n$ al eje de la misma cuyos extremos son los polos eclípticos.

Se obtiene por el proceso descrito, como trayectoria de la Luna sobre la esfera celeste, un círculo máximo $ANBN'$ que es recorrido por el satélite en el sentido directo de las flechas en unos $27d \frac{1}{4}$ (el valor real se dió más arriba) y que está inclinado con respecto al plano

de la eclíptica en un ángulo de $5^{\circ}9'$ en valor medio (más exacto $5^{\circ}8'43''$).

Dado el pequeño valor de esta inclinación, se explica porque noche tras noche vemos a la Luna desplazarse entre las estrellas zodiacales.

La traza del plano de la órbita lunar sobre el de la eclíptica, se llama línea de los *nodos*. Uno de los nodos, en la figura el N , se designa con el nombre de *nodo ascendente* (Ω), y el otro N' es el *nodo descendente* (ϖ). En el primero la Luna atraviesa a la eclíptica marchando de Sur a Norte, y en el segundo en sentido inverso. Los nodos son a la Luna, lo que los equinoccios son a la Tierra, y se determinan sobre la trayectoria lunar en forma análoga a la ya vista para la determinación del equinoccio vernal (77) buscando la ubicación del centro lunar en el instante en que su latitud astral es nula.

172. FORMA REAL DE LA ORBITA LUNAR: PERIGEO Y APOGEO; EXCENTRICIDAD. — La forma verdadera de la órbita que describe la Luna alrededor de la Tierra, puede determinarse por

el procedimiento visto en la obtención de la órbita aparente del Sol en el párrafo 90. En la figura 132, T es la posición de la Tierra y $L_1, L_2, L_3, \dots$ posiciones de la Luna sobre su órbita; las direcciones $TL_1, TL_2, TL_3, \dots$ han sido determinadas tomando las coordenadas del centro del satélite en sus culminaciones en el semimeridiano del lugar, y las magnitudes de los vectores $TL_1, TL_2, TL_3, \dots$ se han tomado en cierta escala, inversamente proporcionales a los diámetros aparentes de la Luna en las fechas de determinación. Obtenida la serie de puntos $L_1, L_2, L_3, \dots$ de la órbita, ésta puede trazarse con toda aproximación, comprobándose que: *

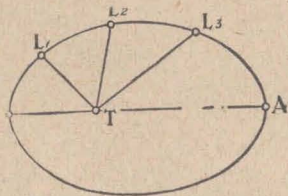


Fig. 132. — Forma real de la órbita de la Luna. (S. D.).

1º La órbita lunar es una elipse donde la Tierra ocupa un foco.

2º La Luna recorre dicha elipse, en el sentido directo, siguiendo (aproximadamente) la ley de las áreas, verificándose en todo punto del recorrido (94):

$$d^2\omega = \text{constante},$$

donde d es la distancia Luna - Tierra y ω la velocidad angular del satélite.

El eje mayor de la órbita PA , es la línea de los ápsides, correspondiendo el perigeo P a la mínima distancia Luna - Tierra, y el apogeo A , a la máxima. En cuanto a la excentricidad de la órbita, se calcula de manera en un todo igual a la ya vista para la excentricidad de la órbita del Sol (en realidad de la Tierra) en el párrafo 92. El valor que se obtiene, $\frac{1}{18}$ en término medio, está sujeto

a sensibles variaciones producidas por la atracción solar sobre el satélite, y es en mucho superior al de la excentricidad de la órbita

terrestre, que sólo alcanza $\frac{1}{60}$. En consecuencia, la órbita lunar

resulta una elipse algo alargada comparada con la órbita de la Tierra.

173. PRECESION Y NUTACION DE LA LUNA. — La atracción solar sobre la Luna origina toda una serie de perturbaciones y variantes en sus movimientos reales, mereciendo ser considerados en primer lugar, los cambios de posición del plano de la órbita lunar con respecto al plano de la eclíptica. Estos cambios se traducen en dos movimientos del eje normal al plano de la órbita: 1º, un movimiento de precesión lunar; 2º, un movimiento de nutación lunar.

1º PRECESIÓN. — En un período de 18 años y 8 meses, es decir, el mismo de la nutación terrestre (103) el eje RR' normal a la órbita AB de la Luna (fig. 133), describe alrededor del eje eclíptico $\pi_s\pi_n$

* En realidad, no hace falta hacer el gráfico, pues la órbita se determina con toda precisión por el cálculo.

una superficie cónica de revolución a dos hojas ORR , y $OR'R'$, cuyo ángulo al vértice es de $10^{\circ}18'$, o sea, el duplo de la oblicuidad del plano orbital AB de la Luna sobre la eclíptica $\varepsilon\varepsilon'$. Este movimiento que se verifica en el sentido retrógrado, da lugar a una rotación de la línea de los nodos NN' (172) en el plano de la eclíptica alrededor del punto O , de modo tal que en el lapso

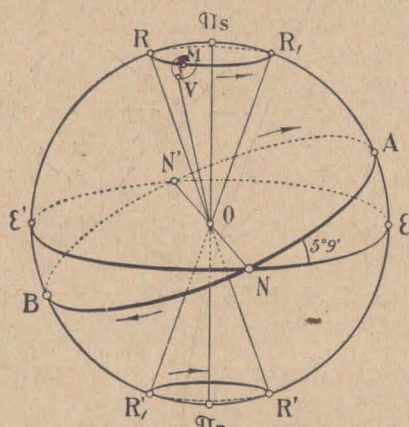


Fig. 133. — Precesión y nutación de la órbita de la Luna.

La nutación de la Luna, hace oscilar la oblicuidad de dicha órbita con respecto a la eclíptica, que como ya se dijo tiene un valor medio de $5^{\circ}9'$, en $9'$ a uno y otro lado de dicho valor, de modo que esa oblicuidad, por cada período de 173 días pasa por un máximo de $5^{\circ}18'$ y un mínimo de 5° , lo que pone de manifiesto entre los planos orbitales de la Luna y de la Tierra un leve balanceo que aumenta y disminuye alternativamente el ángulo que comprenden.

174. REVOLUCION SIDERAL Y REVOLUCION SINODICA. — La revolución de la Luna alrededor de la Tierra puede medirse tomando como astro de referencia a una estrella cualquiera de la esfera celeste, o bien al Sol considerándolo como astro fijo. En el primer caso obtenemos la *revolución sideral* del satélite, y en el último, la llamada *revolución sinódica*, o período de las fases.

La revolución sinódica es, en término medio, 2d5h superior en duración a la revolución sideral. La figura 134 permite explicar esta diferencia.

Sean AB un arco de la órbita anual de la Tierra y T , L y e , las posiciones de la Tierra, la Luna y una estrella, respectivamente,

de modo tal que en el lapso apuntado, cada nodo recorre toda la eclíptica en aquel sentido.

En consecuencia, cualquiera de los nodos retrograda sobre la eclíptica a razón de $3'10''$ por día, o lo que es lo mismo en $1^{\circ}26'$ por cada mes lunar. La longitud astral de dichos nodos, experimenta las mismas variantes en iguales períodos de tiempo.

2º NUTACIÓN. — La posición M que toma cada polo de la órbita de la Luna en virtud de la precesión lunar, se llama *posición media*. La nutación lunar, da lugar a un desplazamiento de la posición verdadera V del polo orbital alrededor de su posición media, describiendo cada 173 días una circunferencia cuyo radio tiene una amplitud de $9'$.

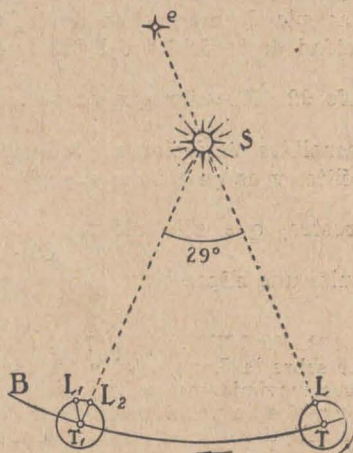


Fig. 134. — Revolución sideral y revolución sinódica de la Luna. (S. D.).

en un instante dado. En tal instante, la Luna está en conjunción con el Sol y con la estrella, iniciando su revolución sinódica con respecto al primero y la sideral con relación a la estrella. Cuando al cabo de 27d7h43m, la Luna moviéndose sobre su órbita en el sentido directo, llega a ocupar la posición L_1 , tal que su radio vector L_1T_1 se disponga paralelamente a su posición inicial LT , el satélite habrá cumplido su revolución sideral por encontrarse de nuevo en conjunción con la estrella e . Pero, durante ese tiempo, la Tierra sobre su órbita anual ha recorrido un arco de unos 27° (aproximadamente 1° por día) y el satélite para volver a estar en conjunción con el Sol, tendrá que recorrer aún sobre su órbita, un arco de unos 29° , integrado por los 27° mencionados, más unos 2° que se adelanta la Tierra interin la Luna hace ese recorrido. Para recorrer esos 29° (a razón de 13° por día) y cumplir la revolución sinódica ubicándose en L_2 , emplea el satélite, como es fácil calcularlo, unos 2d5h, que es precisamente la diferencia de tiempo entre ambas revoluciones.

La diferencia entre las duraciones de la revolución sinódica y sideral, sólo debe considerarse como un término medio, desde que la primera experimenta considerables variaciones de lunación a lunación, que dependen, como es fácil comprenderlo, de las variaciones del arco TT_1 y del tiempo en recorrer el arco de *elipse* L_1L_2 en virtud de la ley de las áreas. El tiempo t asignado a la duración de la revolución sinódica de la Luna, no es más que la media aritmética de un número grande de meses lunares.

*** 175. FORMA APROXIMADA DE LA TRAYECTORIA LUNAR CON RELACION AL SOL.** — Para formar la imagen de la

curva real que describe la Luna año tras año con relación al Sol, debemos combinar su movimiento traslatorio con respecto a la Tierra, con el de traslación de ésta alrededor del Sol, obteniéndose con ello una trayectoria sinuosa, no cerrada, de la cual sólo da una idea la que se ve en la figura, supuesta proyectada sobre el plano de la eclíptica.

Dicha trayectoria no puede ser plana, por estar el plano de la órbita lunar inclinado sobre el de la eclíptica en un ángulo de $5^\circ 9'$ siendo en consecuencia una curva gausa cuya característica esencial es la de ser siempre cóncava con respecto al Sol, por más que en la proyección de la figura 135 pareciera presentar alternativamente trechos cóncavos y trechos convexos. La

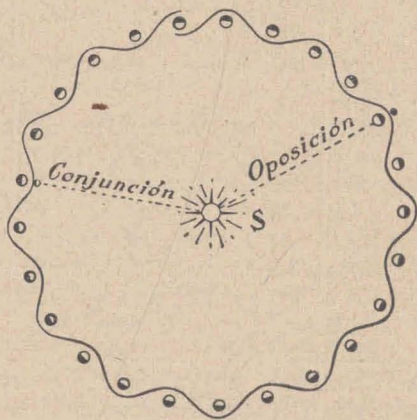


Fig. 135. — Forma de la trayectoria lunar con respecto al Sol.

característica apuntada la alcanzamos a interpretar, cuando imaginamos a la Luna describiendo una amplia órbita anual alrededor del Sol, órbita ésta que se verá afectada por la acción de la Tierra, comportándose en tal supuesto, como astro perturbador del movimiento.

La figura sólo es groseramente aproximada, apareciendo enormemente deformados los lazos de la curva por no poderse aplicar en ella una cierta escala, ya que la distancia Luna-Tierra es 400 veces menor (aproximadamente) que la que separa a ambos astros del Sol.

ROTACION DE LA LUNA

176. ROTACION. — Si se observa a ojo desnudo el disco de la Luna, podrán apreciarse sobre el mismo una serie de manchas grisáceas más o menos oscuras, invariables en forma y posición, lo

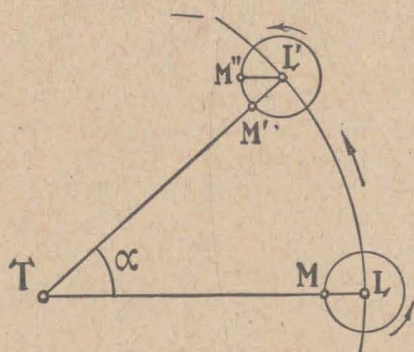


Fig. 136. — Rotación de la Luna. (N. D.).

que comprueba que el satélite es un cuerpo sólido de superficie notablemente accidentada, como se la puede apreciar al ser enfocada aún por un ante-ojo de modesto alcance.

Por la posición invariable de las manchas con respecto al centro del disco, y por ser dichas manchas constantemente las mismas, nos damos cuenta que el satélite muestra a la Tierra siempre el mismo hemisferio, y que en consecuencia, está animado de una rotación

que se cumple exactamente en el tiempo empleado en su revolución sideral, es decir, en 27d7h43m11s,5. En efecto: sea M una mancha vista desde la Tierra en el centro del disco lunar, y LM el radio de la Luna que pasa por la mancha. Cuando el centro de la Luna, en virtud de su traslación alrededor de la Tierra, toma la posición L' (figura 136), es decir, cuando el satélite se ha desplazado sobre su órbita, que suponemos circular, en la magnitud angular α , el radio LM , en el caso de no existir un movimiento de rotación lunar, debiera tomar la posición $L'M''$ paralela a la inicial, con lo cual la mancha central dejaría de serlo, puesto que se la vería en M'' . En realidad, la observación nos muestra que en la posición L' del satélite, la mancha sigue apareciendo en el centro del disco en M' , lo que equivale decir que la Luna en el tiempo que ha efectuado la traslación α , ha rotado en un ángulo $M'L'M''$, igual en magnitud al α , por ser ambos alternos internos entre las paralelas TL y $L'M'$.

Las consideraciones que anteceden nos llevan a admitir la existencia de un *movimiento uniforme de rotación* en la Luna, con una

velocidad angular igual a la velocidad media de traslación alrededor de la Tierra.

El eje de rotación de la Luna está inclinado sobre el plano de su órbita en un ángulo de unos 83° , siendo casi perpendicular al plano de la eclíptica con el que forma un ángulo de 88° (aproximadamente).

177. LIBRACIONES. — Son movimientos aparentes de la Luna, consistentes en oscilaciones o balanceos que hacen variar en algo la región o faz del astro que mira hacia la Tierra. Como se verá a continuación, las libraciones no son más que efectos de perspectiva.

1ª LIBRACIÓN EN LONGITUD. — Se dijo ya al tratar de la rotación del satélite, que la velocidad angular de este movimiento es invariable, mientras que la de traslación está regida por la ley de las áreas, siendo durante algún tiempo superior, y durante otro inferior a aquélla. De esta discrepancia entre ambas velocidades, en movimientos de igual período, se origina un balanceo en el sentido de la longitud que permite al satélite mostrar alternativamente a Oriente y a Occidente dos husos esféricos de unos 8° de amplitud.

En la figura 137 se ha trazado la órbita lunar, y se ha tomado a la Luna en cuatro posiciones sobre la misma.

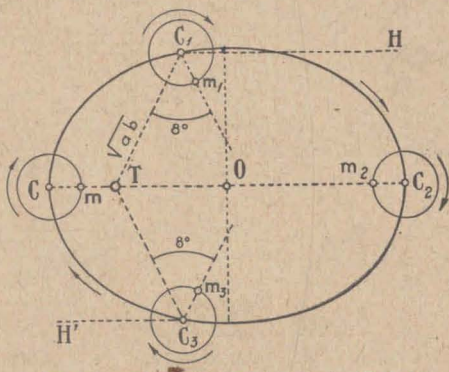


Fig. 137. — Libración en longitud. (S. D.).

está en el perigeo C , la mancha m se ve desde la Tierra T en el centro del disco. Al pasar el centro lunar por C_1 , si la Luna no rotara, la mancha se encontraría sobre la semirrecta C_1H paralela a CT . Admitamos que el eje de rotación sea normal al plano de la órbita (casi lo es), y que sus trazas en el dibujo sean C, C_1, C_2 , etc. El tiempo que invierte la Luna en el recorrido CC_1 es menor que el que emplea en el trayecto C_1C_2 por ser área CTC_1 menor que área C_1TC_2 . El ángulo HC_1m_1 que habrá rotado la Luna, ínterin se trasladó de la posición C a la C_1 será menor de 90° , pues el tiempo empleado en ese recorrido CC_1 es inferior a la cuarta parte del período de revolución sideral. La mancha m_1 se verá, en consecuencia, no ya proyectada sobre el centro del disco sino desplazada hacia la derecha (para nosotros el Oriente), en un ángulo TC_1m_1 de unos 8° . En el recorrido C_1C_2 vemos a la mancha retornar hacia el centro del disco, coincidiendo nuevamente con él en el apogeo C_2 . Al pasar por C_3 la mancha se proyecta a la izquierda (Occidente) del centro

del disco. En consecuencia, todo pasa como si la Luna se balanceara en longitud con una amplitud de 8° en uno y otro sentido.

La elongación máxima de este balanceo, o sea, 8° , se alcanza en las posiciones C_1 y C_3 porque en ellas la velocidad angular de traslación adquiere su valor medio, igual a la velocidad angular de rotación, por haberse tomado

$C_1T = \sqrt{ab}$, siendo a y b los semiejes de la órbita.

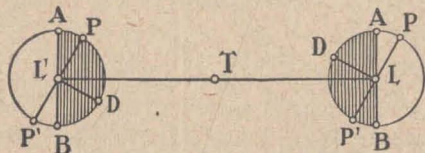


Fig. 138. — Libración en latitud.

2º LIBRACIÓN EN LATITUD.

— Consiste en un balanceo, o cabeceo normal a la dirección de la libración en longitud. Por este cabeceo, originado por la inclinación del eje de

rotación de la Luna con respecto al plano de su órbita, van apareciendo y desapareciendo sucesivamente regiones del satélite situadas en las inmediaciones de sus polos de rotación. La amplitud máxima de esta libración no alcanza a 7° .

La figura 138, muestra dos posiciones diametralmente opuestas de la Luna sobre su órbita. Cuando el centro de la Luna está en L , el polo P es invisible desde la Tierra T , pues está fuera del hemisferio ADB , rayado en la figura, que cae bajo el campo visual. Al llegar a ubicarse en L' el centro lunar, será P' el polo invisible del satélite, pudiéndose además apreciar, que el huso $AL'P$, invisible en la posición anterior, se ha hecho visible en ésta, pasando lo contrario con el huso $BL'P'$.

3º LIBRACIÓN DIURNA. — Es causada por el cambio de posición que experimenta el observador terrestre originado por la rotación diurna del planeta. Sea ACA' el paralelo que recorre el observador en virtud de la rotación diaria de la Tierra. Para la posición A del observador (fig. 139) la mancha M aparece en el centro del disco lunar, pero al ser transportado a A' por el movimiento diurno, la mancha M deja de ser central, siéndolo en cambio la M' . Si el observador estuviera colocado en el centro T de la Tierra, no habría para él libración diurna.

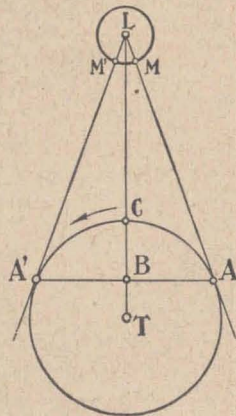


Fig. 139. — Libración diurna. (N. D.).

Esta libración, la menos importante de las vistas, sólo tiene una amplitud de 1° que es aproximadamente el valor de la paralaje lunar.

Debido a las tres libraciones que acaban de verse, se pueden observar los $\frac{3}{5}$ de la superficie de la Luna, permaneciendo eternamente ocultos los $\frac{2}{5}$ restantes.

CONSECUENCIAS DE LA TRASLACION DE LA LUNA

178. LAS FASES: PRELIMINARES. — Se denominan fases lunares, a los distintos aspectos que nos ofrece el satélite según la porción iluminada más o menos grande que presenta frente a la Tierra. Las fases se deben al movimiento traslatorio de la Luna con respecto a la Tierra, dependiendo de las distintas posiciones que va tomando sobre su órbita. Entre esas posiciones, deben destacarse la *conjunción* y la *oposición* (sicigias), las *cuadraturas* y los *octantes* (169).

179. EXPLICACION DE LAS FASES. PERIODICIDAD. — La duración media del mes lunar, o revolución sinódica de la Luna, es aproximadamente 29,5 días.

En este tiempo, el satélite partiendo de la conjunción L_1 (fig. 140), vuelve a ella cumpliendo el ciclo de todas sus fases.

1º NOVILUNIO O NEOMENIA. — Se verifica esta fase, llamada también *luna nueva*, en el momento en que la elongación de la Luna con respecto al Sol es: $\lambda = 0^\circ$ (posición L_1 en la figura).

En esta posición, el satélite muestra a la Tierra su hemisferio no iluminado por el Sol, permaneciendo el astro invisible para el observador terrestre. La culminación del satélite en la fecha del novilunio, se lleva a cabo en el momento en que culmina el Sol.

Se llama *edad de la Luna* al tiempo transcurrido después del novilunio. En los días que siguen al de la luna nueva, el satélite muestra al observador terrestre una hoz iluminada de amplitud creciente con su edad, como puede verse en L'_2 al llegar la Luna al primer octante L_2 .

Hacia los siete días de su nacimiento, el satélite llega a su primer cuarto L_3 , culminando entonces hacia las 18h (locales).

2º PRIMER CUARTO O CUARTO CRECIENTE. — Se inicia cuando la elongación del satélite respecto al Sol es $\lambda = 90^\circ$ (posición L_3). En este momento, el huso iluminado del satélite visible desde la Tierra, tiene una amplitud de 90° , proyectándose según un semicírculo, como lo muestra el disco en L'_3 . Al iniciarse el cuarto creciente, la Luna culmina en el semimeridiano del lugar seis horas después de haberlo hecho el Sol.

En los días sucesivos sigue creciendo la amplitud del huso iluminado visible, por lo cual vemos a la Luna adoptando la forma de un lente biconvexo, como puede apreciarse en L'_4 , que es la figura que nos ofrece al llegar a su segundo octante L_4 hacia los once días de edad.

3º PLENILUNIO O LUNA LLENA. — Entre los catorce y quince días de edad, la Luna adquiere la elongación $\lambda = 180^\circ$ por haberse colocado en oposición con respecto al Sol en L_5 . En esa fecha, el

huso iluminado visible desde la Tierra se ha convertido en todo un hemisferio al coincidir las líneas de contorno aparente y de iluminación. Se verá desde la Tierra todo el disco iluminado L'_5 , y la Luna culmina superiormente cuando el Sol pasa por el semimeridiano opuesto al del lugar (24 horas, tiempo local).

En los días sucesivos al de la luna llena, vuelve a mostrarse el satélite bajo la forma de una lente biconvexa de amplitud decreciente, culminando con más de 12 horas y menos de 18 horas, después de haberlo hecho el Sol.

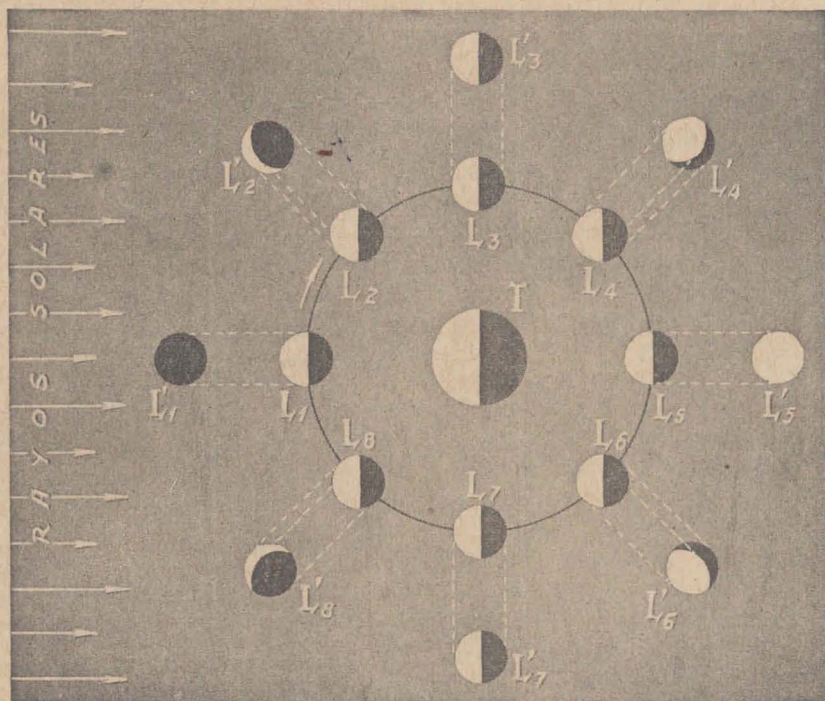


Fig. 140. — Fases lunares. (S. D.).

En el tercer octante L_6 , la Luna se muestra a la Tierra, según se ve en L'_6 , y hacia los 22 días de edad llega a la posición L_7 .

4º SEGUNDO CUARTO O CUARTO MENGUANTE. — Al llegar la Luna a L_7 , su elongación toma el valor $\lambda = 270^\circ$, y el huso iluminado visible desde la Tierra, es otra vez de 90° , como en el primer cuarto, por lo cual nuevamente apreciaremos iluminado la mitad del disco. En esa fecha la Luna culmina 6 horas antes que el Sol (a las 6h, tiempo local).

En los días sucesivos, vuelve la Luna a mostrar una hoz iluminada, cuyos cuernos ahora miran a Occidente. La figura muestra en

L_s el aspecto del satélite en su último octante, entre los 25 y 26 días de edad. La hoz iluminada decrece en amplitud hasta anularse al llegar la Luna de nuevo a L_1 , y ponerse otra vez en conjunción con el Sol para iniciar otra lunación con todas las características de la anterior.

* 180. **FASES TERRESTRES VISTAS DESDE LA LUNA. LUZ CENICIENTA.** — La misma figura 140 demuestra que durante los 29d,5 que dura el mes lunar o período completo de las fases, la Tierra ofrecerá a la Luna fases análogas, pero en sentido inverso, es decir, que habrá tierra nueva, cuarto creciente, cuarto menguante y tierra llena, en los momentos de la luna llena, cuarto menguante, cuarto creciente y luna nueva, respectivamente, por lo cual podrá decirse que las fases terrestres y las lunares son suplementarias, o lo que es lo mismo, se verá desde la Tierra un huso lunar iluminado de amplitud α , cuando desde la Luna se domine un huso terrestre iluminado de amplitud $180^\circ - \alpha$.

Resulta de las anteriores consideraciones, que la Tierra en el momento del novilunio, enfrentará al satélite todo un hemisferio iluminado por los rayos solares, el cual por reflexión iluminará al hemisferio visible del satélite (en tal momento no iluminado por el Sol), proporcionándole una tenue claridad. Esta débil iluminación que nos permite ver a la Luna en todo su disco, en los días próximos al del novilunio y que se debe a la luz del Sol dos veces reflejada, primero por la Tierra y después por el satélite, se conoce bajo el nombre de *luz cenicienta*.

Puede observarse perfectamente la luz cenicienta, hasta tres días después del novilunio.

181. **EL NUMERO DE ORO O CICLO DE METON.** — En el siglo V antes de nuestra era, descubrió METÓN, astrónomo griego, una relación entre la duración del año trópico considerado de $365d\frac{1}{4}$, y la duración media del mes lunar o revolución sinódica de la Luna.

Encontró Metón que: 19 años trópicos equivalen, aproximadamente, a 235 lunaciones, y a este ciclo se le asignó posteriormente su nombre.

De acuerdo a esto, las fases lunares se repiten en las mismas fechas cada 19 años, y en este período se cerraría la trayectoria descripta por la Luna con respecto al Sol (175).

* 182. **LAS MAREAS.** — El nivel de las aguas de los océanos está sujeto a variaciones cuyo semiperíodo es de 6h12m, durante el cual pasa de un máximo o *pleamar* a un mínimo o *bajamar*.

La antigüedad ya había concentrado su atención sobre este fenómeno del flujo y reflujo de las aguas atribuyéndolo a diversas causas; los árabes son los que por primera vez vislumbran la causa real de las mareas al relacionarlas con las acciones ejercidas por el Sol y la Luna, que al actuar sobre las aguas las llevan a ocupar mayor o menor altura

con respecto a su nivel medio. Los griegos, en cambio, no se preocuparon mayormente de las mareas, ya que en sus costas mediterráneas no alcanzaban grandes intensidades, pese a lo cual, STRABÓN las atribuyó a las acciones de la Luna. La teoría completa de las mareas fué ignorada por KEPLER y GALILEO, y recién NEWTON en 1667 dió indirectamente la explicación satisfactoria de las mismas, al enunciar su célebre ley gravitatoria. Aplicando la ley de Newton, LAGRANGE (1736-1813) y LAPLACE (1749-1847), desarrollan en forma integral aquella teoría, que con ligeras variantes es la que se conoce en nuestros días.

Las mareas son originadas por las atracciones de la Luna y el Sol, sobre las masas líquidas del planeta. La primera en razón de su corta distancia a la Tierra, ejerce una acción 2,5 veces mayor que la

del Sol, si se tiene en cuenta que la intensidad de las mareas es inversamente proporcional al cubo de la distancia que separa a la Tierra del astro que las ocasiona.

Supongamos para la fácil interpretación de las mareas, a la Tierra *T* (fig. 141), cubierta de una capa de agua de espesor uniforme, y admitamos además que la Luna situada en L_1 , sea la única causante del fenómeno.

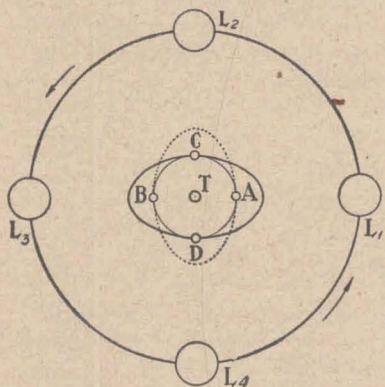


Fig. 141. — Las mareas. (S. D. La flecha indica el movimiento diurno de la Luna).

Las aguas en conjunto, bajo la acción del satélite, se dispondrán según un elipsoide de revolución cuyo eje mayor pasa por el centro de la Luna. La capa exterior líquida de este elipsoide, rotando alrededor del eje normal al paralelo celeste del satélite, dará una vuelta entera en 24h48m, o sea, en el tiempo que invierte el satélite entre dos culminaciones consecutivas en un mismo semimeridiano (día lunar). El fenómeno sigue su proceso como si una inmensa ola (*ola tidal*), se fuera desplazando en el sentido retrógrado ubicando su cresta en los meridianos terrestres en que va culminando el satélite instante tras instante. Al llegar el satélite a L_2 , cosa que ocurrirá 6h12m después de haber ocupado la posición L_1 , el elipsoide habrá rotado 90° alrededor del eje antes mencionado tomando la posición que se ha punteado en la figura. Habrá entonces marea alta en los puntos C y D, y baja en A y B.

En consecuencia: en un día lunar, o sea, en 24h48m, se verifican en un mismo lugar del planeta, dos mareas altas o pleamares, y dos mareas bajas o bajamares, espaciándose las unas de las otras en 6h12m.

Lo mismo que la Luna, el Sol produce mareas cuya intensidad, según se dijo, es menor que la de las mareas lunares. En las fechas del novilunio (conjunciones) y plenilunio (oposiciones) al sumarse los efectos de ambos astros sobre las aguas, se producen flujos y reflujos más intensos que los comunes, dando lugar a las llamadas *mareas vivas* o *mareas de sicigias*, ocurriendo lo contrario en los cuartos crecientes y menguantes de la Luna, en que las acciones del Sol y de la Luna, por ser normales, producen mareas menos intensas conocidas como *mareas muertas* o *mareas de cuadraturas*.

Considerando ahora las acciones conjuntas de Sol y Luna sobre las aguas, llegamos a la conclusión de que dos ondas tidales se propa-

gan en un día aproximadamente por la superficie oceánica en el sentido retrógrado, acompañando a los astros que las originan en sus movimientos diurnos, ondas que se superponen en las sicigias, para separarse y disponerse perpendicularmente entre sí en las cuadraturas.

Las llamadas *mareas extraordinarias*, son las mismas mareas de sicigias verificándose en las épocas en que Sol y Luna pasan por sus respectivos perigeos.

Estas mareas que suelen producirse en los primeros días de enero, alcanzan a elevar el nivel de las aguas en ciertos puntos del globo, como en la bahía de Fundy en la costa oriental de Estados Unidos, hasta más de 20 metros de altura sobre el nivel medio, dando lugar a fuertes y peligrosos oleajes.

Teóricamente, las mayores crecientes y bajantes de las aguas oceánicas debieran producirse en los puntos de la zona intertropical de la Tierra, donde el Sol y la Luna pueden culminar en los respectivos cenites a un mismo tiempo, en ciertas fechas del año.

CAPITULO SEGUNDO

MONOGRAFIA DE LA LUNA

183. PARALAJE LUNAR. — En los parágrafos 118 a 122, hemos estudiado la paralaje en general, y vimos cómo se determina dicha magnitud para astros cercanos a la Tierra, como lo es la Luna. Se encuentra de ese modo que el valor de P oscila entre un máximo de $1'1''$ que se obtiene al pasar el satélite por el perigeo de su órbita y un mínimo de $53''$ al ubicarse en el apogeo de la misma. Se admite como valor medio de la paralaje lunar:

$$P = 57'2'',7.$$

184. DISTANCIA DE LA LUNA A LA TIERRA. — Utilizando el valor de la paralaje media de la Luna, y procediendo en forma en un todo análoga a la ya vista en parágrafo 123, para obtener la distancia Sol-Tierra, encontramos que la distancia media Luna-Tierra es de 60.265 radios terrestres ecuatoriales (de 6376 km.), o lo que es lo mismo:

$$d = 384.400 \text{ km.}$$

A esta distancia, utilizando un aumento telescópico de 1.200, vemos al satélite en la forma que lo apreciaríamos a ojo desnudo si sólo distara 320 kilómetros de la Tierra.

La distancia mínima se obtiene al utilizar la paralaje máxima. En tal supuesto la Luna se coloca a 54 radios terrestres equivalentes a 344.300 km., y en igual forma, utilizando la paralaje mínima, obtenemos la distancia máxima Luna-Tierra que es de 64 radios terrestres, o bien 408.000 kilómetros aproximadamente.

185. — RADIO, SUPERFICIE Y VOLUMEN DE LA LUNA. — Si designamos por δ al diámetro aparente de la Luna (170) y por δ' al de la Tierra visto desde aquel astro (que es el doble de la paralaje horizontal del satélite) y llamamos además R y r a los radios lunar y terrestre, se tendrá aproximadamente:

$$\frac{R}{r} = \frac{\delta}{\delta'} = \frac{31'}{2 \times 57'2'',7} = 0,272 \approx \frac{3}{11},$$

de la cual obtenemos:

$$R = \frac{3}{11} r \approx 1.737 \text{ km.}$$

La relación entre las superficies S del satélite y s de la Tierra, considerados ambos astros de forma esférica, será:

$$\frac{S}{s} = \frac{R^2}{r^2},$$

de la que deducimos aproximadamente:

$$S = \frac{1}{13} s.$$

En cuanto a los volúmenes V de la Luna y v de la Tierra, están ligados por la relación:

$$\frac{V}{v} = \frac{R^3}{r^3},$$

que permite obtener con cierta aproximación:

$$V = \frac{1}{50} v$$

En consecuencia: *la superficie lunar es 13 veces menor que la de nuestro planeta y el volumen 50 veces más reducido que el de la Tierra.*

186. MASA, DENSIDAD Y PESANTEZ. — Llamando M a la masa del satélite, y m a la de la Tierra, se ha encontrado:

$$M = \frac{1}{81} m$$

En cuanto a la densidad de la Luna, se la puede calcular con respecto a la de la Tierra teniendo en cuenta sus masas y los respectivos volúmenes.

Resulta llamando D a la densidad lunar y d a la terrestre:

$$D = \frac{3}{5} d,$$

y como la densidad de la Tierra respecto al agua es (143) $d = 5,5$, la de la Luna con relación al agua será:

$$D = 5,5 \times \frac{3}{5} = 3,3.$$

Si designamos finalmente por G y g a las gravedades en las superficies de la Luna y de la Tierra, podremos establecer:

$$\frac{G}{g} = \frac{M}{R^2} : \frac{m}{r^2},$$

de la cual, reemplazando los valores ya conocidos de todo el 2º miembro se entresaca con aproximación:

$$G = \frac{1}{6} g,$$

o en otros términos: *la gravedad sobre la superficie de la Luna se manifiesta con una intensidad 6 veces menor que en la superficie de la Tierra.*

TOPOGRAFIA LUNAR

*** 187. ASPECTO DEL DISCO LUNAR.** — La observación cotidiana de la Luna, nos la muestra como un círculo más o menos perfecto en los momentos del plenilunio; como un semicírculo en sus cuadraturas; y otras veces adoptando la forma de una hoz, o de una lente biconvexa vista de canto, dependiendo dichas figuras de la edad del satélite en el período de la lunación.

Sea cualquiera la parte iluminada visible del satélite, podremos apreciar a simple vista, regiones oscuras, impropriamente llamadas "*mares*", alternando con otras de mayor brillo, con gradaciones diferentes de lugar a lugar.

Si enfocamos a la Luna con un anteojo de regular potencia, notaremos inmediatamente que las regiones oscuras, lejos de ser uniformes, están sembradas de gran número de formaciones circulares, y las brillantes las constituyen numerosas elevaciones o montañas escalonadas en forma de cordilleras, al par que gran cantidad de cráteres notables por la regularidad de sus formas. Dichas montañas, lo mismo que las paredes de los cráteres, proyectan sombras perfectamente visibles con anteojos de regular potencia, y cuyas longitudes dependen de la mayor o menor inclinación con que inciden los rayos solares sobre el suelo lunar en los momentos de observación. Midiendo la longitud de esas sombras es fácil calcular la altura de las montañas sobre el nivel del suelo lunar. Por otra parte, el borde de la Luna aparece ante el anteojo, presentando escotaduras debidas a las escabrosidades de la superficie. En particular, en las cercanías del polo austral dicho borde adquiere la figura de una línea dentellada.

HEVELIO y RICCIOLI clasifican a las formaciones lunares en cuatro grupos con características propias: *valles, cráteres, montañas y ranuras.*

*** 188. VALLES DE LA LUNA.** — Las manchas que divisamos noche tras noche sobre el disco lunar abarcando casi una mitad del mismo, corresponden a las regiones a bajo nivel del satélite, o valles, según la nomenclatura adoptada por HEVELIO y RICCIOLI. Dichos valles, en opinión de los nombrados selenógrafos, pueden dividirse en *maria* o *mares*, que abarcan grandes extensiones oscuras del satélite; *paludes* o *pantanos*, que cubren pequeñas superficies

más oscuras que las de los mares; *lacus* o *lagos*, parecidas a los mares, pero de menores dimensiones; y finalmente *sinus* o *bahías*, que aparecen ante el anteojo como superficies estrechas algo más claras que las de los mares, y que suelen comunicar a éstos entre sí.

Los mares de la Luna predominan en su hemisferio boreal (fig. 142). Los principales citados de Occidente a Oriente son:

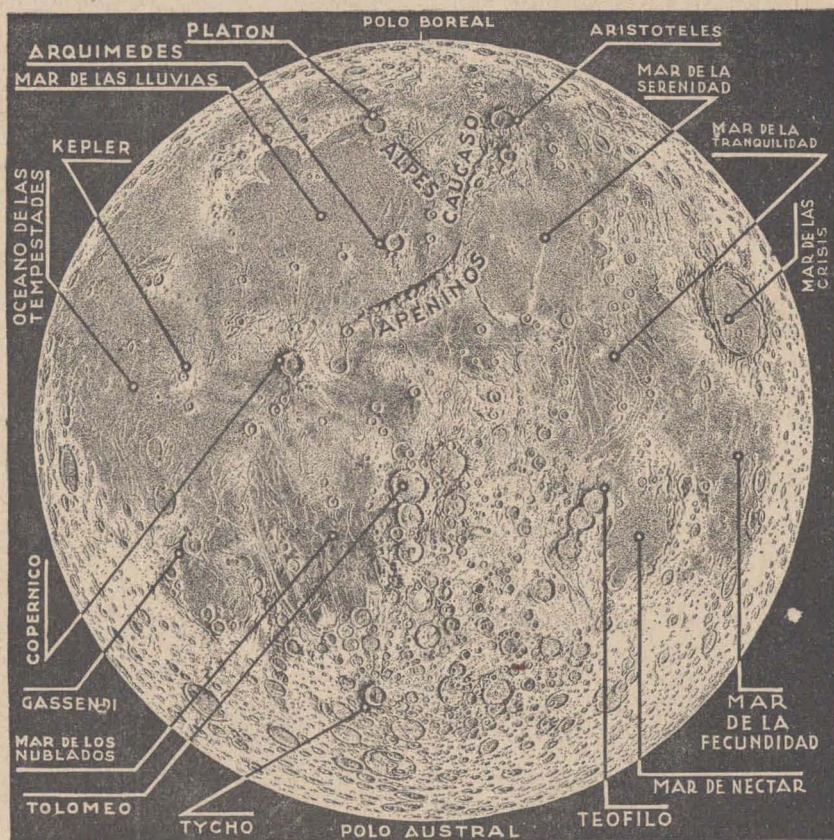


Fig. 142.— Mapa de la Luna. Observando la figura desde unos 30 cm. ofrece el aspecto con que se vería a la Luna con un anteojo de unos 40 diámetros de aumento.

Crisis (Crisis); *Foecunditatis* (Fecundidad); *Nectaris* (Néctar); *Tranquillitatis* (Tranquilidad); *Serenitatis* (Serenidad); *Vaporum* (Vapores); *Frigoris* (Frio); *Imbrium* (Lluvioso); *Nubium* (Nublado); *Humorum* (Humores) y *Océano Procellarum* (Océano Tempestuoso). De ellos, sólo los tres últimos y el *Nectaris* están ubicados en el hemisferio austral de la Luna. Los valles o llanuras más oscuras de la Luna, son los de *Riccioli* y *Grimaldi* cercanos al borde oriental, y el fondo de *Platón* situado al Norte.

Según los astrónomos LOEWY y PUISEUX, los mares y demás valles de la Luna, estarían formados por lavas que desbordando de las bocas volcánicas en el período eruptivo del satélite, inundaron las superficies a bajo nivel endureciéndose después por enfriamiento.

ZEHNDER y EBERT, atribuyen los desbordes de lava a fuertes mareas provocadas por la atracción terrestre sobre la masa flúida interior del satélite, cuando la rotación de éste era mucho más rápida que en la actualidad. Dichas mareas hacían que el magma flúido, atraído casi verticalmente, afluyera a la superficie desbordando por los boquetes originados en la corteza sólida aun débil del satélite. A cada flujo, las lavas rebalzando el nivel de las bocas de los volcanes, así formadas, irrumpían en los valles adyacentes, cubriéndolos de capas más o menos espesas. Este modo de ver, explicaría la regularidad de las suaves pendientes externas de los volcanes de la Luna.

* 189. **CRATERES LUNARES.** — Las formaciones más típicas de la Luna, son los cráteres, de los cuales han sido individualizados hasta la fecha alrededor de 35.000. Aparecen siempre como círculos cerrados por un reborde prominente de suave declive hacia el exterior, mientras en el interior suelen sucederse una serie de escalonamientos. La particularidad esencial de los cráteres lunares, consiste en la masa, o masas montañosas de forma cónica que se elevan desde su fondo (conos centrales) sin alcanzar nunca la altura de las paredes circundantes.

Los grandes cráteres, llamados *circos*, tienen diámetros enormes comparados a los de sus similares de la Tierra. En los *circos* de *Clavius* y *Maginus*, dichos diámetros sobrepasan los 200 kilómetros, pero en la mayoría oscilan entre los 40 y los 100 kilómetros.

Aparte de los que venimos de nombrar, pueden citarse entre los *circos* más notables, los de *Copérnico* y *Posidonio* en el hemisferio boreal, y los de *Tycho* y *Teófilo* en el hemisferio opuesto (figuras 142 y 143).

* 190. **MONTAÑAS LUNARES.** — Las montañas de la Luna tienen en su configuración un notable parecido con las de nuestro planeta, siendo en proporción, atendiendo a los radios de ambos astros, mucho más altas, puesto que el monte *Leibnitz* que se eleva a 8.200 metros sobre el suelo circundante, representa $\frac{1}{200}$ de la longitud del radio de la Luna, mientras que el *Everest* (8.890 m.) no alcanza a representar $\frac{1}{700}$ de la longitud del radio de la Tierra.

Las montañas lunares al igual que las de nuestro planeta, se escalonan formando cordilleras a las cuales se les han asignado denominaciones análogas a las de la Tierra, encontrándose en el

hemisferio boreal los *Alpes lunares*, los *Apeninos* y el *Cáucaso* (figura 142), entre otras de menor importancia. En las dos cordilleras últimamente nombradas existen numerosos picachos que se elevan a más de 6.000 metros, pero las mayores alturas se registran

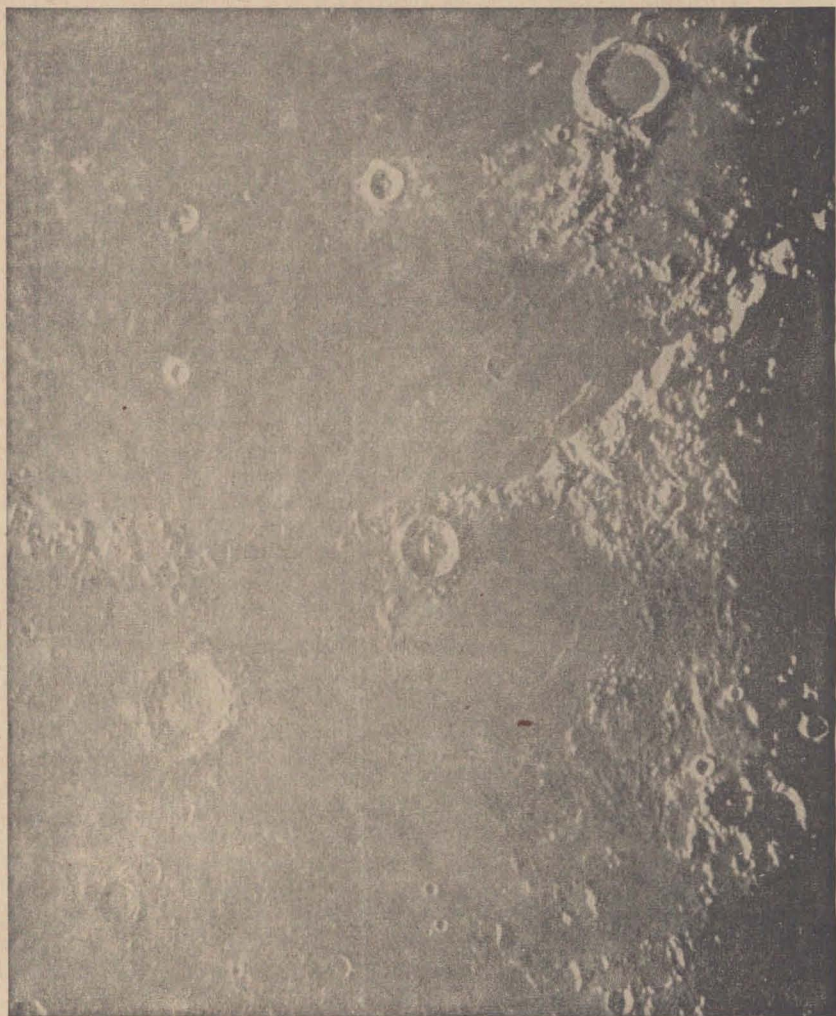


Fig. 143. — Fotografía lunar en la región de Copérnico. (Observatorio de París).

en el hemisferio austral de la Luna, donde se destacan el monte Leibnitz, ya nombrado, y el *Doerfel*. En cuanto a las paredes de los grandes circos suelen alcanzar alturas de 3.000 y 4.000 metros con respecto al nivel de las llanuras próximas.

Por un método análogo al aplicado para medir las alturas de las montañas lunares, se miden las profundidades de los circos, encontrándose para el *Newton*, 7.250 metros; para el *Casatus*, 6.800 metros; para el *Curtius* 6.760 metros; para *Teófilo*, 5.560 metros, etc.

* 191. LAS RANURAS. — Son otras formaciones propias de la Luna, constituyendo grietas que suelen extenderse a veces en longitudes comprendidas entre los 300 y 500 kilómetros y atravesando en ocasiones cordilleras y cráteres, lo que demuestra que el período de formación de tales ranuras, es posterior al de la aparición de sus montañas. La mayor de las ranuras lunares está en el cuadrante N.O. cerca de Hyginus; las demás se extienden en uno y otro hemisferio alcanzando en la actualidad a conocerse muchos centenares (ver fig. 142).

* 192. CONSTITUCIÓN FÍSICA DE LA LUNA. ALBEDO. — Un fenómeno fácilmente controlable, demuestra que la Luna es un astro carente de atmósfera, ya que la ocultación de las estrellas se produce instantáneamente en cuanto un punto del borde de su disco se ubica sobre la visual dirigida a aquélla, pudiéndose decir otro tanto de la aparición cuando la estrella ha sido eclipsada por el satélite.

Por ello, no debe deducirse necesariamente que el satélite carezca en absoluto de una capa atmosférica, sino que de existir, su densidad debe ser tan débil que según cálculos no podrá alcanzar a 0,0005 de la densidad de la atmósfera terrestre.

El espectro de la luz que nos envía la Luna, sólo revela las rayas del espectro del Sol, por cuya razón se puede afirmar también que el satélite carece de atmósfera, lo que se corrobora además por la ausencia de crepúsculos lunares.

EBERT observó que las superficies vítreas cubiertas de polvo, al ser iluminadas bajo ángulos distintos presentan aspectos muy parecidos a los que nos ofrecen los valles lunares bajo la acción de los rayos solares, lo que le hace suponer que tales valles están formados por magmas cristalizados por enfriamiento y cubiertos por partículas sólidas muy finas. En conjunto, el disco lunar sólo refleja 0,07 de la luz que recibe del Sol. Este pequeño valor del *albedo* (relación entre la luz que refleja y la que recibe una superficie), permite deducir que los materiales del suelo lunar son muy oscuros.

CAPITULO TERCERO

ECLIPSES

193. GENERALIDADES. — Entre los fenómenos debidos a los movimientos relativos de la Luna y el Sol, además de las fases ya vistas, deben mencionarse otros no menos interesantes, que son los eclipses de Luna y de Sol.

Un eclipse (del lat. *eclipsis*; del gr. *écleipsis*, faltar, ocultar) es la desaparición momentánea, parcial o total, de un astro, ya sea por la interposición de otro sobre el rayo visual dirigido al primero, ya por la penetración del astro en el cono de sombra proyectado por otro cuerpo celeste.

A la primera causa obedecen los eclipses de Sol, estrellas y planetas, ocultándose tras el disco opaco de la Luna; y a la última, los de Luna y de los satélites de Júpiter, al penetrar en los conos de sombras proyectados por la Tierra y Júpiter, respectivamente.

Para que se verifique el eclipse de un astro, es indispensable que el centro de éste (si tiene diámetro aparente sensible) se ubique sobre la recta determinada por el lugar terrestre de observación y el centro del otro astro, o muy próximo a la misma, deduciéndose de ello, que el eclipse sólo podrá producirse en los momentos de conjunción u oposición (169) de dos astros con respecto a la Tierra, sin que necesariamente deba verificarse el fenómeno, en cada conjunción o en cada oposición.

Como la Tierra y el Sol están constantemente en el plano de la eclíptica, se comprenderá que un eclipse, ya sea de Sol, ya sea de Luna, sólo se llevará a cabo cuando el centro de la última se ubique también en aquel plano o muy próximo al mismo, es decir, cuando la conjunción o la oposición se verifiquen en el momento en que el centro lunar pasa por uno de los nodos (171) o está muy próximo a él.

Si el plano de la órbita lunar coincidiera con el plano de la eclíptica, en cada conjunción se verificaría un eclipse de Sol al interponerse el satélite entre la Tierra y aquel astro, y en cada oposición habría eclipse de Luna al penetrar el satélite en el cono de sombra proyectado por la Tierra, es decir, que durante el mes lunar acaecerían dos eclipses, y el cabo del año 26, de los cuales la mitad serían de Sol y la otra mitad de Luna. Como en realidad los planos mencionados forman entre sí un ángulo de $5^{\circ}9'$, se sigue, que en las sicigias, no siempre el alineamiento Sol - Tierra pasa por la Luna, de modo que en muchas de ellas el fenómeno no se produce.

ECLIPSES DE SOL

194. LONGITUD DEL CONO DE SOMBRA PROYECTADO POR LA LUNA. — Sean S y L , los centros del Sol y de la Luna (fig. 144), y designemos por R y R_1 a sus respectivos radios. Lla-

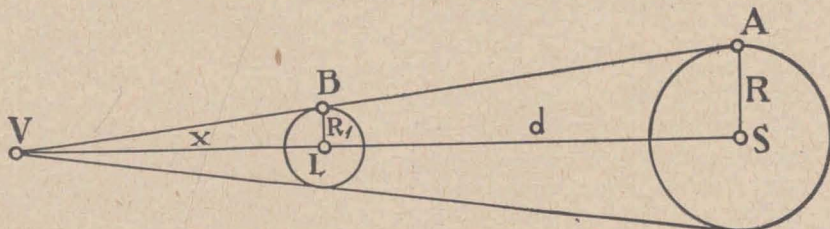


Fig. 144. — Longitud del cono de sombra de la Luna.

mando x a la longitud del cono de sombra proyectado por el satélite y d a la distancia Sol-Luna, los triángulos semejantes VAS y VBL permiten establecer*:

$$\frac{VL}{VS} = \frac{BL}{AS},$$

o lo que es lo mismo:

$$\frac{x}{x+d} = \frac{R_1}{R},$$

de la cual deducimos:

$$xR = xR_1 + dR_1,$$

y de ésta:

$$x = \frac{d \cdot R_1}{R - R_1}.$$

Si reemplazamos en esta expresión los valores obtenidos para los radios del Sol y la Luna (124;185), en función del radio r de la Tierra, tendremos aproximadamente:

$$x = \frac{d}{400}.$$

Esta fórmula permite calcular los valores máximo y mínimo de x , según que tomemos como distancia Sol-Luna, 23.800 r , correspondiente al afelio, o 23.000 r , que corresponde al perihelio.

Resultará en consecuencia:

$$x \text{ máx.} = \frac{23.800 \text{ } r}{400} = 59,5 \text{ } r,$$

$$x \text{ mín.} = \frac{23.000 \text{ } r}{400} = 57,5 \text{ } r,$$

* La distancia Sol-Luna puede tomarse igual a la distancia Sol-Tierra, sin cometer con ello error apreciable.

Recordando ahora que la distancia Luna-Tierra oscila aproximadamente entre $56 r$ (en el perigeo) y $64 r$ (en el apogeo) podremos formular el importante enunciado que sigue:

La longitud del cono de sombra proyectado por la Luna, es en todo instante superior a la mínima distancia Luna-Tierra, e inferior a la máxima.

En consecuencia: la sombra lunar puede llegar en ocasiones a la superficie de nuestro planeta y no alcanzarla en otras.

195. ECLIPSE TOTAL DE SOL. — Cuando el cono de sombra proyectado por la Luna alcanza a la Tierra, se producirá un eclipse total de Sol en todo lugar terrestre barrido por la sombra en movimiento.

Para que ello acontezca deben haberse verificado tres condiciones:

- a) *Sol y Luna en conjunción con respecto a la Tierra.*
- b) *Centro lunar en un nodo o muy próximo al mismo.*
- c) *Luna en el perigeo de su órbita, o cercana a él.*

En la figura 145 el cono de sombra VBB' proyectado por el satélite es el determinado por las tangentes exteriores comunes al

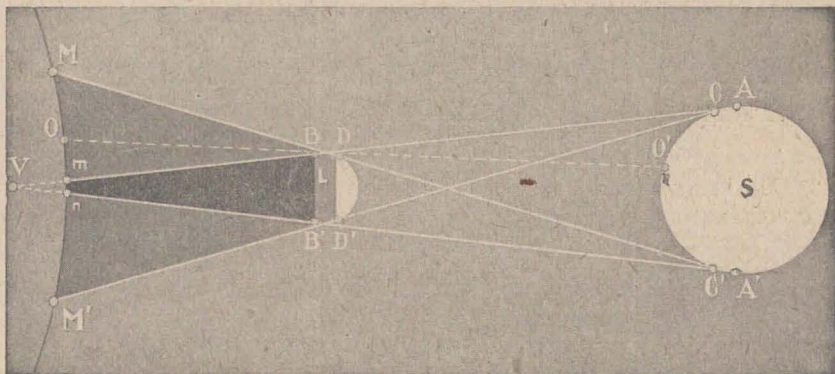


Fig. 145. — Eclipse total de Sol en mn , y parcial en la región de la penumbra.

Sol y a la Luna. Dicho cono intercepta a la superficie terrestre según un círculo mn , cuyo diámetro rara vez alcanza a los 200 kilómetros.

A medida que el disco lunar, cuyo diámetro aparente en las condiciones indicadas es superior al del Sol, va desfilando frente a este astro de Occidente a Oriente, la sombra circular mn se desplaza sobre la superficie de la Tierra en el mismo sentido barriendo una estrecha franja para la cual se oculta el Sol totalmente durante

algunos momentos, y parcialmente antes y después de la fase total del fenómeno. Como es fácil deducirlo, los lugares barridos por la sombra móvil del satélite se van sucediendo de Occidente a Oriente sin solución de continuidad, de modo tal que el fenómeno, al terminar en uno de ellos, se inicia en otro, y así de continuo, hasta que el cono de sombra perdiendo contacto con el planeta desaparece en el Levante (fig. 146).

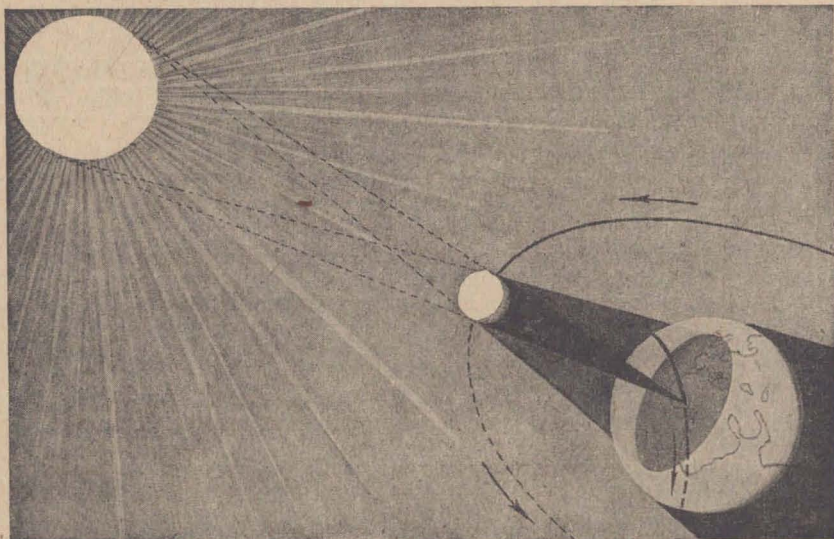


Fig. 146. — Desplazamiento de la sombra lunar sobre la superficie de la Tierra durante un eclipse total de Sol.

En la figura 147 pueden verse diversos aspectos del fenómeno para un mismo observador. En *a*, primer contacto, el disco oscuro de la Luna se ha colocado tangencialmente al disco luminoso del Sol dando lugar a la iniciación del eclipse; en *b*, el satélite ha producido una mordedura o muesca en el borde occidental del astro



Fig. 147. — Aspectos diversos de un eclipse total de Sol. (La diferencia de diámetros aparentes se ha exagerado).

del día; en *c* fase culminante del eclipse, todo el disco solar aparece cubierto por el círculo oscuro de la Luna; en *d*, la mordedura o muesca producida por el satélite oculta el borde oriental del Sol, y, finalmente, en *e*, último contacto, finaliza el eclipse.

La duración máxima de la fase total de un eclipse de Sol, se lleva a cabo en los lugares ecuatoriales de la Tierra, alcanzando apenas a unos 8 minutos. Esta duración depende de la relación existente entre los diámetros aparentes de la Luna y el Sol en el momento en que se produce el fenómeno, y para que alcance al valor máximo apuntado, cosa muy rara, es necesario que el eclipse solar se produzca precisamente en los momentos en que la Luna pasa por el perigeo (diámetro aparente máximo, en razón de la mínima distancia Luna - Tierra) y el Sol por el apogeo (diámetro aparente mínimo por la máxima distancia Sol - Tierra).

Por lo general, la duración de la fase total de un eclipse de Sol raramente alcanza a ser de 6 minutos, y la duración completa del fenómeno con sus correspondientes parciales, suele llegar en ocasiones para un punto del Ecuador, a 4 horas, 30 minutos.

196. PENUMBRA: ECLIPSES PARCIALES DE SOL. — En todo eclipse total de Sol, se producen también eclipses solamente parciales del astro a ambos lados de la franja terrestre barrida por el cono de sombra.

El lugar geométrico de las tangentes interiores comunes al Sol y a la Luna (fig. 145) encierra, dirigido hacia la Tierra en los momentos de eclipse, un tronco de cono $DD'MM'$ cuya base es una porción de la superficie terrestre limitada en general por una curva no plana. A consecuencia de ello, y en un instante dado durante el eclipse, un anillo de la superficie terrestre estará en penumbra envolviendo al círculo de sombra mn . El anillo penumbral $MM'mn$, acompañando a la región sombreada en su movimiento de Occidente a Oriente, barre además de la franja mn , otras dos franjas laterales Mm y $M'n$ situadas al norte de la franja central la una, y al sur de la misma la otra.

Para un observador terrestre situado en O , es decir, en un punto sólo barrido por la penumbra, no habrá eclipse total de Sol, puesto que en el momento culminante o central del fenómeno sus visuales podrán abarcar todavía la región AO' del Sol no cubierta por la Luna en ningún momento, y en este caso el eclipse es simplemente parcial.

Los eclipses parciales son de mucha amplitud en cuanto a la parte ocultada por la Luna, en las cercanías de m y n , desde las cuales sólo se alcanza a ver una estrecha hoz del disco solar; en cambio, pasan casi inadvertidos para observadores ubicados en las vecindades de M y M' .

197. ECLIPSE ANULAR DE SOL. — En el párrafo 194, al calcular la longitud del cono de sombra de la Luna, vimos que en ocasiones, cuando el satélite estaba alejado del perigeo de su órbita, dicho cono no tenía la longitud necesaria para llegar directamente a la Tierra, formando entonces su vértice V (fig. 148) en un punto

exterior al planeta. En tal caso, la hoja opuesta de aquel cono, intercepta a la esfera terrestre aproximadamente según un círculo mn de hasta 300 kilómetros de diámetro, que se desplaza sobre el planeta en la forma ya vista para el círculo de sombra, barriendo como éste una prolongada y estrecha franja de la superficie de la Tierra.

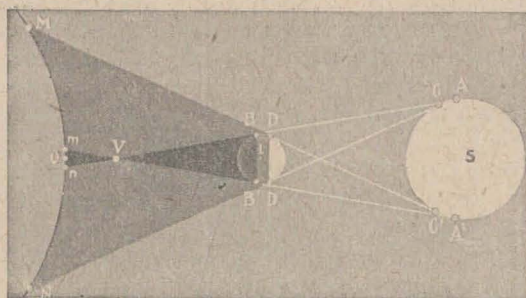


Fig. 148. — Eclipse anular de Sol en mn , y parcial en la penumbra.

Por situado exactamente sobre la recta determinada por los centros de ambos astros, llegará un instante al culminar el eclipse, en que verá al anillo solar antes mencionado con un ancho uniforme en toda su extensión, a partir del cual el anillo comenzará a ensancharse hacia Occidente y estrecharse en el lado opuesto, hasta que los limbos del Sol y de la Luna se dispongan tangenciales interiormente, en cuyo momento la fase anular del eclipse ha terminado, siguiéndose los correspondientes parciales.

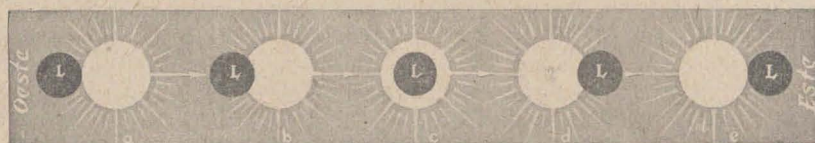


Fig. 149. — Fases diversas de un eclipse anular.

En la figura 149 se ven aspectos sucesivos ofrecidos al observador por ambos astros durante el proceso de un eclipse anular. En a , primer contacto, se inicia el fenómeno en su fase preanular; en b , la Luna ha producido una mordedura o muesca en el borde occidental del Sol; en c el eclipse está en plena fase anular; en d , la mordedura o muesca se ha corrido al borde oriental del Sol, y en e , último contacto, finaliza el fenómeno.

La duración máxima de la fase anular de uno de estos eclipses, que alcanza a ser hasta de 12 minutos, se lleva a cabo cuando la Luna está en el apogeo de su órbita y el Sol en su perigeo, pues en tal caso el primer astro ofrece su diámetro aparente mínimo y el último el máximo.

Desde las franjas terrestres laterales Mm y Nn de figura 148, sólo podrán observarse fases parciales del eclipse análogas a las ya vistas en el parágrafo 196.

ECLIPSES DE LUNA

198. POSIBILIDAD. — Para que un eclipse de Luna sea posible, es indispensable, en primer lugar, que el cono de sombra proyectado por la Tierra alcance al satélite, es decir, que su longitud sea superior a la distancia Tierra - Luna.

Para que la Luna además pueda penetrar totalmente en dicho cono es necesario que el diámetro aparente de la sección hecha a la distancia del satélite sea superior al diámetro aparente del mismo.

19 LONGITUD DEL CONO DE SOMBRA DE LA TIERRA. — Sean R y r (fig. 150), los radios respectivos del Sol y de la Tierra; x la longitud VT del cono de sombra y d la distancia TS que separa a ambos astros.

De la semejanza de los triángulos VAS y VBT obtenemos:

$$\frac{x}{x+d} = \frac{r}{R},$$

y reemplazando en ésta el valor de R por $109 r$ (par. 124), y despejando x se tiene:

$$x = \frac{d}{108}.$$

Si tomamos el valor medio de la distancia Sol - Tierra, es decir, $d = 23.440 r$ y lo reemplazamos en la última relación, encontramos finalmente:

$$x = \frac{23.440 r}{108} = 217 r.$$

Este resultado demuestra que: *la longitud del cono de sombra de la Tierra es 3,6 veces mayor que la distancia media del planeta a la Luna.*

29 ABERTURA DEL CONO DE SOMBRA TERRESTRE. — Si en la figura 150, trazamos la recta TA , dicha recta será sensiblemente tangente al disco del Sol atendiendo a la gran distancia que separa a este astro de la Tierra, y a la pequeña magnitud del radio del planeta ante la misma.

En tal supuesto, el ángulo VAT , designado por P en la figura, no es otra cosa que la paralaje horizontal del Sol (122), mientras

Reemplazando en esta igualdad el valor de α dado por la [1], se obtiene:

$$\delta = 2P' - (\Delta - 2P),$$

o bien:

$$\delta = 2 (P + P') - \Delta.$$

El valor numérico de δ lo obtenemos fácilmente, recordando que:

paralaje media horizontal del Sol, $P = 8'',80$.

de la Luna, $P' = 57'$.

diámetro aparente medio del Sol, $\Delta = 32'$.

valores que introducidos en la expresión de δ , nos dan:

$$\delta = 1^{\circ}22'18'' \text{ (approx.)}$$

Este valor es 2,6 veces mayor que el diámetro aparente medio de la Luna, calculado en 31', por lo cual el satélite en ocasiones propicias podrá penetrar por completo en el cono de sombra proyectado por la Tierra y eclipsarse totalmente.

199. **ECLIPSE TOTAL DE LUNA.** — En parágrafo 198, vimos que el diámetro aparente de la sección del cono de sombra a la distancia de la Luna, es 2,6 veces mayor que el diámetro aparente del astro, por lo cual éste, en las oposiciones favorables, puede penetrar por completo en dicha sombra eclipsándose totalmente. En la figura 151 puede verse el cono geométrico de sombra de la Tierra, envuelto en la correspondiente penumbra. El eclipse del satélite comienza en el instante en que se coloca tangente exteriormente al cono de sombra.

Fig. 151. — Eclipse total de Luna. (N. D.).

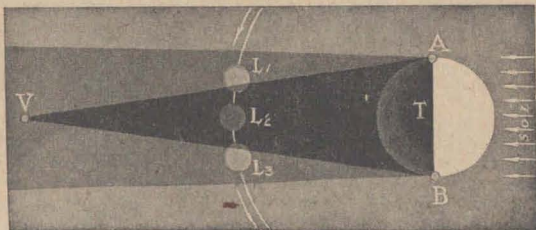


Fig. 151. — Eclipse total de Luna. (N. D.).

instante la Luna va internando lentamente en dicho cono su borde oriental hasta penetrar por completo, en cuyo momento se inicia la fase total del fenómeno en la cual se encuentra en la posición L_2 de la figura, correspondiente al momento culminante del eclipse.

Algun tiempo después termina la fase total, y el satélite se deja ver emergiendo de la sombra cada vez más su borde oriental hasta quedar por completo fuera de ella, terminando el fenómeno cuando el disco lunar y el cono de sombra son tangentes exteriormente.

En realidad, el eclipse así descrito es precedido y seguido por los llamados *eclipses penumbrales*, que se verifican al atravesar la Luna la penumbra envolvente del cono de sombra; pero estos eclipses son tan poco notables que apenas si se manifiestan por una débil disminución del brillo normal de la Luna llena.

La duración máxima del eclipse en su fase total, no alcanza a 2h30m en las condiciones más favorables, pero todo el fenómeno comprendido entre el primer y último contacto con la penumbra, suele alcanzar, en el mejor de los casos, una duración de 4h30m.

En la figura 152 pueden observarse diversos aspectos de un eclipse casi total de Luna.

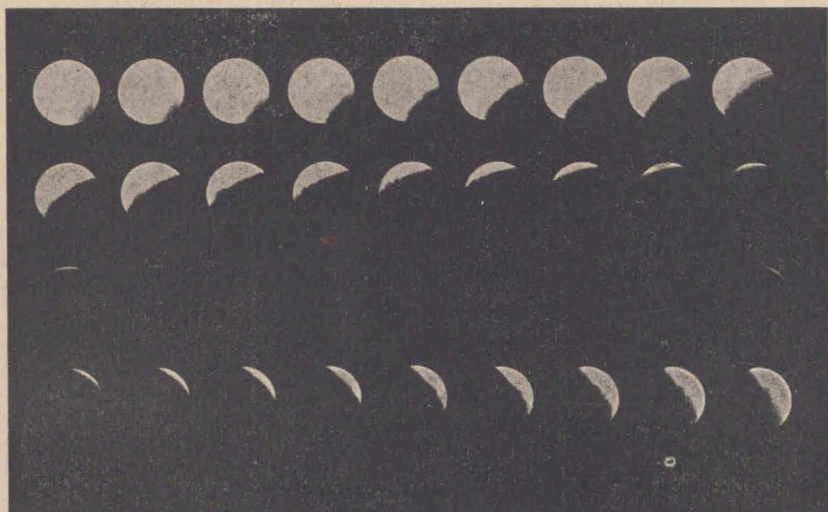


Fig. 152. — Distintas fases del eclipse de Luna del 27 al 28 de octubre de 1939. (Fotografías tomadas desde el Observatorio de La Plata por el astrónomo B. H. Dawson).

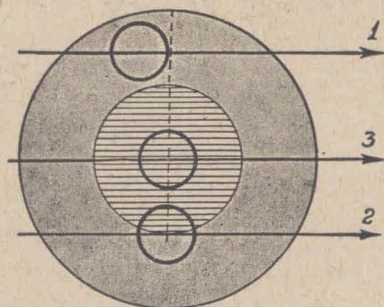


Fig. 153. — Sección del cono de sombra y penumbra

200. ECLIPSES PARCIALES DE LUNA. — De los eclipses de Luna, la mitad, aproximadamente, son parciales y la otra mitad totales. En los parciales, en el momento culminante, el satélite sólo habrá penetrado en parte en el cono de sombra de la Tierra, apareciendo dicha parte como un recorte hecho en el disco luminoso de la Luna llena.

En la figura 153 se muestra una sección normal al eje de los conos de sombra y penumbra a la distancia de la Luna. Las flechas 1, 2 y 3 son posibles trayectorias del centro del satélite. Si la Luna sigue la trayectoria 1, sólo atravesará la penumbra y el fenómeno pasará inadvertido por tratarse de un simple eclipse penumbral; si lo hace siguiendo el recorrido 2, una parte del satélite en un momento dado habrá penetrado en el

cono de sombra y el eclipse será parcial; y, si el camino recorrido por el satélite es el de flecha 3, la Luna efectuará cierta parte de su marcha internada por completo en el cono de sombra, rayado en la figura, produciéndose en consecuencia el eclipse total.

Se alcanzará a comprender, que el más largo de los eclipses totales, se llevará a cabo en el caso de que la trayectoria 3 del centro lunar pase por el centro de la sección del cono de sombra, lo que se verifica cuando en el momento de la oposición, el centro del satélite coincide con uno u otro de los nodos, caso muy improbable, pero no imposible.

201. VISIBILIDAD DE LOS ECLIPSES DE SOL Y LUNA.—

Los eclipses de Sol antes estudiados, sólo son visibles, según se vió, desde una estrecha franja de Tierra y en forma distinta para los observadores según que estén ubicados en la parte central de dicha franja o en las partes laterales de la misma. Dichos eclipses son, pues, efectos de perspectiva que dependen de la posición del ojo del observador con respecto a la Luna y al Sol.

En cambio, y esta es una diferencia esencial, los eclipses de Luna no dependen en absoluto de la posición del observador sobre la superficie de la Tierra, sino de la parte más o menos considerable del satélite envuelta por el cono de sombra del planeta, y esa parte que puede abarcar a toda la Luna en el caso del eclipse total, aparecerá oscurecida para todo observador cuyas visuales alcancen al satélite, es decir, que el fenómeno será visible desde todo el hemisferio terrestre ubicado frente a la Luna, ofreciendo a todos los observadores las mismas fases.

Si se tiene en cuenta la larga duración que suelen alcanzar los eclipses de Luna, y la velocidad de rotación diurna del planeta que es de 15° por hora, se llegará a la conclusión que el fenómeno es visible desde más de un hemisferio terrestre, pues durante su producción dejará de serlo para los lugares en que el satélite se pone, pero se hará visible desde otros donde el satélite sale.

* 202. INFLUENCIA DE LA REFRACCION ATMOSFERICA SOBRE LOS ECLIPSES DE LUNA.— En los eclipses totales de Luna, ésta no desaparece de nuestra vista ni aun en los instantes culminantes del fenómeno, durante los cuales se la puede observar bajo la forma de un disco color rojo ladrillo.

Se debe esta iluminación al desvío que experimentan los rayos solares al atravesar las capas atmosféricas que rodean a la Tierra. Dicho desvío hace que tales rayos en sus sucesivas refracciones, se dirijan hacia el eje del cono de sombra de la Tierra, iluminando débilmente gran parte del mismo en su región más alejada del planeta, de modo tal que, la longitud teórica de dicho cono, calculada en 217 radios terrestres, se ve reducida en la realidad a sólo su cuarta parte, es decir, a unos 50 radios terrestres.

Suponiendo que el valor de la refracción en el horizonte es de $35'$, la desviación que experimenta un rayo tangente a la superficie de la Tierra sería de $1^{\circ}10'$, y para ver el radio terrestre bajo ese ángulo la distancia correspondiente sería de unos 50 radios.

En estas condiciones, la Luna (fig. 154), alejada de nosotros en 60 radios terrestres (valor medio), nunca penetra en el cono puro de sombra durante sus eclipses, haciéndolo solamente en el cono geométrico débil-

mente iluminado, razón por la cual el satélite en sus eclipses totales sigue siendo algo visible en la forma antes dicha.

En la figura hemos representado al cono de sombra pura con vértice en V' . La coloración rojo-ladrillo antes mencionada, debe atribuirse a la transparencia incompleta del aire humedecido en vapor de agua, el cual absorbe sobre todo, los colores complementarios del rojo.

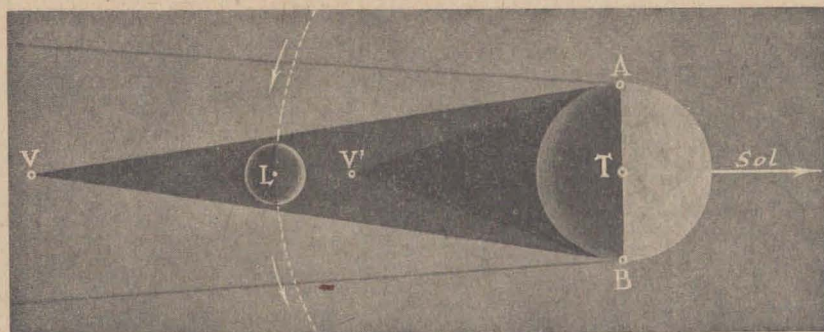


Fig. 154. — Cono de sombra pura de la Tierra.

203. PERIODICIDAD DE LOS ECLIPSES: SAROS O PERIODO CALDEO. — Los astrónomos de la antigüedad, comenzando por los caldeos, preveían los eclipses por la relación existente entre los movimientos del Sol y de la Luna. La Luna en su *revolución draconítica*, o sea, entre dos encuentros consecutivos con el mismo nodo emplea 27,2122 días.

El Sol a su vez, partiendo de un nodo, tarda para volver al mismo (revolución draconítica del Sol) 346,6201 días.

Estas duraciones son inferiores a las que emplean ambos astros en sus respectivas revoluciones siderales, debido a la retrogradación de los nodos (173) los cuales en consecuencia marchan al encuentro de ambos astros alcanzándolos antes de que éstos logren cerrar sus órbitas correspondientes.

Observemos ahora, que el tiempo empleado por el satélite en 242 de sus revoluciones draconíticas, es casi el mismo que el empleado por el Sol en 19 de las suyas, puesto que se tiene:

$$\begin{aligned} 242 \times 27,2122 \text{ días} &= 6585,36 \text{ días,} \\ 19 \times 346,6201 \text{ días} &= 6585,78 \text{ días.} \end{aligned}$$

En consecuencia: si suponemos al Sol y a la Luna partiendo en determinada fecha de un mismo nodo, al cabo de 6585 días volverán a encontrarse de nuevo en dicho nodo.

Luego: en ese período, equivalente a 18 años 11 días, debe verificarse un número entero de lunaciones, número que resulta ser igual a 223, es decir, que si el período comienza en una conjunción, el primer novilunio y el último, al llevarse a cabo sobre el mismo nodo darán lugar a eclipses totales de Sol, mientras que si se hubiera ini-

ciado en una oposición, la primera luna llena y la última del período, darían lugar a eclipses totales de Luna.

Dentro de ese período, llamado *Saros* o período Caldeo, se verifican 70 eclipses de los cuales 41 son de Sol y 29 de Luna.

Considerando ahora dos períodos *Saros* consecutivos, existirá una correspondencia biunívoca entre los 70 eclipses del primero, con los 70 del último, y dos eclipses correspondientes estarán espaciados entre sí en un período *Saros*, p. ejm.: el eclipse total de Luna verificado el 7 de enero de 1917, volvió a repetirse 18 años 11 días después, o sea, el 18 de enero de 1935, y su próxima verificación corresponderá al 29 de enero de 1953.

Si anotamos entonces las fechas de los 70 eclipses escalonados en un período *Saros*, podremos calcular fácilmente las fechas de los 70 eclipses que se verificarán en el período que le sigue, adicionando a cada una de ellas 18 años 11 días, aun cuando por lo general dos eclipses correspondientes espaciados en este espacio de tiempo, no son visibles precisamente en las mismas regiones de la Tierra, pues de uno a otro se producen variantes en la posición relativa de los astros que intervienen.

LIBRO QUINTO

EL SISTEMA SOLAR



LOS SISTEMAS ASTRONOMICOS

204. MOVIMIENTO DE LOS PLANETAS ENTRE LAS ESTRELLAS: ESTACIONES Y RETROGRADACIONES. — Para determinar la trayectoria con respecto a las estrellas de un planeta cualquiera, bastará fijar la posición que noche tras noche ocupa sobre la esfera celeste, registrando las mismas sobre un globo o carta del cielo valiéndose de las coordenadas del astro, ya sean ecuatoriales, ya eclípticas.

Con este procedimiento, y después de un número grande de observaciones, habremos determinado sobre el globo o carta utilizados, una serie de puntos, que unidos en el orden de obtención por un trazo continuo, nos darán la imagen del camino recorrido por el planeta entre las estrellas cercanas.

Observando la trayectoria así obtenida, se podrán establecer las siguientes características relativas al movimiento aparente del planeta:

1º *La trayectoria planetaria sobre la esfera celeste, es una curva sinuosa recorrida por el astro con velocidad angular variable.*

2º *El sentido del desplazamiento cambia de tiempo en tiempo siendo alternativamente directo y retrógrado.*

3º *Los arcos de trayectoria recorridos en sentido directo son de mayor amplitud que los recorridos en sentido retrógrado, empleando el planeta mayor tiempo en cubrir los primeros.*

4º *Durante todo el movimiento, el planeta se aparta muy poco de la eclíptica.*

5º *Las latitudes del planeta son alternativamente positivas (boreales) y negativas (australes) o en otros términos, la trayectoria es en parte boreal y en parte austral con respecto a la eclíptica.*

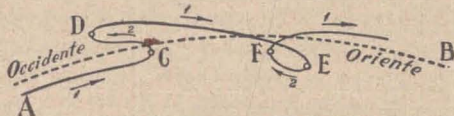


Fig. 155. — Movimiento aparente de los planetas. Estaciones y retrogradaciones. (S. D.).

La figura 155 muestra una porción de la trayectoria aparente o visual con sus lazos y sinuosidades, que para los distintos planetas no son siempre los mismos.

En los tramos AC, DE, FB..., etc., el planeta se desplaza en el sentido *directo* de las flechas 1, mientras que el recorrido de los tramos CD, EF..., etc., lo efectúa el astro en el sentido *retrógrado* de las flechas 2.

Los puntos C, D, E, F..., etc., donde el planeta cambia el sentido de su movimiento se llaman *estaciones*, y se dice que el astro está en *retrogradación*, cuando su movimiento es retrógrado.

La velocidad angular del planeta, que puede considerarse nula en las estaciones, comienza a crecer a partir de una de éstas, para decrecer después y anularse de nuevo en la estación siguiente, y así sucesivamente.

Estos cambios de velocidad angular del planeta en sus recorridos en ambos sentidos, dependen de las posiciones que el astro va tomando con respecto al Sol, pudiéndose, en general, establecer el siguiente enunciado:

La velocidad angular máxima de un planeta en uno u otro sentido, sobre su trayectoria en la esfera celeste, se registra en los momentos de sus conjunciones y oposiciones con el Sol.

SISTEMA GEOCENTRICO

205. PRINCIPIOS BASICOS DEL SISTEMA DE TOLOMEO.

— El sistema geocéntrico lo apoya TOLOMEO en cuatro leyes fundamentales, que pasamos a enunciar en el orden establecido por su autor.

1º *Los cuerpos celestes describen círculos alrededor de la Tierra.* — Al sentar esta ley, se basa Tolomeo en las apariencias del movimiento diurno, según el cual los astros describen circunferencias alrededor de los polos celestes.

2º *La Tierra es esférica.* — Al afirmar Tolomeo la esfericidad de la Tierra, la supone implícitamente aislada en el espacio, desvirtuando la creencia de los pretendidos soportes que muchos de sus antecesores le atribuían. Defiende su tesis aduciendo que para una esfera no tienen sentido las palabras “arriba” y “abajo”, pues lo que designamos con esta última expresión, no es más que el sentido en que caen los cuerpos pesados dirigiéndose siempre hacia el centro de la Tierra.

3º *La Tierra ocupa el centro de la esfera celeste.* — Apoya este principio en la observación del movimiento diurno de los astros, pues si la Tierra se supone corrida hacia el este del centro, los astros en sus salidas serían más veloces que en sus puestas, cosa que no acontece.

4º *La Tierra no tiene movimientos progresivos.* — Opina Tolomeo que si la Tierra se desplazara en el espacio, dejaría de ser el centro de la esfera celeste, y en este caso, los astros situados en el sentido del movimiento irían acercándose, alejándose en cambio los ubicados en el sentido opuesto, y con ello el movimiento diurno perdería su uniformidad. Luego la Tierra es un cuerpo inmóvil en el espacio.

Replica Tolomeo a los que sostienen que la Tierra está animada de una rotación alrededor de un cierto eje, y que en consecuencia el movimiento diurno de la esfera celeste con todos sus astros sólo es aparente, sosteniendo que si ello fuera cierto, al rotar la Tierra en un día, su velocidad sería tal, que el aire quedaría atrás, aconteciendo lo mismo con los cuerpos susceptibles de flotar en él,

Además, argüía que era de todo punto descabellado, el admitir un tal movimiento, que de existir haría que los pájaros no pudieran encontrar el nido de donde habían partido al efectuar un vuelo por corto que fuera, pues durante el tiempo de permanencia en el aire, la Tierra se debe desplazar en un gran trecho. Por otra parte, si en un lugar dado alguien efectúa un salto, caería según él en otro muy distante corriendo el riesgo de chocar contra los objetos situados al Occidente.

206. EXPLICACION DE LAS ESTACIONES Y RETROGRADACIONES PLANETARIAS EN EL SISTEMA DE TOLOMEO: EPICICLOS. — Para explicar los avances y retrocesos de los planetas sobre sus trayectorias visuales, aplicó TOLOMEO en su sistema astronómico la teoría de los *epiciclos* concebida por HIPARCO tres siglos antes.

En conformidad con tal teoría, imaginemos un Júpiter ficticio J' describiendo alrededor de la Tierra en 12 años una trayectoria circular $J'J'$ llamada *deferente*, en el sentido directo de flecha 1 (fig. 156). El Júpiter verdadero J se desplazará alrededor del ficticio describiendo cada año una circunferencia llamada *epiciclo*, de modo tal que la trayectoria real del planeta será, según el "ALMAGESTO", la curva sinuosa JJ que muestra la figura en trazo lleno, con la particularidad de que sus lazos o bucles $A, C, \dots$, etc., se dirigen siempre hacia la Tierra T . En cada uno de estos lazos, hay dos estaciones, las M y M' en el lazo A , y las N y N' en el B , en las que el planeta aparece deteniéndose durante un cierto tiempo cambiando a continuación el sentido de su movimiento. En la figura, las porciones de trayectoria $BM, MM', M'N$, y $NN', \dots$, etc., son recorridas *alternativamente* en los sentidos *directo* y *retrogrado*, respectivamente, pudiéndose apreciar las mayores amplitudes de las primeras.

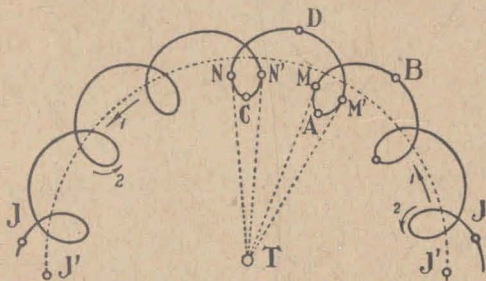


Fig. 156. — Estaciones y retrogradaciones planetarias en el sistema de Tolomeo. Epiciclos. (N. D.).

Como se comprenderá, la velocidad máxima en los *tramos directos* la alcanza el planeta al ubicarse en los puntos $B, D, \dots$, etc., mientras que en las *retrogradaciones* el astro toma su mayor velocidad al pasar por los extremos $A, C, \dots$, etc., de los lazos. En las estaciones $M, M', N, N', \dots$ etc., la velocidad del planeta es nula.

En conformidad con lo expuesto, si suponemos que ambos planetas, el ficticio y el real, fueran visibles desde la Tierra, observaríamos al último efectuando con respecto al primero un lento movimiento pendular colocándose alternativamente a su derecha y a su izquierda.

La misma explicación es válida para los demás planetas exteriores a la esfera del Sol, de los cuales en aquella época sólo eran conocidos MARTE y SATURNO además del mencionado.

En forma parecida, se explican también en el sistema de Tolomeo las estaciones y retrogradaciones de los planetas interiores a la esfera del Sol, MERCURIO y VENUS, con la salvedad de que para éstos, por alejarse poco del Sol, los planetas ficticios alrededor de los cuales describen sus epiciclos, están siempre en la dirección del astro del día. (fig. 157).

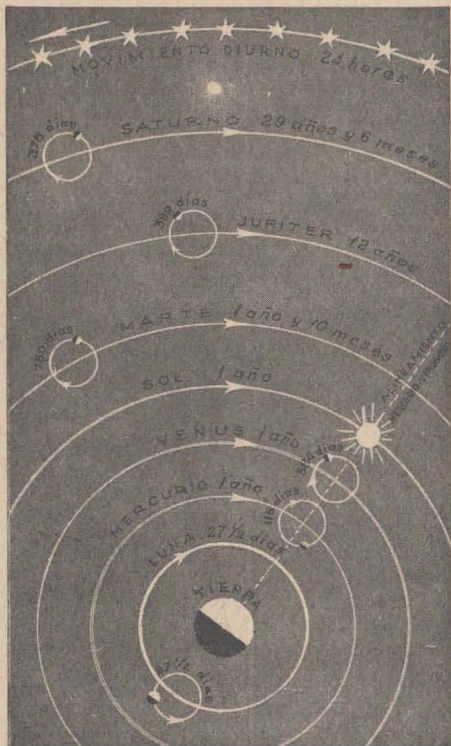


Fig. 157. — Sistema de Tolomeo. Epiciclos (S. D.).

astro errante describe alrededor de la Tierra *T* (el Sol en un año, la Luna en un mes y los planetas en tiempos fijos para cada uno) órbitas circulares sobre sus respectivas esferas cuyos centros no están ocupados por la Tierra. Hay que convenir que la única de las esferas del complejo sistema que tiene exactamente por centro a la Tierra, es la esfera de las estrellas.

Como los astros al describir sus excéntricas (fig. 158), se ubican a distancias variables de la Tierra, Tolomeo llama *perigeo* al punto *P* de la órbita más cercano a la Tierra, y *apogeo* al punto *A* más alejado de la misma; al número que expresa la distancia *TC* entre la Tierra y el centro de la órbita medida en radios de ésta, lo llamó *excentricidad*.

Resulta interesante anotar aquí, que HERÁCLITO DE PONTO sugirió en el siglo IV antes de J. C., la hipótesis de que MERCURIO y VENUS giraban directamente alrededor del Sol, hipótesis ésta, rechazada por Tolomeo.

Observó Tolomeo, que los centros de los epiciclos planetarios no se desplazan con velocidad constante, siendo dicha velocidad mayor en una época que en otra y aconteciendo otro tanto con la Luna durante el mes lunar.

Para explicar estas anomalías, introduce Tolomeo la hipótesis de las *excéntricas*, ya sustentada por HIPARCO. Según esta hipótesis, cada

La introducción de la hipótesis de las excéntricas permite al autor demostrar que todo astro (errante) que se desplaza con movimiento uniforme aparecerá con *velocidad máxima cuando pasa por el perigeo* de su órbita y con *velocidad mínima al pasar por el apogeo*, puesto que toda variación de distancia amplifica o reduce la velocidad aparente de un movimiento.

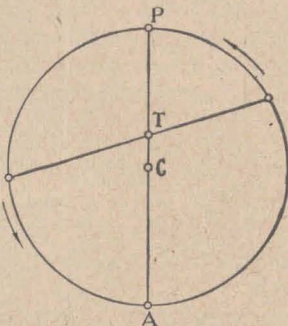


Fig. 158. — Excéntrica. (N. D.)

Otra complicación aun mayor, la origina el movimiento de precesión de los equinoccios (101) descubierto precisamente por HIPARCO. Para explicarlo, se ve llevado TOLOMEO a imaginar para el cielo de las estrellas especies de pivotes o espigones, que le permitan efectuar un lento movimiento rotatorio con respecto a los cielos de los demás astros.

SISTEMA HELIOCENTRICO

207. SISTEMA DE COPERNICO. — El complicado engranaje del sistema geocéntrico de TOLOMEO fué admitido por toda la humanidad, sin mayores discusiones hasta fines de la *Edad Media*. Apenas si durante los casi 15 siglos de su reinado se oyeron algunas voces condenatorias, entre ellas la de ALFONSO X, rey de Castilla, apodado “El Sabio”, quien ante una reunión de astrónomos de la “Escuela de Toledo”, en su mayoría árabes, sostuvo que de haber intervenido en la creación del Mundo, hubiera aconsejado mayor sencillez en su mecanismo.

Recién en el siglo XVI, NICOLÁS COPÉRNICO (1473 - 1543), astrónomo polaco, canónigo de la Catedral de Frauenburg, en su gran obra “DE REVOLUTIONIBUS ORBIUM COELESTIUM” (NoreMBERGae, 1543), expone un nuevo sistema del mundo.*

En este sistema, el Sol es el centro del Universo, por cuya razón se le ha denominado *heliocéntrico*. La Tierra y los planetas giran a su alrededor describiendo circunferencias excéntricas. Además la Tierra gira en un día en torno de un eje, con lo cual el movimiento diurno de todos los astros no es más que aparente. En cuanto a las estrellas, sostiene Copérnico la hipótesis de una esfera común a todas ellas pero de radio muy grande. Es muy explicable que admitiese esta hipótesis, si se tiene en cuenta que recién en el primer tercio del siglo XIX es cuando MACLEAR, BESSEL y ANDERSON consiguen medir las distancias de varias estrellas a

* Algunos filósofos griegos y en particular ARISTARCO DE SAMOS, sostuvieron la hipótesis de que la Tierra giraba sobre su eje en un día y alrededor del Sol en un año. Aristarco fué acusado de sacrilegio por sus contemporáneos, quienes entendían que con tales ideas era turbado el descanso de los dioses.

la Tierra, encontrando que son sencillamente enormes, superando a todo cuanto podía haberse imaginado al respecto en el siglo XVI.

De todas maneras, el sistema de Copérnico, previamente espurgado de los necesarios errores en que debió incurrir el autor en épocas en que los principios de la Mecánica Celeste eran desconocidos, es el universalmente aceptado en la actualidad.

208. PRINCIPIOS BASICOS DEL SISTEMA DE COPERNICO.

— Todo el sistema heliocéntrico de Copérnico está reunido en dos leyes que se enuncian a continuación:

PRIMERA LEY. *El movimiento diurno de la esfera celeste es aparente y se debe a la rotación de la Tierra alrededor de un eje que pasa por su centro.*

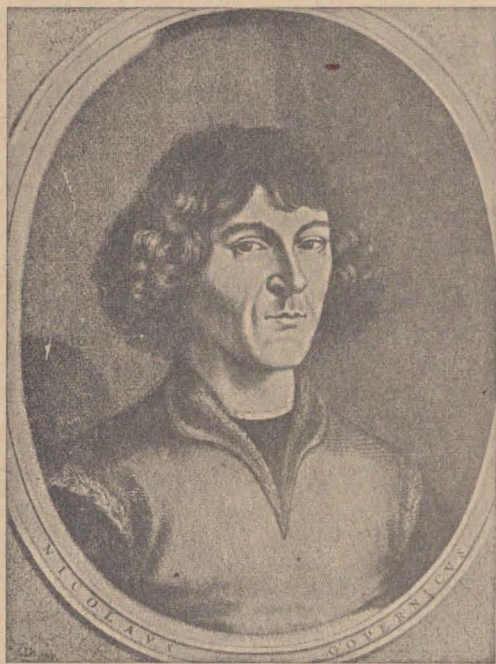


Fig. 159. — Nicolás Copérnico.

SEGUNDA LEY. *La Tierra es un planeta y da vueltas alrededor del Sol como centro del movimiento. El verdadero centro de los movimientos planetarios es el Sol y no la Tierra.* Para justificar este enunciado, se ve obligado Copérnico a demostrar que las apariencias del Universo son las mismas, tanto cuando suponemos al Sol girando alrededor de la Tierra en un año, como cuando suponemos a ésta girando alrededor de aquel astro en el mismo tiempo. Estas demostraciones son más o menos análogas a las dadas en el parágrafo 149 de este libro al tratar de cimentar la equivalencia cinemática de la traslación

anual de la Tierra y el movimiento observado del Sol.

Basado en su sistema, puede calcular Copérnico por primera vez las distancias de los planetas al Sol adoptando como unidad la distancia Sol - Tierra, aun cuando ésta le era desconocida en valor absoluto. Se basa para ello en los diámetros aparentes de los epiciclos de los distintos planetas, los cuales son tanto mayores cuanto más cerca está el planeta, teniendo en cuenta, además, *que el epiciclo aparente descrito por el planeta en un año, tiene las mismas dimensiones que la órbita terrestre.*

En la tabla que sigue, se dan los resultados obtenidos por Copérnico en tales determinaciones y las distancias verdaderas.

Planetas	Distancia mínima		Distancia máxima	
	Copérnico	Verdadera	Copérnico	Verdadera
Mercurio	0,326	0,308	0,405	0,467
Venus	0,709	0,718	0,730	0,728
Marte	1,373	1,382	1,666	1,666
Júpiter	4,980	4,952	5,453	5,454
Saturno	8,660	9,000	9,760	10,074

Los planetas cuyas distancias al Sol son menores que la de la Tierra se llaman *inferiores* (MERCURIO y VENUS), designándose por *superiores* a los demás.

Como podrá observarse por estos números, los resultados obtenidos por Copérnico son bastante aproximados presentándose la mayor discrepancia en Mercurio debido, en buena parte, a sus precarias condiciones de visibilidad por su cercanía al Sol.

209. EQUIVALENCIA CINEMATICA ENTRE LOS SISTEMAS DE TOLOMEO Y COPERNICO. — En el sistema heliocéntrico, no es necesario recurrir a la hipótesis de los epiciclos de Tolomeo para explicar los movimientos aparentes de los planetas en uno y otro sentido, con las correspondientes estaciones.

Supongamos (fig. 160), a un observador terrestre situado en T_1 sobre la órbita anual de la Tierra e inconsciente del desplazamiento de ésta. En este caso, y según lo visto en parágrafo 149, a dicho observador le parecerá que es el Sol quien se desplaza en un año alrededor de nuestro planeta, ocupando él el centro del movimiento, o sea, S . En tal supuesto, si imaginamos que P es un planeta al cual consideraremos inmóvil y situado sobre la dirección x a la distancia T_1P , al observador, en la creencia apuntada, le parecerá ver al planeta en la dirección x_1 paralela a la x , a una distancia $SP_1 = T_1P$. Cuando la traslación terrestre lo ha transportado a T_2 , el planeta le parecerá en P_2 , tal que la distancia SP_2 , por idénticas razones a las ya explicadas, será igual y paralela a T_2P . Se comprende entonces que mientras dicho observador, sin saberlo, ha efectuado al cabo de un año el recorrido $T_1T_2 \dots T_1$, alrededor del Sol, habrá visto al planeta seguir sobre la esfera celeste la trayectoria $P_1P_2 \dots P_1$, en un todo igual a la de la Tierra, que no es más que el epiciclo de Tolomeo.

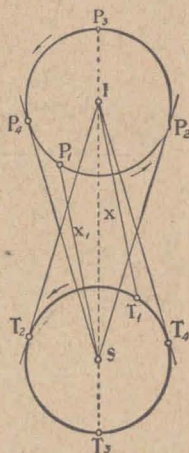


Fig. 160. — Equivalencia cinemática entre los sistemas de Tolomeo y Copérnico. (N. D.).

Por otra parte, observemos que mientras la traslación terrestre hace recorrer al observador el arco $T_2T_3T_4$, aquél verá al planeta desplazarse también en el *sentido directo* según el arco $P_2P_3P_4$ (de derecha a izquierda en la figura), mientras que al recorrer el arco $T_4T_1T_2$, el observador (siempre creyéndose en S) verá al planeta recorrer el arco $P_4P_1P_2$ (de izquierda a derecha en la figura), desplazándose en *sentido retrógrado*. De este modo, las apariencias del movimiento planetario, son en un todo análogas a las ya vistas en el sistema de Tolomeo.

En los puntos P_2 y P_4 donde para el observador el planeta cambia el sentido del movimiento, se tendrían las estaciones.

Si admitimos ahora que el planeta P en lugar de estar fijo, está animado de un movimiento propio, el astro aparecerá entonces como describiendo una circunferencia aparente alrededor de un centro que a su vez está en movimiento, tal cual ya ha sido visto en el sistema de Tolomeo al considerar los desplazamientos del Júpiter verdadero alrededor del Júpiter ficticio (206). Este efecto se debe, como es fácil comprender, a la combinación entre dos movimientos del astro: uno aparente ocasionado por la traslación de la Tierra en un año, y el otro real en su recorrido alrededor del astro central del sistema.

En cuanto a los planetas VENUS y MERCURIO, el movimiento pendular que parecen efectuar con respecto al Sol, es consecuencia de sus traslaciones alrededor del mismo, mientras que el movimiento de avance en la zona del zodiaco junto al astro del día es causado por la traslación anual de la Tierra.

Ambos sistemas son, pues, cinemáticamente equivalentes.

210. EXPLICACION DE LOS MOVIMIENTOS PLANETARIOS EN EL SISTEMA DE COPERNICO.—Sean (fig 161) S el Sol; $T_1T_2T_3\dots$ la órbita anual de la Tierra; AB un arco de la órbita de un planeta superior, y CD una porción de la esfera celeste.

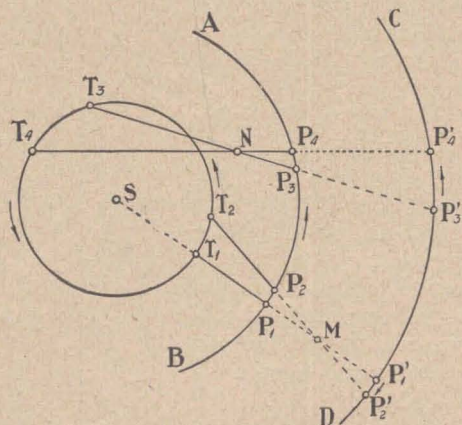


Fig. 161. — Movimiento aparente de los planetas en el sistema de Copérnico. (N. D.).

Para mayor claridad, supondremos a las órbitas circulares y coplanares.

Si partimos de las posiciones T_1 y P_1 de la Tierra y el planeta sobre sus respectivas órbitas y alineados con el Sol (oposición) mientras el planeta recorre en el sentido directo el arco P_1P_2 , la Tierra por su mayor velocidad angular, recorrerá un arco de mayor

amplitud T_1T_2 , sobre su trayectoria anual, y el observador terrestre verá al planeta desplazarse sobre la esfera celeste infinitamente lejana, desde P'_1 a P'_2 , es decir, en el sentido contrario al del movimiento real, o sea en el *retrógrado*. Obsérvese que en este caso, los alineamientos T_1P_1 y T_2P_2 de los dos astros se cortan en un punto M exterior a la órbita del planeta.

Cuando algún tiempo después el planeta ha tomado sobre su órbita las posiciones P_3 y P_4 , la Tierra se habrá ubicado sobre la suya en T_3 y T_4 , respectivamente, de modo que mientras el primero

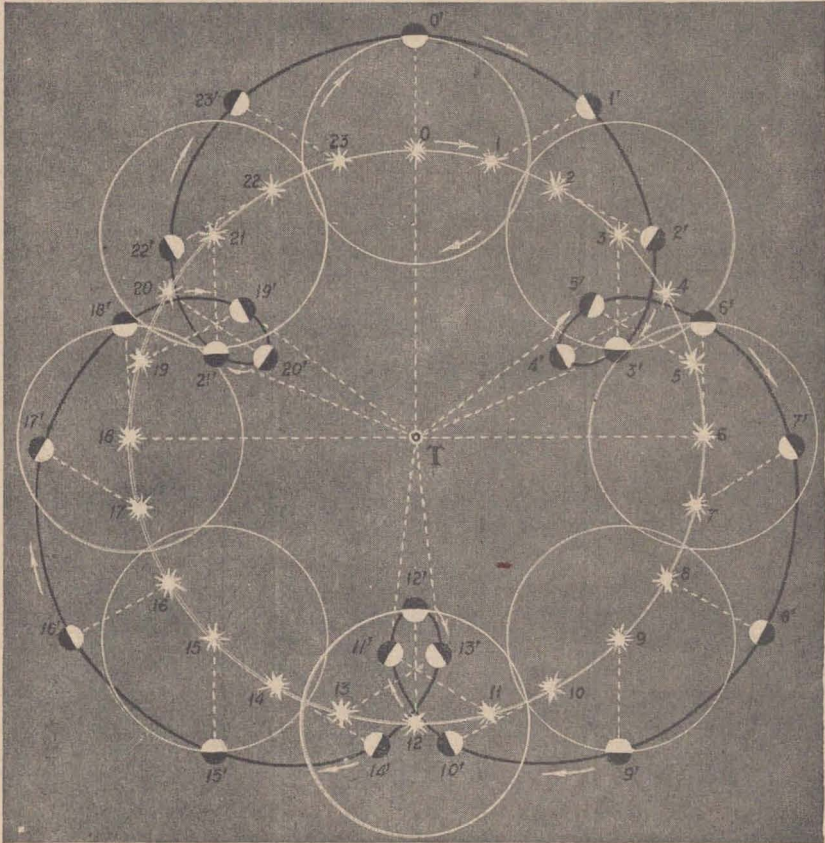


Fig. 162. — Movimiento de Mercurio, visto desde la Tierra. (S. D.).

pasa de P_3 a P_4 , desde la Tierra se le verá desplazarse sobre la esfera celeste según el recorrido $P_3'P_4'$ en el sentido directo. En este caso, y tal cual lo muestra la figura, los alineamientos correspondientes T_3P_3 y T_4P_4 , se cortan en un punto N interior a la órbita del planeta y comprendido entre éste y la Tierra. Deducimos que

al pasar el planeta de un sentido a otro en su movimiento, habrá hecho *estación* en un cierto punto de su recorrido aparente, punto en el cual el planeta aparecerá poco menos que inmóvil durante un cierto espacio de tiempo.

En la figura 162 puede verse el recorrido aparente de Mercurio al cabo de un año. Mientras el Sol en su movimiento aparente sobre la eclíptica va tomando las posiciones 0, 1, 2, ... 23, el planeta aparece ubicándose en 0', 1', 2', ... 23', describiendo entre las estrellas del zodiaco una curva con tres lazos que se cierra casi al cabo del año. En el sistema de Tolomeo el Sol se encontraría en la prolongación del segmento rectilíneo que une la Tierra con el Mercurio ficticio.

En las posiciones 3', 5', 11', 13', 19', y 21', hay *estaciones* del planeta, que no coinciden precisamente con las *digresiones** del mismo, como pudiera creerse, aun cuando se produzcan cerca de ellas.

211. SISTEMA DE TYCHO - BRAHE. — El sistema de Copérnico, como no podía menos que acontecer, fué muy combatido desde un principio como hipótesis destructora de conceptos arraigados en el espíritu humano desde muchos siglos antes. Entre los impugnadores del sistema heliocéntrico, es digno de mención el astrónomo danés TYCHO - BRAHE (1546 - 1601), uno de los grandes observadores del Cielo y a quien se debe un notable catálogo estelar para su época, al par que los más precisos estudios conocidos hasta entonces sobre los planetas *Mercurio*, *Venus*, *Marte*, *Júpiter* y *Saturno*.

Argumenta Tycho - Brahe, que en el sistema de Copérnico, los epiciclos planetarios no son más que reproducciones de la traslación anual de la Tierra alrededor del Sol, y que de ser ésta real, dichos epiciclos debían reproducirlos también las estrellas, cosa no observada en ninguna de ellas y que sólo podría pasar inadvertida en el supuesto "*increíble*" de que las distancias de tales astros al planeta que habitamos, fueran por lo menos 1.000 veces mayor que la distancia Sol - Tierra.

Esta suposición era completamente inadmisibles para el criterio de la época, hondamente influenciado por las teorías de ARISTÓTELES, quien afirmaba que "a la naturaleza le repugna el vacío".

En virtud de tales consideraciones, y tratando de aprovechar la simplicidad de los movimientos planetarios en el sistema de Copérnico, concibe Tycho - Brahe uno mixto para el Universo, apoyado en las siguientes bases:

1º *Los planetas describen órbitas circulares alrededor del Sol.*

2º *El Sol a su vez con todo su séquito planetario, se desplaza en un año alrededor de la Tierra, describiendo un círculo, en cuyo lapso cada planeta aparece recorriendo un epiciclo.*

3º *Las estrellas en conjunto están en un orbe que gira diariamente alrededor de la Tierra.*

212. CONSOLIDACION DEL SISTEMA DE COPERNICO: GALILEO. — No le fué fácil a este sistema imponerse a la consideración de los entendidos. Las resistencias que encontró antes de ser aceptado universalmente provenían, en primer término, del hecho de que en él se desalojaba al hombre de su posición de privilegio en el centro del Universo. Además, es necesario reconocer que Copérnico no había logrado rebatir con justeza los argumentos de Tolomeo en favor de la fijeza de la Tierra (205). Correspondió la gloria de rebatir aquéllos a GALILEO, el que dió al mismo tiempo los fundamentos de la mecánica.

* Máxima separación angular entre un planeta inferior y el Sol.

Con la aparición del anteojo astronómico, observó el físico italiano en 1610 los *cuatro satélites principales de Júpiter*, que en miniatura reproducían al sistema heliocéntrico, y a partir de entonces se convirtió en su más fervoroso paladín. Por otra parte, las *fases de Venus* observadas también por primera vez por él, atestiguaban en forma irrefutable el movimiento de ese planeta alrededor del Sol.

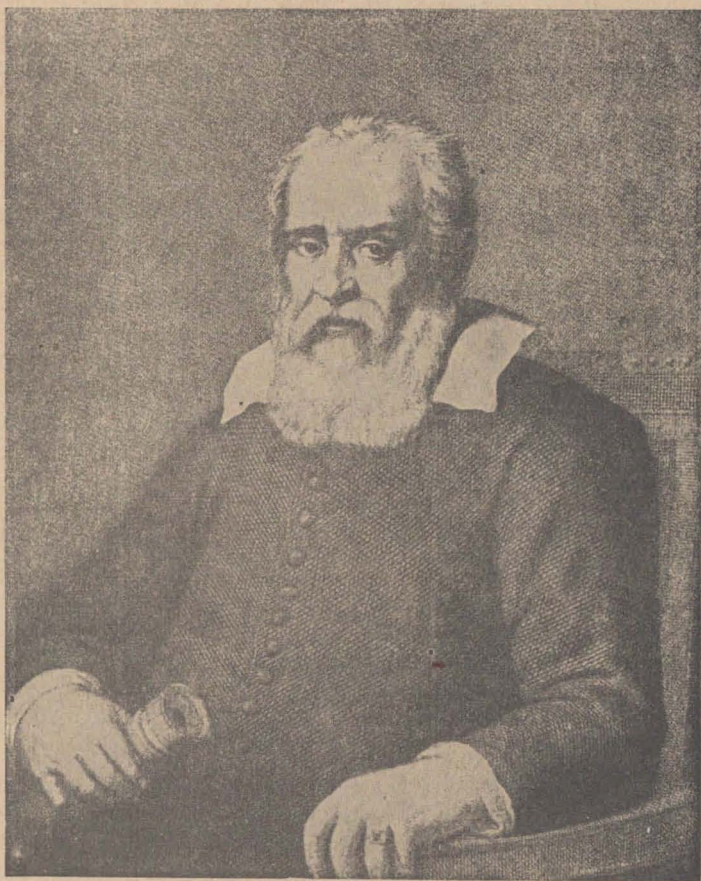


Fig. 163. — Galilei Galileo.

Casi al mismo tiempo que Galileo luchaba en Italia para imponer las nuevas ideas, KEPLER en Alemania enunciaba sus célebres leyes, basándose en las cuales, pudo NEWTON en 1686, crear la MECÁNICA CELESTE, demostrando que los astros se rigen en sus movimientos por los mismos principios que gobiernan los cuerpos en la superficie de la Tierra, logrando aprisionar, por decirlo así, en una fórmula que “cabe en el hueco de la mano”, los complicados movimientos celestes.

GRAVITACION UNIVERSAL

213. LEYES DE KEPLER. — El astrónomo alemán JUAN KEPLER (1571 - 1630), puede ser considerado como uno de los precursores de la Astronomía moderna, al establecer sus tres célebres leyes relativas a los movimientos de los planetas alrededor del astro central del sistema.



Fig. 164. — Juan Kepler.

Sucedió a TYCHO - BRAHE, de quien fué discípulo, en el cargo de matemático del emperador en Praga, dedicándose de inmediato a preparar tablas relacionadas a los movimientos planetarios, aprovechando en tal tarea las preciosas observaciones dejadas por su antecesor, las cuales, consideradas como las más precisas obtenidas hasta entonces, llevan a Kepler al convencimiento de que los recorridos de los planetas alrededor del Sol no podían ser circulares como lo afirmaba Copérnico en su sistema del mundo.

Aprovechando Kepler el hecho de ser MARTE un planeta que se acerca mucho a la Tierra, sigue al citado astro pacientemente en sus movimientos noche tras noche, anotando sus posiciones entre las estrellas para después de cálculos pesadísimos llegar a la conclusión de que su órbita no es una excéntrica, sino *una elipse en la cual el Sol ocupa un foco*.

En su obra "ASTRONOMÍA NOVA", publicada en Praga en 1609, ya aparecen las dos primeras leyes, cuyos enunciados damos a continuación:

PRIMERA LEY. — *Los planetas describen elipses en el sentido directo, ocupando el Sol uno de los focos (fig. 165).*

SEGUNDA LEY. — *Las áreas barridas por el radio vector de un planeta (recta que une los centros del planeta y el Sol) en su revo-*

lución alrededor del Sol, son proporcionales a los tiempos empleados en describirlas.

Dicha ley se enuncia también diciendo: *las áreas barridas por el radio vector de un planeta en tiempos iguales, son iguales.*

Sean, P_1 , P_2 , P_3 y P_4 , cuatro posiciones de un planeta sobre su órbita alrededor del Sol, y designemos por t_1 y t_2 a los tiempos empleados por el astro en los recorridos de los arcos P_1P_2 y P_3P_4 , respectivamente. Durante el tiempo t_1 , el radio vector del planeta habrá barrido el área A_1 (fig. 166), o sea, la del triángulo SP_1P_2 , y durante el tiempo t_2 , el área barrida será la del triángulo SP_3P_4 , designada por A_2 en la figura.

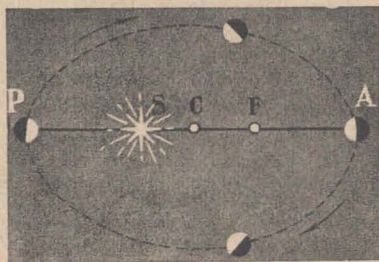


Fig. 165. — Primera ley de Kepler. (S. D.).

En conformidad con la segunda ley de Kepler, se tendrá:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{t_1}{t_2},$$

y en el supuesto de ser $t_1 = t_2$, resultará también: $A_1 = A_2$.

Se comprende en seguida como, de acuerdo con esta ley, la velocidad máxima del planeta en su revolución alrededor del Sol es alcanzada en el instante en que el astro pasa por el perihelio P , mientras la velocidad mínima corresponde al momento en que el planeta se ubica en el afelio A .

Diez años después de haber enunciado las dos leyes anteriores, encuentra Kepler su tercera ley, que se pasa a enunciar:

TERCERA LEY. — *Los cuadrados de los tiempos empleados por los planetas en describir sus órbitas,*

son proporcionales a las terceras potencias de sus distancias medias al Sol.

Si llamamos entonces d_1 y d_2 las distancias medias de dos planetas al Sol (uno de ellos puede ser la Tierra), y designamos además por T_1 y T_2 a los tiempos empleados por dichos astros en sus revoluciones alrededor del astro central, la expresión analítica de la tercera ley de Kepler será dada por:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{d_1^3}{d_2^3}.$$

La trascendencia de esta ley estriba en el hecho de que conociendo los tiempos de revolución del planeta alrededor del Sol, podrá calcularse con mucha aproximación su *distancia media* al mismo.

Para estos sencillos cálculos, se toma siempre como planeta de comparación a la Tierra, cuya distancia al Sol será la unidad adoptada para la medida de distancias planetarias, así como la unidad de tiempo será el año, o período de tiempo empleado por la Tierra en su revolución alrededor del Sol. *Por distancia media entendemos en este caso, a la semisuma de las distancias máxima y mínima, o sea, el semieje mayor de la órbita.*

La orgullosa satisfacción de Kepler, a raíz de haber enunciado tales leyes relativas a los movimientos planetarios, es puesta de manifiesto en pocas pero expresivas palabras, al finalizar uno de los párrafos de su obra "HARMONICIS MUNDI, LIBRI V" publicado en 1619: "DIOS MISMO HA ESPERADO DURANTE 6.000 AÑOS AL QUE DEBÍA INTERPRETAR SU OBRA".

214. ENUNCIADO GENERAL DE LA LEY DE NEWTON.

— Los trabajos de NEWTON relativos a la GRAVITACIÓN UNIVERSAL, están expuestos en su libro "PRINCIPIA", publicado en 1686, donde se enuncia la siguiente ley:

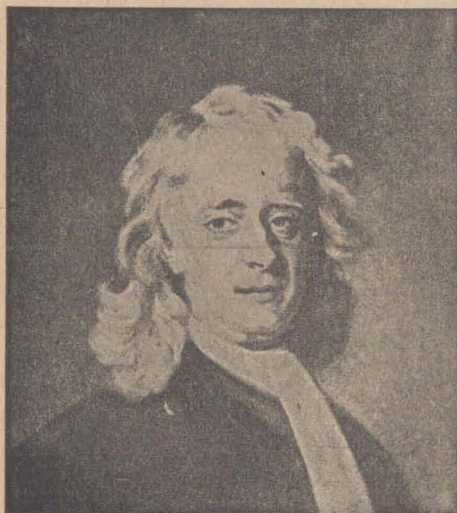


Fig. 167. — Isaac Newton.

Dos cuerpos cualesquiera, se atraen con una fuerza que es proporcional al producto de sus masas y que está en razón inversa con el cuadrado de la distancia que los separa.

Designando, pues, por M y m a las masas de dos cuerpos, y por d a la distancia entre los mismos, la expresión matemática de la fuerza con que mutuamente se atraen, estará dada por:

$$F = K \frac{Mm}{d^2},$$

donde K es la llamada *constante de gravitación* cuyo valor depende de las unidades elegidas en la medición de masas y distancias. Se puede definir a la constante de gravitación, como la *fuerza con que la unidad de masa atrae a otra igual, situada a la unidad de distancia.*

En el sistema C. G. S. su valor es dado por:

$$K = 6,66 \cdot 10^{-8},$$

según medidas que mencionaremos en su lugar (216).

215. MASAS DE LOS ASTROS. PERTURBACIONES. — Los verdaderos movimientos planetarios son mucho más complejos que los previstos por las leyes de Kepler, cuya validez es sólo aproximada.

El recorrido real de un cuerpo del sistema solar, es resultado de los efectos producidos sobre su trayectoria por las acciones de todos los demás astros del sistema. La solución rigurosa de este problema está lejos aun de ser obtenida, ni siquiera para el caso de tres astros, como ser el Sol, la Tierra y la Luna. Sin embargo, se obtienen por aproximaciones sucesivas, resultados que permiten reproducir las órbitas planetarias con mucha exactitud.

*** 216. DETERMINACION DE LA CONSTANTE K DE GRAVITACION.** — Una de las consecuencias más trascendentales de la ley de Newton, es la que conduce a la determinación de las masas de los astros integrantes del sistema solar y por extensión a las de otros muchos astros del Universo, cuando forman sistemas físicos como el de las estrellas dobles o múltiples.

Entre los muchos métodos empleados para la determinación de la constante K , pasamos a exponer brevemente el de RICHARZ y KRIGAR MENZEL, que no es más que una modificación del procedimiento ideado anteriormente por JOLLY.

Lo mismo que éste, los físicos nombrados utilizan en sus mediciones una balanza (fig. 168), pesando a un mismo cuerpo C , primero en el platillo P_1 situado arriba de una gran esfera de plomo E de unas 100 toneladas de peso, y después en el platillo P_2 ubicado debajo de la misma, y suspendido por un hilo h que la atraviesa centralmente.

Al pesar el cuerpo en el platillo P_1 el peso del mismo p_1 , es la suma de las atracciones A y a ejercidas por la Tierra y la esfera de plomo, respectivamente, mientras que al pesarlo en el platillo P_2 el peso acusado p_2 , es la diferencia de dichas atracciones, teniéndose en consecuencia:

$$p_1 = A + a,$$

$$p_2 = A - a,$$

de las cuales sacamos por diferencia:

$$p_1 - p_2 = 2a. \quad [1]$$

Según la ley de Newton, si la masa de la esfera de plomo es M y la del cuerpo C es m , el valor de a estará dado por:

$$a = K \frac{Mm}{d^2},$$

donde d es la distancia común que separa al cuerpo C del centro de la esfera E en ambas pesadas. De la última fórmula obtenemos:

$$K = a \frac{d^2}{Mm},$$

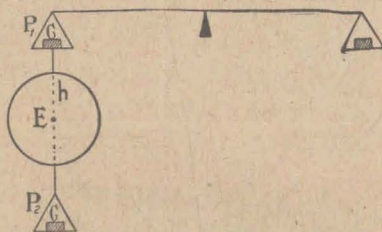


Fig. 168. — Determinación de la constante K de gravitación.

o lo que es lo mismo teniendo en cuenta la [1]:

$$K = \frac{p_1 - p_2}{2} \cdot \frac{d^2}{Mm}.$$

Existen otros métodos más precisos para determinar esta constante. Hemos elegido el que precede por la simpleza de su teoría aun cuando las determinaciones no son tan sencillas como podría pensarse, ya que las pesadas se deben efectuar con alta precisión.

217. DESCUBRIMIENTOS DE URANO, NEPTUNO Y PLUTON.—Hasta fines del siglo XVIII, sólo eran conocidos desde la antigüedad más remota, los planetas MERCURIO, VENUS, MARTE, JÚPITER y SATURNO. Posteriormente el Sistema Solar fué amplificándose con los descubrimientos de URANO, NEPTUNO y PLUTÓN, así como el de numerosos asteroides, de los cuales los primeros en ser localizados fueron CERES, PALLAS, JUNO y VESTA.

1º DESCUBRIMIENTO DE URANO.—Este planeta fué descubierto el 13 de marzo de 1781 en la constelación zodiacal de los GEMELOS (GEMINI) por el astrónomo alemán FEDERICO GUILLERMO HERSCHEL a quien, a raíz de tal descubrimiento, se le llamó el "Cristóbal Colón del Cielo".

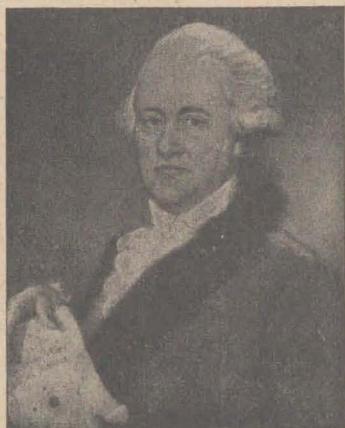


Fig. 169. — Federico Guillermo Herschel.

En un principio se le creyó un cometa de órbita muy excéntrica, como la de todos estos astros, pero al comprobarse el error, propuso Herschel el nombre de "THE GEORGIAN" en honor de su protector el rey JORGE III de Inglaterra. Posteriormente insinuó LAGRANGE el nombre del descubridor para el nuevo planeta, predominando después el de URANO propuesto por BODE en correspondencia con la serie de nombres mitológicos asignados a los demás planetas.

Se le dió el signo $\♄$. Brilla en la esfera celeste como una estrella de 6ª magnitud, por lo cual es difícil percibirlo a ojo desnudo.

2º DESCUBRIMIENTO DE NEPTUNO.—Las perturbaciones observadas en el movimiento de *Urano* a principios del siglo XIX, indujeron al astrónomo francés BOUVARD a publicar en París en 1821 unas tablas relativas a los movimientos de *Júpiter*, *Saturno* y *Urano*, donde quedaba de manifiesto que las órbitas de los dos primeros estaban en un todo de acuerdo a las previsiones de la ley de la gravitación universal, no ocurriendo otro tanto con la de *Urano*.

BESSEL en 1823, presagió a raíz de ello la existencia de un planeta desconocido como causa de las perturbaciones de *Urano*, y FLEMMING, su discípulo, pretende localizarlo por el cálculo, fallando en su intento al sorprenderlo la muerte.

Dos décadas después, el éxito coronó los esfuerzos del astrónomo francés URBANO JUAN JOSÉ LEVERRIER (1811 - 1877), quien aconsejado por su amigo ARAGO, se dedicó a los cálculos destinados a



Fig. 170. — Movimiento de Plutón entre las estrellas.

localizar al presunto astro perturbador. En setiembre de 1846, invita al astrónomo GALLE, de Berlín, a buscar telescópicamente al planeta desconocido, cuyas coordenadas había deducido utilizando las tablas de BOUVARD, esmeradamente corregidas.

En la noche del 23 de setiembre de 1846, GALLE, en presencia del astrónomo D'ARREST, encontró en el huso celeste, correspondiente a las 21 horas de ascensión recta, en la constelación de CAPRICORNIO, un astro aun no catalogado en las cartas celestes, comprobando en la noche siguiente su desplazamiento entre las estrellas cercanas. Las coordenadas del nuevo astro apenas si diferían en 1° de las calculadas por Leverrier, basándose en la ley de Newton, la cual logra así la más sensacional de sus comprobaciones.



Fig. 171. — Alberto Einstein. Nacido en 1879.

Es digno de mención el hecho de que tres años antes, es decir, en 1843, un estudiante de CAMBRIDGE, ADAMS, había llevado a cabo cálculos semejantes a los de Leverrier, de cuyos resultados informó a su profesor el astrónomo AIRY, para que éste tratara de localizar

en el Cielo al probable planeta individualizado por dichos cálculos. Desgraciadamente para ADAMS, AIRY algo incrédulo en aquellos resultados, fué postergando las prometidas observaciones dando tiempo a que Leverrier se le adelantase.

El signo de Neptuno es el tridente Ψ . Brilla en el Cielo como una estrella de 8ª magnitud y por lo tanto es invisible a simple vista.

3º DESCUBRIMIENTO DE PLUTÓN. — El más lejano de los planetas del Sistema Solar, fué descubierto por SLIPHER del Observatorio de LOWELL al comparar entre sí una serie sistemática de fotografías de una región celeste situada en la constelación de los Gemelos.

Dicho astrónomo había sido encargado por la dirección del nombrado Observatorio, para tomar periódicamente fotografías de determinadas zonas del Cielo, a objeto de individualizar uno o más planetas ultraneptunianos previstos por los cálculos del Dr. PERCIVAL LOWELL, ex director del Observatorio, muerto en 1916. La existencia de tales planetas se sospechaba desde algunas décadas antes y ya habían tratado de captarlos inútilmente, auxiliados por el cálculo, además de Lowell, los astrónomos TODD, FORBES y W. H. PICKERING.

Plutón brilla en el Cielo como estrella de 15ª magnitud, siendo sólo observable fotográficamente. Se le designa por PL.

* 218. TEORIA DE LA GRAVITACION DE EINSTEIN. — En 1915 A. EINSTEIN logró dar una explicación de la gravitación suponiendo que el espacio que rodea a toda masa gravitacional tiene una estructura geométrica especial, diferente al espacio de la geometría de Euclides. En ese espacio curvo los planetas se ven obligados a describir sus órbitas, no por la acción de una fuerza atractiva, sino por la misma curvatura del espacio. En los resultados, ambas teorías, la de la fuerza atractiva y la de la estructura geométrica, casi coinciden. Las diferencias son insignificantes y las observaciones han confirmado hasta hoy las previsiones de la teoría de la relatividad generalizada (que así también se le llama) de Alberto Einstein.

GENERALIDADES SOBRE EL SISTEMA SOLAR

219. SISTEMA SOLAR. — Está constituido por todos aquellos astros sobre los cuales se manifiesta directamente la acción gravitatoria del Sol.

COPÉRNICO, KEPLER y NEWTON consideraron al Sistema Solar como integrado por el Sol, en su calidad de astro central, y luego los grandes planetas que describen órbitas elípticas a su alrededor.

En la actualidad, dicho concepto ha debido amplificarse incluyendo otros muchos astros desconocidos para aquellos observadores, y que al igual que los grandes planetas regulan sus movimientos en el espacio en conformidad con las acciones ejercidas sobre sus respectivas masas por el astro central.

El Sistema Solar, en su concepción actual está formado por:

1º *El Sol* o astro central del conjunto.

2º Los grandes *planetas*, en número de 9, que por orden de distancias crecientes al Sol son: MERCURIO, VENUS, TIERRA, MARTE, JÚPITER, SATURNO, URANO, NEPTUNO y PLUTÓN.

3º *Los satélites* o astros que describen órbitas alrededor de los planetas desplazándose con éstos alrededor del Sol (caso de la Luna).

4º Gran número de pequeños planetas conocidos bajo la denominación de *asteroides* o *planetoides*, cuyas órbitas alrededor del Sol están comprendidas en su gran mayoría entre las de Marte y Júpiter.

5º *Los cometas y meteoritos* en número desconocido, que también se desplazan regidos por la acción gravitatoria del Sol.

220. DISTANCIAS MEDIAS DE LOS PLANETAS AL SOL: LEY NUMERICA DE TITIUS O BODE. — Las distancias medias al Sol de los 9 grandes planetas conocidos en la actualidad oscilan entre límites tales, que imposibilitan presentar en un pequeño espacio un gráfico que los muestre sobre sus respectivas órbitas en una cierta escala. Si representamos, p. ejm., a la órbita de *Mercurio* por una circunferencia de 1 cm. de radio, la de *Plutón* estaría dada por otra de un metro.

El profesor TITIUS, de Wittemberg, formuló en 1766 una ingeniosa combinación numérica, dada a conocer más tarde por BODE, por la cual podían obtenerse con mucha aproximación las distancias medias al Sol de los planetas conocidos hasta ese entonces, tomando como unidad de medida la distancia Sol-Tierra. Los descubrimien-

tos posteriores de *Urano* en 1781, y de los primeros asteroides a principios del siglo XIX, confirmaron las predicciones de Titius, pero éstas fallaron posteriormente al descubrirse los planetas *Neptuno* y *Plutón*, cuyas distancias al Sol distan mucho de las previstas



Fig. 172. — Distancias al Sol de Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Asteroides y Júpiter.

por la combinación numérica mencionada. Sea la serie numérica: 0; 3; 6; 12; 24; 48; 96; 192; 384; 768; ... etc. donde los distintos términos, a excepción del primero, están en progresión geométrica de razón 2.

Si sumamos 4 a cada uno de esos números y dividimos por 10 las sumas obtenidas, tendremos la siguiente sucesión:

0,4; 0,7; 1; 1,6; 2,8; 5,2; 10; 19,6; 38,8; 77,2; ... etc.

Los 4 primeros términos expresan, en la unidad antes citada, y con gran aproximación las distancias reales al Sol de los 4 planetas más cercanos, *Mercurio*, *Venus*, *Tierra* y *Marte*, pasando otro tanto con los números 5,2 y 10 correspondientes a *Júpiter* y *Saturno*. El descubrimiento de *Urano*, cuya distancia media al Sol es de 19,2, llenó con mucha aproximación el 8º término de la serie numérica, y el de los primeros asteroides, *Ceres*, *Pallas* y *Vesta*, cubrió la laguna que se notaba en el 5º término, o sea 2,8.

En 1846, al descubrirse el planeta *Neptuno*, pudo observarse la primera falla fundamental de la ley de Titius o Bode, ya que la

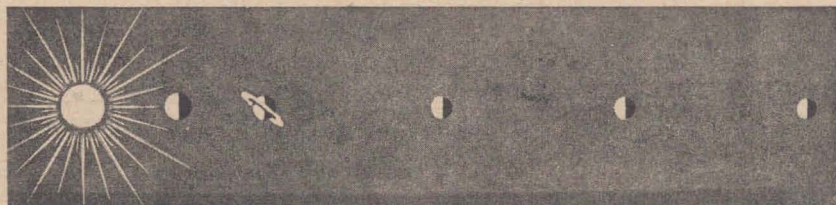


Fig. 173. — Distancias al Sol de Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón.

distancia al Sol de este planeta es de 30,1 en lugar de 38,8. Más tarde, al calcularse la distancia media al Sol de Plutón, se encontró 39,46, mientras que la citada ley le asignaba el valor 77,2, es decir, casi el doble.

El siguiente cuadro demuestra la mayor o menor aproximación entre las distancias al Sol asignadas por la combinación numérica de Titius y las distancias reales obtenidas por la observación, representadas en escala por las figuras 172 y 173.

DISTANCIAS MEDIAS DE LOS PLANETAS AL SOL

PLANETA	Ley de Titius o Bode	Distancia real
Mercurio	0,4	0,39
Venus	0,7	0,72
Tierra	1	1
Marte	1,6	1,52
Asteroides	2,8	1,5 a 5,3
Júpiter	5,2	5,2
Saturno	10	9,55
Urano	19,6	19,22
Neptuno	38,8	30,11
Plutón	77,2	39,52

* 221. PLANETAS INFERIORES Y SUPERIORES. ELONGACION: CONJUNCION, OPOSICION Y CUADRATURAS. — Los planetas se han dividido en 2 grupos, según que sus distancias al Sol sean menores o mayores que la distancia Sol-Tierra.

Al primer grupo, *planetas inferiores*, pertenecen *Mercurio y Venus*, mientras el segundo, *planetas superiores*, está integrado por *Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón*.

Durante las revoluciones planetarias alrededor del Sol, el ángulo formado por las visuales dirigidas desde la Tierra a uno cualquiera de ellos y al astro central, va tomando valores variables, que, para los planetas superiores puede alcanzar los 180° y para los inferiores no llega nunca a 90° .

En general se llama *elongación* λ de un planeta con respecto al Sol, a la diferencia entre las *longitudes* de los dos astros.

Si $\lambda = 0^\circ$ hay conjunción (♄), en cuyo caso el planeta y el Sol, culminan aproximadamente al mismo tiempo*.

Si $\lambda = 180^\circ$ hay oposición (♅), es decir, que cuando el Sol culmina en el semimeridiano superior, el planeta lo hace aproximadamente en el semimeridiano opuesto o recíprocamente.

Si $\lambda = 90^\circ$ hay cuadratura (♁) en cuyo caso el planeta culmina alrededor de 6 horas antes o después de hacerlo el Sol.

* Decimos "aproximadamente", porque la diferencia λ entre las longitudes no es igual, en general, a la diferencia entre las ascensiones rectas.

222. CONJUNCION DE PLANETAS INFERIORES. DIGRESION. — Los planetas inferiores, *Mercurio* y *Venus*, sólo presentan, durante cada revolución alrededor del Sol, dos conjunciones llamadas *conjunción inferior* y *conjunción superior*, respectivamente. En la figura 174, se ha ubicado al planeta *Venus* en 4 posiciones especiales sobre su órbita, suponiendo a la misma coincidiendo con el plano de la eclíptica, y considerando fijos al Sol y a la Tierra en T.

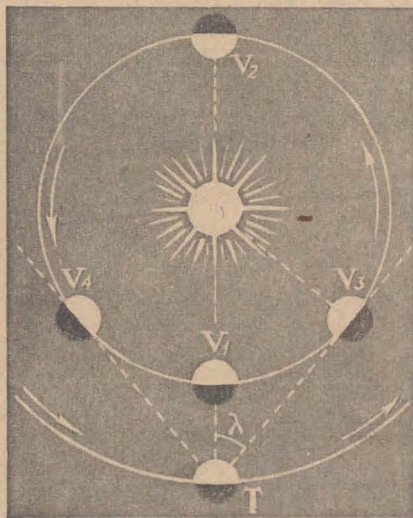


Fig. 174. — Conjunciones y digresión de un planeta inferior. (N. D.).

En la posición V_1 , el planeta está en *conjunción inferior* ubicándose a la mínima distancia de la Tierra, por cuya razón su diámetro aparente adquiere el valor máximo.

En la posición V_2 , *conjunción superior*, la distancia del planeta a la Tierra alcanza su valor máximo, siendo mínimo el diámetro aparente del astro.

La figura demuestra, que el planeta inferior jamás alcanza a tener la elongación $\lambda = 90^\circ$, por lo cual nunca podrá colocarse en oposición ni en cuadraturas.

Se llama *digresión* de un planeta inferior, al valor máximo de su elongación. Se la puede calcular fácilmente de la fi-

gura en el supuesto antes apuntado de que la órbita del planeta coincide con el plano de la eclíptica, respecto al cual en realidad está poco inclinada.

Considerando al planeta en V_3 sobre la tangente trazada a su órbita desde la Tierra, la *elongación máxima* o *digresión* dada por el ángulo λ la deducimos del triángulo TV_3S (designamos por S al centro del Sol), rectángulo en V_3 . Se tendrá:

$$\text{sen } \lambda = \frac{SV_3}{ST} = \frac{0,72}{1},$$

de la cual deducimos como valor de la digresión de Venus:

$$\lambda = 46^\circ \text{ (aprox.)}.$$

Repitiendo este cálculo para Mercurio cuya distancia al Sol es de 0,4 encontraríamos como digresión de este planeta, $\lambda = 29^\circ$ (aprox.).

Estas digresiones, demuestran que *Venus* y *Mercurio* aparecen en la esfera celeste siempre próximos al Sol, y que el primero, en el mejor de los casos, es visible a nuestra latitud como astro matutino

desde unas 3 horas antes de la salida del astro del día, y como astro vespertino hasta 3 horas después de la puesta del Sol. En cuanto a Mercurio ese tiempo en análogas condiciones se reduce a menos de 2 horas, siendo precaria su visibilidad por su cercanía al Sol.

Las mejores épocas para la observación de los planetas inferiores, son las de sus digresiones, puesto que en las conjunciones inferiores son invisibles por presentar frente a la Tierra el hemisferio no iluminado por el Sol, y en las conjunciones superiores a pesar de presentarnos la cara iluminada, la visibilidad es muy deficiente en razón de sus vecindades al Sol, cuyo brillo eclipsa al de los planetas.

223. CONJUNCION, OPOSICION Y CUADRATURAS DE PLANETAS SUPERIORES. —

Los planetas superiores, tal como Júpiter (fig. 175), pueden tomar todas las elongaciones con respecto al Sol, pasando por una *conjunción* J_1 , una *oposición* J_2 y dos *cuadraturas* J_3 y J_4 , una a oriente y la otra a occidente del Sol. En las oposiciones (supuestos los planetas en el plano de la eclíptica del cual se alejan poco), se colocan a la *mínima distancia de la Tierra* y en las conjunciones a la *máxima*, existiendo entre ambas distancias una diferencia de 2 unidades astronómicas (u. a.) o sea el duplo de la distancia Sol - Tierra, en el supuesto caso de que las órbitas fueran circulares. En razón de poder tomar los planetas superiores todas las elongaciones, *podrán ser observados a toda hora de la noche*, cuando durante ella se encuentren en el semiespacio superior al horizonte del lugar.

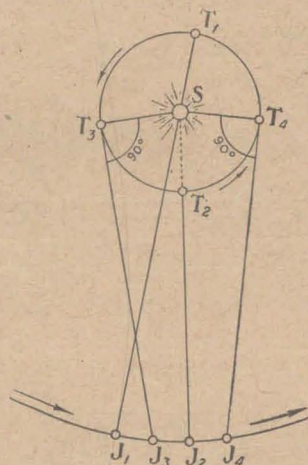


Fig. 175. — Conjunción, oposición y cuadraturas de Júpiter. (N. D.).

La mejor época para observarlos en las bajas latitudes terrestres, es la de la oposición en que culminan cerca de medianoche.

* 224. **FASES DE LOS PLANETAS.** — Si se observan los planetas más cercanos a la Tierra con un antejo de regular potencia, se notará en seguida que se presentan como pequeños discos con diámetros aparentes susceptibles de apreciación, por cuyo motivo mientras cumplen sus revoluciones alrededor del Sol, suelen presentar fases muy parecidas a las que nos ofrece la Luna.

Las fases de Venus que pasamos a estudiar, fueron descubiertas por Galilei Galileo.

En la figura 176 se muestra al planeta en 8 posiciones sobre su órbita, alrededor del Sol. En V_1 , *conjunción inferior*, Venus enfrenta a la Tierra T supuesta fija, su hemisferio oscuro, siendo

en consecuencia invisible; en V_2 y V_8 se muestra al observador

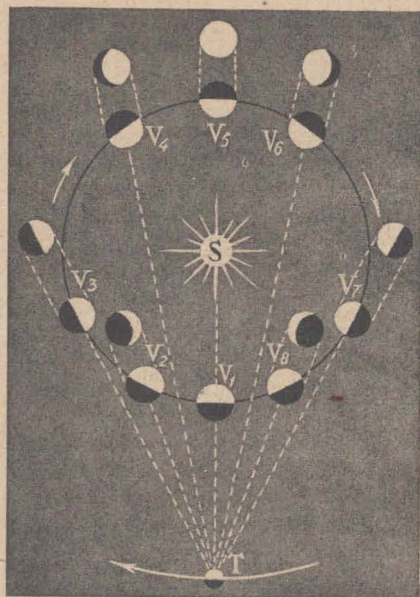


Fig. 176. — Explicación de las fases de Venus. (S. D.).

terrestre como una hoz iluminada; en V_3 y V_7 , es decir, en las *digresiones*, se alcanza a divisar la mitad del disco; en V_4 y V_6 , más de la mitad en forma de lente biconvexa, y por fin en V_5 , conjunción superior, ya es visible todo su disco por enfrenar a la Tierra el hemisferio iluminado por el Sol. Como podrá apreciarse, la parte visible del disco, crece desde la conjunción inferior hasta la superior, y decrece desde ésta a aquélla.

Las fases de Venus, como así también las de Mercurio, son *completas* (fig. 177), y análogas en un todo a las de la Luna, aun cuando las del último planeta citado son poco perceptibles debido a su cercanía al Sol, y también a su menor diámetro aparente, magnitud ésta, que para Venus alcanza a los 61" en la conjunción inferior

para descender a poco menos de 10" en la conjunción superior.

Los planetas inferiores adquieren su mayor brillo cuando se en-

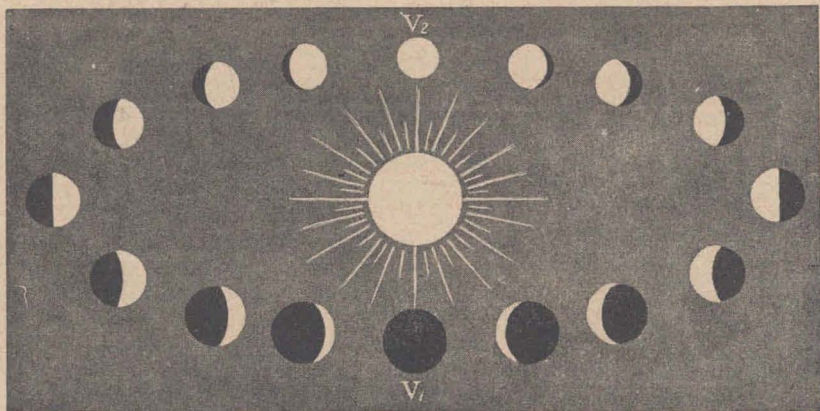


Fig. 177. — Fases de Venus.

cuentran entre la conjunción inferior V_1 y una de sus digresiones V_3 y V_7 .

FASES DE PLANETAS SUPERIORES. — Los más próximos de estos planetas, es decir, *Marte* y *Júpiter*, presentan fases incompletas debido a que enfrentan a la Tierra durante sus revoluciones, todo, o gran parte del hemisferio iluminado por el Sol tal cual lo muestra la fig. 178.

* 225. **ORBITAS PLANETARIAS: PERIHELIO Y AFELIO; NODOS; PASOS DE MERCURIO Y VENUS.** — Los planetas, al igual que la Tierra, describen órbitas elípticas alrededor del Sol, siguiendo como aquella la ley de las áreas, llamándose *perihelio* al punto de la órbita más cercano al Sol y *afelio* al más alejado.

Los planos de tales órbitas, salvo para el último planeta descubierto, o sea *Plutón*, están poco inclinados con respecto al de la eclíptica, de modo que siempre se encuentran en la zona del zodiaco.

Resultará entonces, en razón de esas inclinaciones, que durante el período de una revolución planetaria alrededor del Sol, el planeta se ubicará dos veces en el plano de la eclíptica en los puntos llamados nodos, de los cuales uno es *nodo ascendente*

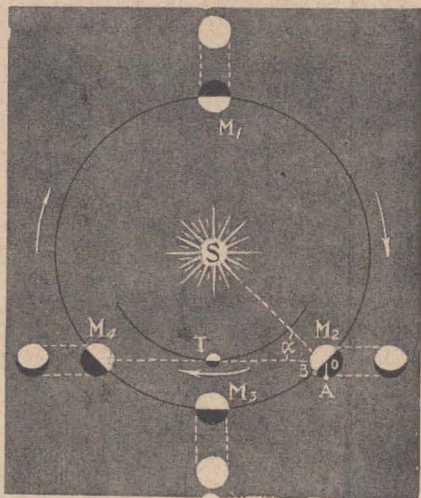


Fig. 178. — Fases de Marte. (S. D.).

(Ω) y el otro *nodo descendente* ($\oslash$). En el primero de estos puntos, el planeta atraviesa la eclíptica marchando de Sur a Norte, y en el último en sentido inverso.

Los nodos de los planetas inferiores *Mercurio* y *Venus*, adquieren particular importancia para el caso de que durante una conjunción inferior el astro se encuentre en uno de esos puntos, o muy próximo al mismo, pues al verificarse ello, la Tierra, el planeta y el Sol quedarán alineados, y el observador terrestre verá al planeta inferior desfilarse como un pequeño disco oscuro sobre el círculo luminoso del Sol, siguiendo una de sus cuerdas (figura 179).

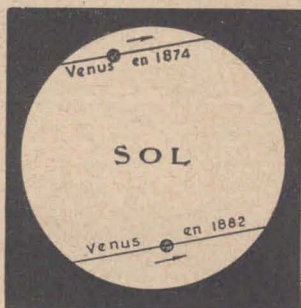


Fig. 179. — Pasos de Venus.

226. REVOLUCION SINODICA Y SIDERAL DE LOS PLANETAS. — Se llama *revolución sinódica* de un planeta al tiempo que transcurre entre dos conjunciones consecutivas del mismo nombre con respecto al Sol.

Revolución sideral de un planeta, es el tiempo que invierte el mismo en describir su órbita alrededor del Sol, o lo que es lo mismo, el tiempo en que la recta que une los centros del planeta y del Sol (*radio vector*) da un giro completo con relación a las estrellas.

Ambas revoluciones son de duraciones distintas, ya que la revolución sinódica depende en parte de los desplazamientos del Sol sobre la eclíptica, mientras que la revolución sideral es independiente de los mismos al ser referida a puntos fijos de la esfera celeste cual lo son con gran aproximación las estrellas.

DETERMINACIÓN DE LA REVOLUCIÓN SINÓDICA. — Se puede obtener con toda aproximación la revolución sinódica de un planeta, tomando los instantes de dos conjunciones de igual nombre con el Sol, muy espaciadas entre sí, y dividiendo el lapso transcurrido entre esos instantes, por el número de revoluciones sinódicas verificadas entre uno y otro.

Como se comprenderá, el resultado será tanto más exacto, cuanto mayor sea el espacio de tiempo comprendido entre las conjunciones consideradas.

El período de revolución sinódica es, pues, variable.

En el cuadro siguiente, anotamos los tiempos que invierten los distintos planetas del sistema solar en cumplir sus revoluciones sinódicas y siderales. Consignamos también, en el mismo, el número de días en que el planeta se desplaza en el Cielo en el sentido directo y el número de días en que lo hace en sentido retrógrado dentro de cada revolución sinódica media.

TIEMPOS DE REVOLUCIONES PLANETARIAS

PLANETAS	Revolución sinódica media	Revolución sideral		Movimiento directo medio	Retrogradaciones medias
		Años	Días		
Mercurio	116 días	—	88	93 días	23 días
Venus	584 „	—	225	542 „	42 „
Marte	780 „	1	321	707 „	73 „
Júpiter	399 „	11	315	278 „	121 „
Saturno	378 „	29	166	239 „	139 „
Urano	370 „	84	—	219 „	151 „
Neptuno	368 „	164	280	210 „	158 „
Plutón	366,8 „	247	256	202 „	165 „

227. RADIO, SUPERFICIE Y VOLUMEN DE LOS PLANETAS. — Los volúmenes de los nueve planetas principales del Sistema Solar son muy variados, pudiéndose considerar a la Tierra como uno de los pequeños. La figura 180 muestra en escala los discos planetarios y en el cuadro de la pág. 264 se encontrarán los valores comparados de los radios volúmenes, etc., de los mismos.

228. SATELITES DE LOS PLANETAS, ECLIPSES Y OCULTACIONES. — Varios de los planetas del Sistema Solar son acompañados en sus traslaciones alrededor del Sol por uno o más astros de menores masas, formando a veces, como en los casos de Júpiter y Saturno, verdaderos sistemas físicos análogos al Sistema Solar, aun cuando de dimensiones más reducidas. Esos pequeños astros o satélites, se trasladan alrededor del respectivo planeta y rotan al mismo tiempo sobre sí mismos, en la forma que lo hace la Luna. Todos ellos

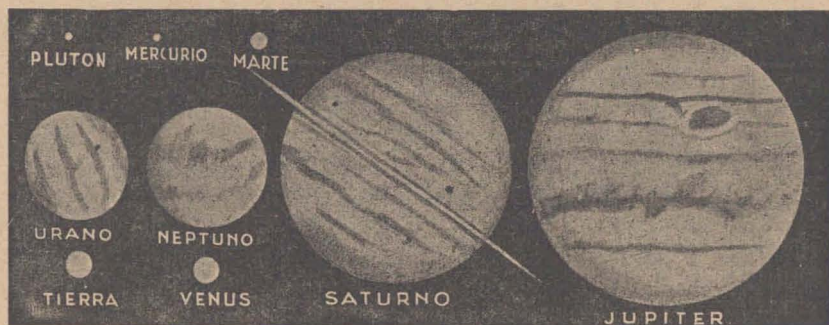


Fig. 180. — Dimensiones comparadas de los nueve planetas primarios.

(salvo la Luna), no son visibles a ojo desnudo, apareciendo ante el telescopio, poco menos que como puntos luminosos, debido a sus pequeñas dimensiones y a las distancias que los separan de la Tierra.

Los satélites son cuerpos opacos, de forma más o menos esférica, iluminados por el Sol, cuya luz reflejan. Los de un mismo planeta se mueven en planos poco inclinados entre sí, aconteciendo con ellos algo parecido a lo ya visto con respecto a los planos de las órbitas planetarias. Los planetas inferiores Mercurio y Venus, no tienen satélite alguno conocido; en cambio, la Tierra y los planetas superiores con excepción de Plutón, tienen uno o más. El satélite de la Tierra, o sea, la Luna, fué estudiado en el libro IV; Marte tiene dos; Júpiter, nueve; Saturno, diez; Urano, cuatro y Neptuno, uno. Como se comprenderá, estos números no son absolutos, pues la pequeñez de tales astros y sus distancias a la Tierra pueden ser causas de que algunos de tales cuerpos escapen a los medios de observación actuales. Uno de los diez satélites de Saturno, *Themis*, después de haber sido descubierto y estudiado por Pickering en 1905, no ha vuelto a ser captado en lo sucesivo. En algunos casos los satélites suelen penetrar en la sombra proyectada por el planeta eclipsándose al igual que nuestra Luna; en otros producen sobre el planeta eclipses de Sol al interponerse entre los dos astros y proyectar sobre el primero sus conos de sombras, y por fin, en ocasiones al penetrar en el cono circunscrito al planeta y a la Tierra, pueden ocultarse detrás de aquél, o bien pasar como puntos oscuros frente al disco del planeta, dando lugar en menor escala a fenómenos parecidos a los pasos de Mercurio y Venus frente al Sol.

CAPITULO CUARTO

MONOGRAFIA DE LOS PLANETAS *

MERCURIO (8)

* 229. **BRILLO.** — Debido a su pequeña digresión se le puede ver entre las brumas del crepúsculo antes de la salida o después de la puesta del Sol, como un astro de 1ª magnitud.

Dedujo MÜLLER, a raíz de prolongadas observaciones, que el brillo máximo de Mercurio es igual al de Sirio, o sea, al de la estrella más brillante del Cielo. Este brillo equivale al de nueve estrellas tipos de 1ª magnitud, pero es muy cambiante debido, en primer lugar, a las fases del planeta, y en segundo, a la variación de distancia a la Tierra. Se ha observado que aun en una misma fase, el brillo de Mercurio no es siempre el mismo en razón de las variaciones de distancias al Sol motivadas por la gran excentricidad de su órbita.

Existen grandes analogías entre estas variaciones de brillo y las de la Luna, por lo cual se ha supuesto que la estructura del suelo de dicho planeta es análoga al de aquélla.

El **ALBEDO** de Mercurio, o sea, *la relación entre la luz reflejada difusamente y la luz recibida del Sol*, es muy pequeño, habiéndosele calculado en 0,07.

ATMOSFERA. — De la coincidencia encontrada por MÜLLER entre las variaciones de brillo de Mercurio y la Luna, parece deducirse que el planeta, al igual que el satélite de la Tierra carece de atmósfera, o que de tenerla sería poco densa y de espesor inapreciable. Sin embargo, algunos astrónomos, basados en observaciones visuales y sobre todo en otras espectroscópicas, afirman la existencia de una atmósfera envolvente de considerable densidad.

TOPOGRAFIA. — Es muy difícil, dadas las condiciones precarias de observación de este planeta, que sólo puede ser visto en las cercanías del horizonte donde las corrientes de nuestra atmósfera quitan nitidez a las imágenes telescópicas, dar datos seguros sobre la configuración del suelo de Mercurio. A pesar de todo, ciertas observaciones telescópicas obtenidas en condiciones muy favorables, han evidenciado la existencia de manchas oscuras y brillantes,

* Los datos de carácter general para éste y demás planetas del Sistema Solar van consignados en las dos tablas o cuadros con que finaliza este capítulo.

pero tan esfumadas que todo cuanto se afirme sobre su estabilidad y significado no tiene mayor consistencia.

ROTACION. — No habiendo manchas permanentes sobre el disco de Mercurio, la presunta rotación del planeta ha quedado hasta ahora indeterminada.

TEMPERATURA REINANTE. — Dada su cercanía al Sol, la intensidad luminosa y calorífica de los rayos solares que inciden sobre la superficie del planeta es muy grande, calculándose en 6,25 veces mayor que la de los mismos al incidir sobre la Tierra.

Debido a las elevadas temperaturas, el vapor de agua, en caso de existir, no alcanza a condensarse, de lo cual se podría deducir la completa aridez del suelo de Mercurio, el que aparecería bajo el aspecto de una roca calcinada donde las condiciones de vida para los seres orgánicos serían poco menos que imposibles.

VENUS (♀)

* 230. **BRILLO.** — Después del Sol y de la Luna, es el astro más luminoso de todo el Cielo *. El máximo de brillo, debido a las fases, lo alcanza el planeta unos 35 días antes de la conjunción inferior, para disminuir después paulatinamente hasta llegar a dicha posición e iniciarse el ascenso correspondiente. Durante ese período, Venus aparece alejado del Sol, y en condiciones atmosféricas favorables podrá ser visto aun de día, alcanzando a brillar en cierta altura de tal período, como una estrella de magnitud $-4,3$ equivalente en brillo a 120 estrellas tipo de 1^a magnitud.

Las variaciones en brillo de Venus y Mercurio presentan notables discrepancias, lo que permite afirmar la poca similitud entre las superficies de ambos planetas.

El *albedo* de Venus es 0,59, es decir, que el planeta refleja el 59 por ciento de la luz recibida del Sol, valor éste muy considerable y que hace suponer en la atmósfera del planeta la existencia de numerosas nubes blancas parecidas a las de la Tierra.

ATMOSFERA. — Puede darse por comprobada la existencia de una atmósfera en Venus. Se ha podido observar en efecto, que cuando Venus durante las fases se presenta como una hoz, el borde del planeta más alejado del Sol aparece débilmente iluminado, es decir, que puede verse entonces toda la periferia del planeta como circundada por una aureola luminosa. La misma aureola ha sido observada en algunos pasos del planeta frente al Sol, cuando aquél sólo ha penetrado en parte en su disco, apareciendo entonces la porción exterior de Venus envuelta en un arco débil de luz (fig. 181).

* Se le ha llamado Phosphorus, Héspero, Véspero, Estrella matutina, Estrella vespertina, Lucero de la tarde, etc.

El análisis espectroscópico ha permitido comprobar que la atmósfera de Venus no ejerce gran poder absorbente sobre la luz que la atraviesa, y que además la luz reflejada por el planeta no revela la existencia de nuevas rayas con respecto a las del espectro normal del Sol. De todo ello parece deducirse una cierta semejanza entre las atmósferas de Venus y la Tierra.

Otros estudios también de carácter espectroscópico verificados por

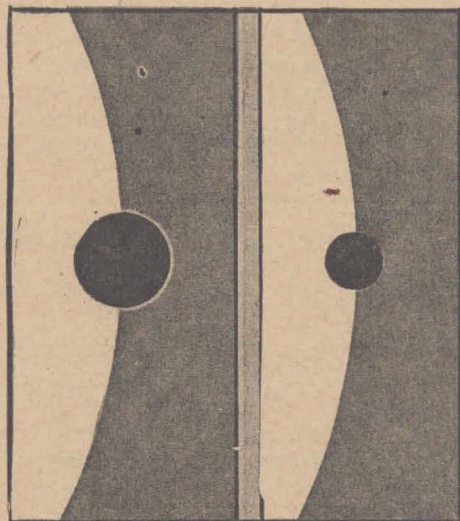


Fig. 181. — Aureola luminosa observada en algunos pasos de Venus y que se atribuye a su atmósfera envolvente. A la derecha: el planeta Mercurio en un paso sin presentar el fenómeno apuntado.

astrónomos del Observatorio de Mount Wilson, no acusan en los espectros obtenidos las bandas de absorción que provocan el oxígeno y el vapor de agua, de modo que de existir estos cuerpos en la atmósfera de Venus lo serían en proporciones muy reducidas comparadas con las cantidades existentes en la atmósfera terrestre.

En el año 1932, WILD pudo comprobar por medio del espectro, que la atmósfera de Venus está muy cargada de gas carbónico, como lo revelan tres bandas características de absorción que aparecen en la zona del infrarrojo. Se ha calculado por la intensidad de tales bandas, que el gas carbónico en la atmósfera de este planeta abunda más que el oxígeno en la atmósfera terrestre.

TOPOGRAFIA. — Lo mismo que en Mercurio, es muy aventurado dar una idea sobre la configuración del suelo de Venus. Si en realidad el planeta está envuelto en una atmósfera cargada de nubes, las visuales telescópicas difícilmente alcanzarían la superficie sólida del astro, la que en consecuencia permanecería inescrutable a las miradas del hombre.

ROTACION. — La falta de manchas estables sobre el disco de Venus, hace casi imposible determinar el período de rotación del planeta por el movimiento de aquéllas.

TEMPERATURA REINANTE. — Los rayos solares inciden sobre la superficie de Venus con un poder luminoso y calorífico 2 veces mayor que sobre la Tierra, por lo cual las temperaturas reinantes serían muy superiores a las registradas sobre nuestro planeta.

Si se admite la hipótesis de SCHIAPARELLI sobre la rotación del planeta en un período igual al de su revolución sidérea, entonces en

el hemisferio que enfrenta constantemente al Sol, las temperaturas serían tan elevadas, que las condiciones de vida en el mismo podrían ser consideradas imposibles, pasando otro tanto en el hemisferio opuesto por la intensidad del frío originado por un invierno eterno.

MARTE (♂)

* 231. **BRILLO.** — Los grandes cambios de distancia a la Tierra, hacen muy variable el brillo de Marte.

En las oposiciones verificadas cerca de su perihelio, cuando la Tierra está próxima a su afelio, el planeta por colocarse a la mínima distancia del nuestro, adquiere un brillo extraordinario equivalente a la magnitud $-2,8$, apareciendo entonces después de Venus como el planeta más brillante del Cielo. En cambio en aquellas conjunciones en que se ubica a la máxima distancia de la Tierra, el brillo de Marte ha descendido hasta el de una estrella de $1,6$ magnitud, brillando entonces como β de la Cruz del Sur y algo menos que Pólux y Régulo que son de las menos brillantes entre las 20 estrellas primarias. El brillo de Marte, experimenta por lo tanto una diferencia que alcanza a $4,4$ magnitudes, brillando el astro en su máximo 60 veces más que en su mínimo.

Las fases del planeta producen por otra parte variaciones de brillo poco pronunciadas; su *albedo* tiene el valor $0,15$ siendo el más pequeño a excepción de Mercurio y la Luna. Esto permite suponer que la luz del Sol recién es reflejada al llegar a la superficie de Marte, por ser poco densa su atmósfera y probablemente muy parecida a la de la Tierra, desde que el color rojizo del planeta podría ser consecuencia de una atmósfera que como la nuestra, absorbiera con preferencia las radiaciones azules.

ATMOSFERA. — Todo indica la existencia de una atmósfera en Marte, y en especial el último detalle apuntado, así como también la poca nitidez con que se perciben los numerosos accidentes de su superficie. Dado que la atracción en la superficie de Marte sólo representa $0,4$ de la ejercida por la Tierra, se presume que la atmósfera de aquel planeta debe ser menos densa que la terrestre. Además, una característica esencial de la atmósfera de Marte la constituiría la ausencia casi absoluta de nubes, por más que en ciertas ocasiones suelen formarse algunas, haciendo muy difusos los detalles superficiales del planeta.

TOPOGRAFIA. — Puede considerarse a Marte como el planeta más conocido por el hombre en cuanto a configuración superficial, habiéndose confeccionado mapas y dibujos bastante detallados de su superficie.

Observado telescópicamente, en condiciones favorables, inmediatamente llama la atención la profusa gama de detalles, adoptando

la forma de manchas brillantes en algunas regiones, oscuras en otras, grisáceas y de diversos tonos en ciertas partes, etc. Sobre dichos detalles, se destacan otros de menor extensión en forma de puntillados oscuros y alineamientos más o menos rectilíneos.

Los astrónomos han tratado en todo tiempo de interpretar tales detalles no habiéndose llegado hasta ahora a un acuerdo perfecto entre las opiniones emitidas, aun cuando haya coincidencia en considerar a esas manchas de distintas formas y tonalidades, lo mismo que a los alineamientos y puntillados, como accidentes topográficos del suelo de Marte, continentes, océanos, mares, lagos, cordilleras, y



Fig. 182. — Marte mostrando en su parte más clara el Polo Sur.
(Fotografía del Observatorio de Mount Wilson).

también superficies cubiertas de hielo, regiones de vegetación cambiante de estación en estación, etc.

A las grandes manchas blancas del planeta se las ha llamado *continentes* y SCHIAPARELLI creyó descubrir que las mismas están cruzadas en todas direcciones por una serie de formaciones o alineamientos más o menos rectilíneos a los que la fantasía asignó el nombre de "*canales*".

Más efectivo es el descubrimiento hecho anteriormente por HUYGENS a mediados del siglo XVII sobre ciertas *manchas brillantes* que contorneaban alternativamente uno y otro polo del planeta, estudiadas después minuciosamente por HERSCHEL, MÄDLER, SCHIAPARELLI y otros astrónomos de tiempos recientes (fig. 182). Dichas manchas aumentan progresivamente en extensión durante el invier-

no del respectivo hemisferio, para disminuir, hasta casi desaparecer, en el verano, sin que el período de variación haya sido afectado en época alguna. Se ha llegado a la conclusión de que son debidas a una substancia, *probablemente agua*, que se solidifica fácilmente con el frío invernal para fundirse después con el calor del verano. No es aventurado pronosticar entonces, que las regiones polares de Marte se parecen en mucho a las nuestras.

Ante estas conclusiones, puede deducirse, que de todos los planetas del sistema solar, es Marte el que físicamente se asemeja más a la Tierra, no pudiéndose descartar la hipótesis de que existan manifestaciones de vida en su superficie.

TEMPERATURA REINANTE. — La cantidad de luz y calor que Marte recibe del Sol puede calcularse igual a la mitad de las que recibe la Tierra, de modo que en general sobre su superficie, deben predominar temperaturas bajas. Por otra parte, las estaciones de este planeta tienen una duración casi doble que las terrestres, lo que hace presumir variaciones muy considerables de temperatura entre una y otra. Los hielos que cubren los casquetes polares abarcando grandes extensiones durante el invierno en el correspondiente hemisferio, alcanzan casi a desaparecer en el verano, cosa que no pasa en la Tierra. De este modo, al observarse desde la Tierra las manchas brillantes que circundan los polos de Marte, se notará que al variar las estaciones se intensifican en uno de ellos, ínterin se reducen en el otro (ver figura).

Opina Comas Solá, que si bien la temperatura media de Marte es baja, será con todo superior a 0°C.

ROTACION. — Por el movimiento de sus manchas, se ha determinado que el período de rotación de Marte es:

24h 37m 22s,7.

El ecuador del astro está inclinado con respecto al plano de su órbita en un ángulo de 25°, valor éste muy aproximado al de la oblicuidad de nuestra eclíptica por lo cual las estaciones de Marte presentarán mucho parecido con las terrestres.

EPOCAS FAVORABLES DE OBSERVACION. — Son aquellas en que la oposición de Marte se efectúa cerca de su perihelio, estando la Tierra próxima a su afelio. Ello acontece una vez cada 15 años, y en tales condiciones la distancia de Marte a la Tierra sólo alcanza a unos 56 millones de kilómetros. El último de estos acercamientos acaeció el 27 de julio de 1939, y el próximo se verificará en el año 1954.

* 232. **SATELITES DE MARTE.** — Este planeta tiene dos minúsculos satélites: PHOBOS (Fuga) y DEIMOS (Terror). Dada la

pequeñez de los mismos, se cree que son asteroides captados por la atracción de Marte sobre los más cercanos del grupo.

En el cuadro que sigue se consignan algunos datos relativos a los satélites de Marte.

NOMBRE	Radios, en kilómetros	Magnitud de brillo (Máximo)	Distancia en radios de Marte	Tiempos de revolución
Phobos	29	12 ^a	2,3	7h 39m
Deimos	8	13 ^a	12	30h 18m

ASTEROIDES

* 233. **DESCUBRIMIENTOS.** — PIAZZI, en Palermo, el día inicial del año 1801, descubrió en la constelación zodiacal del Toro al primer asteroide que llamó CERES siguiendo la serie de nombres mitológicos asignados a los demás planetas. La órbita del nuevo astro fué determinada por GAUSS encontrando que su distancia al Sol era aproximadamente la media aritmética entre las distancias de Marte y Júpiter, en virtud de lo cual se creyó fuera el astro que llenaba la laguna correspondiente al número 2,8 de la ley numérica de Titius.



Fig. 183. — J. Hartmann.

Transcurrido algo más de un año de este descubrimiento, OLBERS, médico y astrónomo, descubre a PALLAS y concibe la idea de que ambos pequeños astros podrían ser restos de un antiguo planeta ubicado entre Marte y Júpiter, no siendo entonces improbable la existencia de otros planetoides del mismo grupo.

Siguiendo tal punto de vista, HARDING, descubre el tercer asteroide llamado JUNO en 1804, y 3 años después, el mismo Olbers, agregó a la serie un nuevo integrante al que se llamó VESTA.

A partir del descubrimiento de VESTA, transcurrieron 38 años sin que se registraran otros, hasta que en 1845 el aficionado HENCKE aumenta la nómina con la inclusión de ASTREA, después de lo cual se suceden los descubrimientos,

en forma tal, que en la actualidad se conocen más de 1.500 asteroides, entre los cuales hay muchos tan diminutos que podrían ser considerados como cascotes cósmicos. Contribuyó eficazmente en la obtención de tales resultados, la aplicación de la fotografía a determinadas regiones de la esfera celeste no muy apartadas del Zodíaco. Si suponemos una cámara fotográfica acoplada a un telescopio que sigue el movimiento diurno de la esfera celeste mediante un adecuado mecanismo de relojería, resultará que todo astro errante que se introduzca en el campo visual, registrará, después de exposiciones prolongadas, su desplazamiento entre las estrellas por un trazo luminoso más o menos largo. La existencia de tales trazos o estelas en muchas fotografías así obtenidas, ha permitido que, desde fines del siglo XIX, el descubrimiento de asteroides haya alcanzado un ritmo realmente vertiginoso.

El astrónomo J. HARTMANN (1865 - 1936) ex director del Observatorio Nacional de La Plata descubrió desde éste a los asteroides ANGÉLICA, LA PLATA y ERFORDIA. Otro astrónomo del mismo observatorio, HUGO MARTÍNEZ, calculó la órbita del asteroide SARITA en el año 1920. Dicho asteroide fué descubierto en 1914 asignándosele el N° 796 de la serie.

CONDICIONES DE VISIBILIDAD. — Sólo pueden considerarse como visibles a simple vista, y ello en condiciones muy favorables en sus respectivas oposiciones, a los asteroides VESTA, CERES y EROS. La gran mayoría de los otros, sólo pueden verse telescópicamente desde que en el mejor de los casos alcanzan brillos correspondientes a la 12ª y 13ª magnitud.

ORBITAS. — La mayor parte de los asteroides están situados a distancias medias del Sol comprendidas entre 2,5 y 3 unidades astronómicas, es decir, que se acercan más a Marte que a Júpiter. El más cercano al astro central es EROS, descubierto por WITZ en 1896. Este asteroide se encuentra a la distancia media 1,46 mientras que el más alejado, ALINDA, cuadruplica tal distancia al corresponderle 5,76, distando del Sol en su afelio, más que el planeta Júpiter. Otros asteroides, los llamados "*Planetas Troyanos*", NÉSTOR, PATROCLES, AQUILES y HÉCTOR están también a distancias medias del orden de la de Júpiter.

Los tiempos empleados por los asteroides en sus revoluciones sidéreas, guardan relación con la magnitud de los semiejes mayores de las respectivas órbitas (3ª ley de Kepler). La mayoría cumple sus revoluciones en períodos comprendidos entre 4 y 5 años; en cambio, EROS sólo emplea 1 año y 9 meses, mientras ALINDA lo hace en un tiempo superior a 13 años.

Las inclinaciones orbitales de estos astros con respecto a nuestra eclíptica adquieren también los más variados valores, predominando las que superan a los 8°. Son muchas las órbitas que llegan a estar inclinadas en 20° o más, y entre ellas citamos la de Pallas que alcanza los 35° y la de Alinda que se acerca a los 43°.

Otra característica fundamental de estos pequeños planetas es la fuerte excentricidad de las órbitas, pues si bien para algunos son casi circulares, para la gran mayoría son tan alargadas que alcanzan, en

ciertos casos, a superar las excentricidades de algunos cometas periódicos como ser los de HOLMES y TEMPEL.

DIMENSIONES. — Se las calcula con grosera aproximación por procedimientos fotométricos, admitiendo que tales astros reflejan la luz como la Luna, Mercurio o Marte. El astrónomo BARNARD obtuvo para los mayores, CERES, PALLAS, VESTA y JUNO (fig. 184), radios de 384, 241, 192 y 97 kilómetros, respectivamente, mientras que para algunos de los menores, como ser STEPHANIA y HAMILTONIA dichos valores oscilan entre 3,5 y 2,5 kilómetros.

* 234. **HIPOTESIS RELATIVAS AL ORIGEN DE LOS ASTEROIDES.** — OLBERS emitió la hipótesis de que los asteroides pudie-

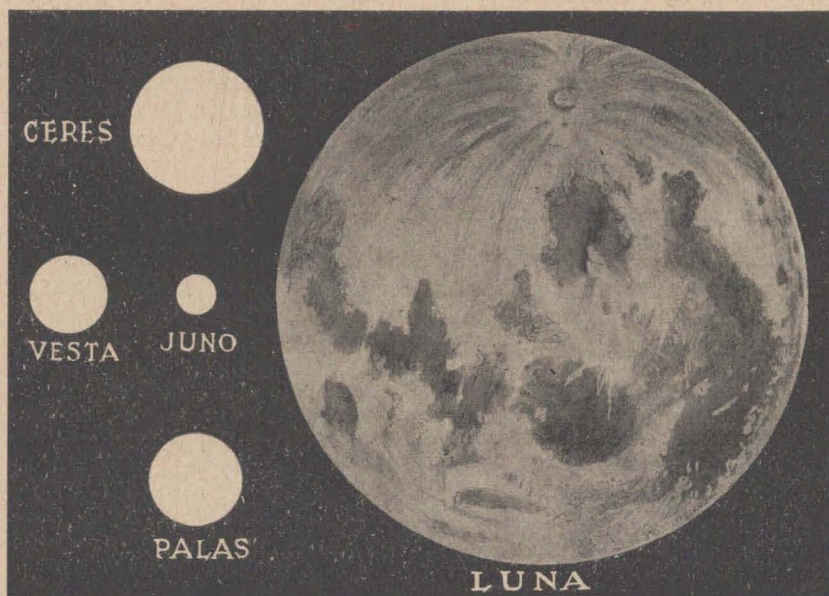


Fig. 184. — Tamaño comparado con la Luna de los cuatro asteroides mayores.

ran ser fragmentos provenientes de la explosión de un antiguo planeta. En tal supuesto, las órbitas descritas en sus revoluciones alrededor del Sol, debieran tener un punto de concurso que en la actualidad no existe, por más que ello podría explicarse por las desviaciones seculares experimentadas por aquellas órbitas bajo las acciones de mutua gravitación y las perturbaciones originadas por la atracción de los planetas Marte y Júpiter.

En la actualidad va tomando cuerpo la hipótesis de que muchos asteroides pueden ser de origen cometario. En efecto: CALLANDREAU estudiando las órbitas de los asteroides cercanos a Júpiter, encontró

grandes analogías entre dichas órbitas y las que describen los cometas de corto período como ser el de HOLMES y otros.

JUPITER (2)

* 235. **BRILLO.** — Este planeta aparece en el Cielo con un brillo equivalente a la magnitud $-2,2$ cuando está en oposición. Su luz de un color blanco dorado es tranquila, y sólo es superado en cuanto a brillo, en lo que a planetas se refiere, por Venus, y en ocasiones especiales por Marte.

Es digno de mención el hecho de que Júpiter, a semejanza del Sol, brilla más en la parte central que en los bordes. Ello se explica, admitiendo que la luz del Sol que incide cerca de la periferia del planeta debe atravesar una capa atmosférica de mayor espesor, la cual ejerce en consecuencia mayor absorción. El albedo es muy elevado, alcanzando el valor $0,56$ sólo superado por Venus y Saturno indicando que gran parte de la luz solar recibida por Júpiter, es reflejada por nubes que flotan en su atmósfera.



Fig. 185. — Aspecto de Júpiter y tamaño comparado con la Tierra.

ATMOSFERA. —

El gran valor del albedo de Júpiter es un indicio casi seguro de la existencia de una atmósfera bastante densa. Por otra parte, la variabilidad visual de muchos detalles oscuros y otros brillantes del disco del planeta, demuestran que en realidad lo que vemos de él, son las masas de vapores y nubes que lo envuelven.

Otra prueba de la existencia de una atmósfera alrededor de Júpiter la proporciona el hecho de que las estrellas antes de ocultarse tras el cuerpo del planeta van declinando lentamente en su brillo.

Hace más de 60 años, notó HUGGINS en el espectro de Júpiter, la presencia de bandas de absorción en la zona del rojo. En 1932, el físico alemán WILD identificó dichas bandas como provenientes del amoníaco y metano que abundarían en la atmósfera de Júpiter, así como en las de Saturno, Urano y Neptuno.

TOPOGRAFIA. — Desde hace tiempo, los observadores más tenaces notaron dos espesas bandas oscuras situadas a uno y otro

lado del ecuador del planeta, siendo ésta la característica más fundamental de su disco (fig. 186).

Observadas estas bandas con los potentes anteojos modernos, se puede apreciar que en realidad están constituídas por una serie de formaciones independientes entre sí que se cree puedan ser nubes.

Aparte de las citadas, suelen aparecer sobre el disco de Júpiter otras manchas temporarias oscuras, y por excepción algunas brillantes, desfilando en el sentido de su rotación. En 1878 se descubrió en el hemisferio austral la gran mancha elíptica que se conoce

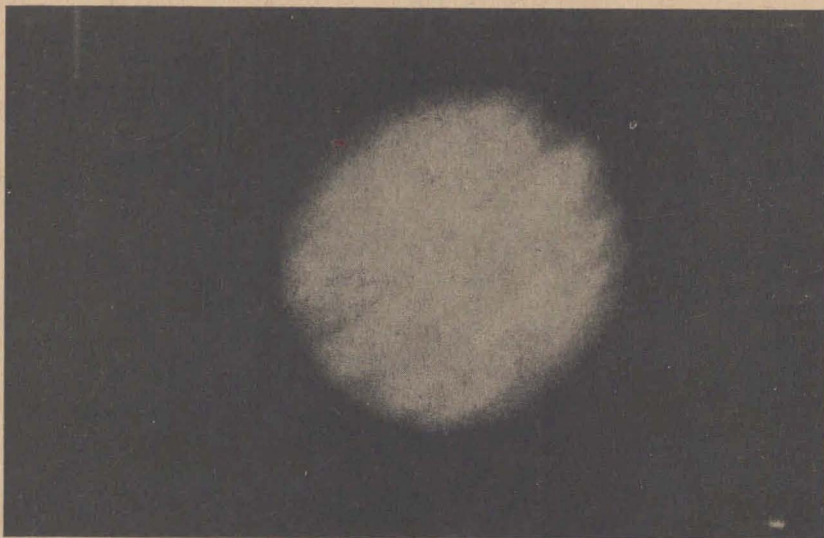


Fig. 186. — Júpiter fotografiado con el telescopio de un metro de abertura del Observatorio Yerkes.

bajo el nombre de "*mancha roja*". Se le ha calculado una longitud de más de 40.000 km. En la actualidad aparece más bien como un detalle blanquecino del disco, llamando mucho la atención el hecho de que tenga una velocidad de rotación distinta a la del planeta, lo que hace presumir que no está ligada al núcleo firme del mismo. En cuanto a la velocidad de rotación de la "*mancha roja*", ha disminuído notablemente con respecto a la que tenía en el año 1878.

Además de la "*mancha roja*" otra formación que puede considerarse como permanente sobre el disco de Júpiter, es la que se conoce bajo el nombre de "*velo*" y que fué descubierta por H. STRUVE.

El "*velo*" está también ubicado en el hemisferio austral del planeta y tiene una velocidad de rotación algo superior a la de la "*mancha roja*", lo que da lugar, por estar ambas manchas en la misma latitud, que se superpongan cada dos años cubriendo la una a la otra para separarse después adelantándose el "*velo*". Al super-

ponerse las dos formaciones, el aspecto de la "*mancha roja*" durante unos 40 días experimenta sensibles variantes haciéndose muy tenue y hasta desapareciendo a veces por espacio de varios días.

De lo expuesto, es lícito admitir que lo que vemos de Júpiter, no es precisamente su superficie, sino la parte superior de su atmósfera sobrecargada de nubes espesas, siendo las bandas oscuras especies de huecos formados en el abigarrado conjunto nuboso.

En ciertas ocasiones se han notado cambios rapidísimos sobre el disco del planeta originados por masas en movimiento. Se ha supuesto para explicar tales cambios y los corrimientos de masas a miles de kilómetros en algunas horas, que el núcleo del planeta todavía muy caliente, no alcanzó a recubrirse de una corteza sólida, y que en su seno se desarrollan aun grandes actividades en razón de las elevadas temperaturas imperantes. Este modo de ver está muy de acuerdo con la débil densidad del planeta, muy parecida a la del Sol, no faltando quien opina que Júpiter es en la actualidad un cuerpo semirrígido, debatiéndose en el período que debe preceder al de formación de su costra firme.

TEMPERATURA REINANTE. — Si Júpiter fuera un planeta adulto, con corteza sólida ya formada, como la de la Tierra, las temperaturas imperantes en su superficie serían muy bajas atendiendo a que apenas si recibe del Sol sobre la unidad de superficie el calor equivalente a $\frac{1}{27}$ del que recibe la Tierra en iguales condiciones. Las estaciones del planeta en este supuesto, casi no existirían, ya que la inclinación de la órbita sobre el plano del Ecuador no alcanza a valer 3°.

Estas consideraciones pierden todo valor ante lo expuesto en líneas anteriores, pues en virtud de lo que parece deducirse de ello, las temperaturas reinantes en la superficie de Júpiter provenientes de su calor propio deben ser considerables e inaptas, probablemente, para el desarrollo de seres orgánicos.

ROTACION. — Debido a la escasez de manchas realmente estables sobre el disco de Júpiter, la determinación de su período rotatorio no puede ser tan sencilla como para el caso de Marte, más aún considerando que las manchas más permanentes, como ser la "*mancha roja*" y el "*velo*", tienen a su vez movimientos propios.

Sin embargo, en ciertas ocasiones se han visto algunas manchas más o menos fijas en posición, que han permitido obtener aquel período con cierta aproximación. Después de numerosas determinaciones se ha llegado a la conclusión de que Júpiter emplea en su rotación un tiempo comprendido entre 9h50m, encontrado por Cassini en 1692, y 9h56m. Las observaciones más recientes, muestran en Júpiter algo parecido a lo que acontece con el Sol, es decir, que por falta de rigidez, el período de rotación es más corto en el Ecuador,

donde se ha determinado en 9h50m30s, que en las cercanías de los polos donde alcanza a 9h55m.

Diremos todavía que las modernas determinaciones espectroscópicas conducen a resultados en un todo análogos.

236. SATELITES DE JUPITER. — En la actualidad se conocen *nueve* satélites de Júpiter, de los cuales IO, GANYMEDE y CALLISTO fueron descubiertos por GALILEO, el 7 de enero de 1610, descubriendo MAYER en el mismo año al satélite llamado EUROPA.

Siendo poco inclinadas las trayectorias de estos satélites con respecto al plano orbital del planeta, aquéllos pasan frecuentemente

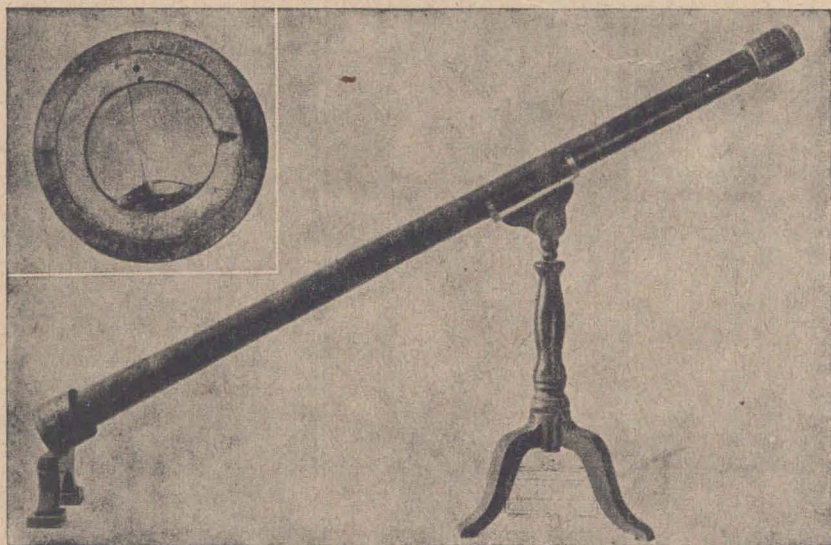


Fig. 187. — Histórico antejo de Galileo con el cual pudo observar cuatro satélites de Júpiter, las fases de Venus, montañas lunares, manchas del Sol, etc.

frente al disco del mismo como puntos oscuros, ocultándose en ocasiones detrás del planeta. En particular, *el primero de los satélites de Júpiter se oculta en todas sus revoluciones*, es decir, cada 42h 28m35s, que es el tiempo empleado en cumplir una de ellas.

Las ocultaciones de los satélites de Júpiter han permitido a ROEMER determinar con mucha aproximación la velocidad de la luz. Además se aprovechaban antes esos fenómenos en la determinación de la longitud geográfica.

Por otra parte, las órbitas de los cuatro primeros satélites de Júpiter son poco inclinadas respecto al ecuador del planeta y de forma casi circular. Sus períodos de revolución así como otros detalles interesantes, pueden apreciarse en el cuadro que sigue:

NOMBRE	Brillo en magnitud	Diámetro aparente	Radios en km.	Masa respecto al planeta	Distancia en radios de Júpiter	Tiempos de revoluciones y rotación
I. Io	5,4	1",05	1.975	0,000045	5,91	1d18h28m35s
II. Europa ...	5,3	0",87	1.645	0,000025	9,40	3d13h17m54s
III. Ganymede.	5,1	1",52	2.865	0,000080	14,99	7d 3h59m36s
IV. Callisto ..	6,1	1",43	2.695	0,000045	26,36	16d18h 5m 7s

SATURNO (5)

* 237. **BRILLO.** — Es el segundo de los planetas del Sistema Solar en volumen y masa, después de Júpiter. Por otra parte, sus anillos luminosos y sus diez satélites hacen de este astro uno de los objetos más interesantes del Cielo (fig. 188). Se le puede ver como una brillante estrella amarillenta de primera magnitud siempre en las cercanías de la eclíptica. Cuando se encuentra en oposición, su brillo es máximo por su menor distancia a la Tierra, alcanzando entonces la magnitud 0 (cero), equivalente al de 2,5 estrellas de 1^a. En cambio, en las conjunciones, brilla casi cinco veces menos pues su magnitud decrece hasta 1,5.

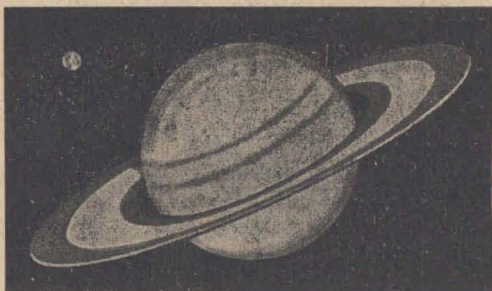


Fig. 188. — Saturno y la Tierra.

Por su cercanía a la eclíptica, su coloración amarillo ámbar y su casi carencia de centelleo, no puede ser confundido con una estrella.

Las variaciones del brillo de Saturno dependen, no tan sólo de la distancia a la Tierra, sino que también de la posición en que nos presenta sus anillos. Su albedo es muy grande, y su valor 0,63 supera a los de todos los otros planetas del Sistema Solar. Al igual que lo que pasa con el Sol y con Júpiter, el disco de Saturno es más brillante en el centro que en los bordes.

ATMOSFERA. — El hecho que acaba de citarse, así como el fuerte albedo de este planeta, son indicios más que suficientes para aceptar la existencia en Saturno de una atmósfera elevada y nubosa parecida a la de Júpiter.

Lo mismo que en Júpiter, comprobó WILD en 1932, la existencia de una fuerte proporción de *metano* y *amoníaco* en la atmósfera de Saturno, que son los compuestos que ocasionan las tres bandas en la zona roja del espectro, ya observadas anteriormente sin haberlas identificado.

TOPOGRAFIA. — La configuración visual del disco de Saturno, ofrece indudablemente grandes analogías con la ya vista en

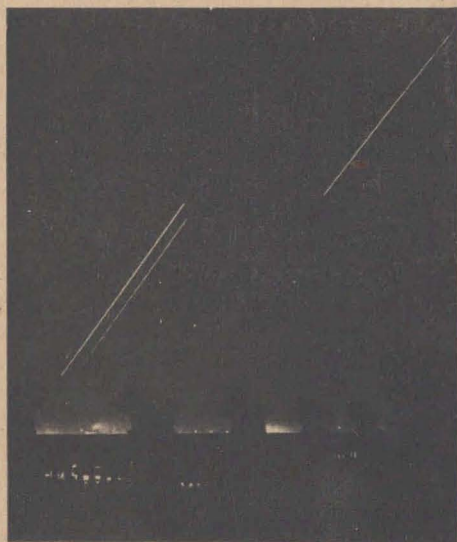


Fig. 189. — Trazos luminosos de Júpiter (izquierda), Marte (centro), y Saturno (derecha). Fotografía tomada por los autores desde la azotea del Colegio Nacional de La Plata, con una hora de exposición (entre las 22h y 23h) el día 5 de enero de 1940.

Júpiter, por más que los detalles oscuros y brillantes aparezcan más velados por la mayor distancia. En ocasiones propicias de observación, pueden verse telescópicamente bandas más o menos esfumadas en forma de nubes, destacándose dos de ellas paralelas al ecuador del planeta. Con el tiempo, dichas bandas cambian de aspecto, desapareciendo casi en ciertas épocas, e intensificándose en otras. Todos esos detalles, así como la débil densidad, hacen presumir que este planeta es todavía un mundo en formación conservando aún algunas actividades propias equivalentes a las de los períodos geológicos primitivos.

Se aprecian en efecto, rápidos transportes de grandes masas de un lugar a otro;

aparición temporaria de detalles oscuros y brillantes no observados antes, etc., lo que revela la existencia de fuerzas eruptivas considerables. La mayor parte de los astrónomos consideraran a Saturno como un astro que se encuentra todavía en una especie de estado pastoso, no faltando quien lo suponga una masa líquida en pleno proceso de enfriamiento.

ROTACION. — La rotación de Saturno se trató de determinar por el movimiento de manchas más o menos estables. El fuerte achataamiento del planeta hizo pensar desde un principio que tal rotación debía cumplirse en un corto período de tiempo. A fines del siglo XVIII, fijó HERSCHEL dicho período en 10h16m, después de haber seguido el movimiento de una mancha muy nítida que él mismo descubrió sobre el disco y que desapareció algún tiempo después.

Muy cercano al valor obtenido por Herschel, es el que determinó HALL en 1876, guiándose por una gran mancha blanca que vió por primera vez casi sobre el ecuador de Saturno. Obtuvo Hall en esta determinación un período rotatorio de 10h14m24s inferior en 1m36s al de Herschel, cosa justificable desde que la velocidad de rotación, como en Júpiter, no es la misma a distintas latitudes.



Fig. 190. — Saturno en el año 1921. (Obs. de Lowell).

238. ANILLOS DE SATURNO. — La característica más interesante que ofrece Saturno, es la de su anillo luminoso, que puede dividirse en otros tres concéntricos, separados el exterior del central por una línea o faja oscura llamada *división de Cassini*. Por otra parte, entre el anillo interior y el central, suele divisarse en circunstancias propicias otra débil línea de separación llamada *división de Struve* (figs. 188 y 191).

Antes de la enunciación de las leyes de gravitación, los anillos de Saturno eran considerados como aros regulares y homogéneos, cada uno de ellos de una sola pieza; LAPLACE rechazó esta hipótesis que consideró inverosímil, y BOND supuso después que los anillos estaban al estado flúido. Recién en 1856, MAXWELL pone de actualidad una hipótesis emitida siglo y medio antes por CASSINI, y según la cual los anillos no son más que *aglomeraciones de pequeños satélites o corpúsculos*, cuyas separaciones no pueden ser notadas desde la Tierra.

Esta hipótesis se ve confirmada por las observaciones de SEELIGER y sobre todo por los trabajos y estudios de KEELER, quien demostró que los distintos puntos de los diversos anillos se mueven como cuerpos independientes alrededor de Saturno con arreglo a las leyes de Kepler y siguiendo en un todo, como consecuencia, las exigencias de la gravitación universal.

Las épocas propicias para la observación de los anillos de Saturno hay que buscarlas cuando el plano de los mismos, que es el del ecuador del planeta, forma el ángulo máximo con el rayo visual,

el cual alcanza unos 28° . Estas épocas se llevan a cabo cada 14 años y 8 meses, cuando el planeta está en las constelaciones zodiacales

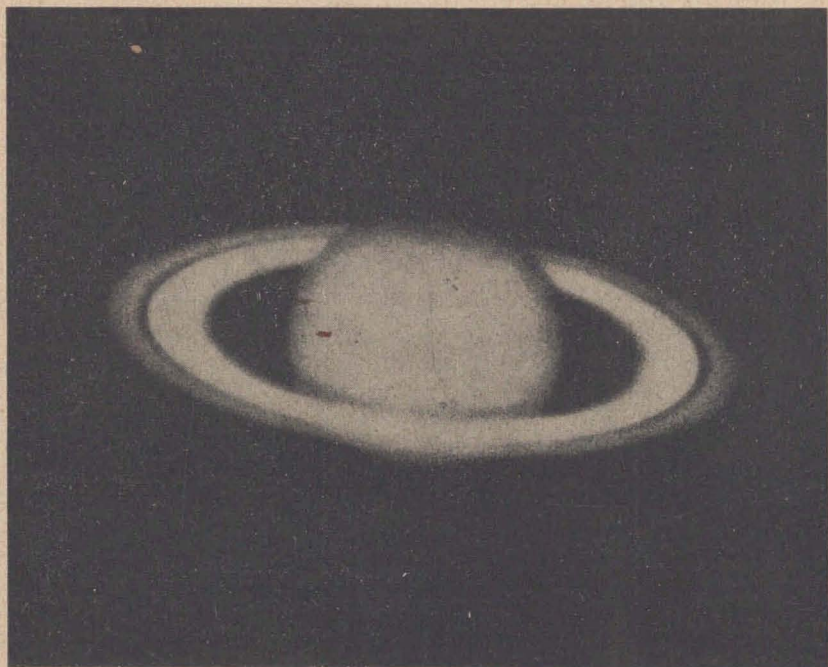


Fig. 191. — Saturno, fotografiado por Barnard con el reflector de 250 centímetros del Observatorio de Mount Wilson.

del Toro o en Sagitario. En 1928 pudieron ser muy bien observados por encontrarse el planeta en la última constelación nombrada, y en

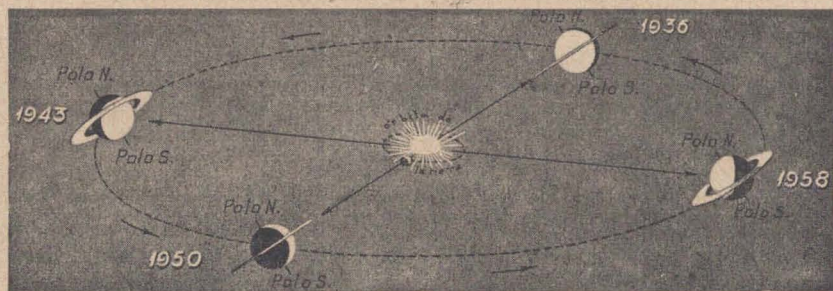


Fig. 192. — Posición de los anillos en distintas épocas.

1943 volverán a ser favorables las condiciones de observación al ubicarse en Tauro. En término medio, el planeta invierte unos dos

años y medio en pasar de una constelación zodiacal a la que le sigue, pues las recorre todas en unos 30 años.

En cambio son épocas inadecuadas para la observación, aquéllas en que el planeta se encuentra en Piscis o en Leo (espaciadas también en 14 años 8 meses), pues en tales posiciones los anillos por presentarse de canto se hacen invisibles aun con buenos telescopios, y en el mejor de los casos se presentan como un débil hilo luminoso dispuesto diametralmente al disco de Saturno (figs. 190 y 192). La última de esas épocas se registró en el año 1936 en que el planeta estaba ubicado en Piscis y la próxima lo será en 1950 al colocarse en la constelación Leo.

* 239. **SATELITES DE SATURNO.** — Además de sus anillos, Saturno es el astro del sistema planetario que tiene mayor número de satélites, pues alcanzan a diez.

En el cuadro siguiente se consignan las características esenciales de los satélites de Saturno, así como los nombres de sus descubridores y fechas correspondientes.

SATELITES DE SATURNO

Nombre	Distancia	Revolución sideral	Inclinación	Excentricidad	Brillo	Descubridor	Fecha
I. Mimas ...	3,1	0d23h	1°36'	0,019	12,1	Herschel	18 julio, 1789
II. Encelade .	3,9	1d 9h	0°	0,005	11,6	"	29 agosto, 1789
III. Tethys ...	4,9	1d21h	1° 6'	0,000	10,7	Cassini	21 marzo, 1684
IV. Dionea ...	6,2	2d18h	0°	0,002	10,7	"	21 marzo, 1684
V. Rhea	8,7	4d12h	0°	0,101	10,1	"	23 diciembre, 1672
VI. Titán	20,2	15d23h	27°30'	0,029	8,6	Huygens	25 marzo, 1655
VII. Hyperión .	24,5	21d 7h	27°18'	0,104	12,8	Bond	16 setiembre, 1848
VIII. Japetus ...	58,9	79d 8h	18°12'	0,029	10,8	Cassini	25 octubre, 1671
IX. Phoebe ...	214,4	550d11h	160°	0,166	17	Pickering	16 agosto, 1898
X. Themis (?)	24,2	20d20h	39° 6'	0,230	18	"	28 abril, 1905

Las distancias están dadas en radios ecuatoriales de Saturno (61.500 km.), la inclinación con respecto al plano de la órbita del planeta, y el brillo según la magnitud aparente.

URANO (♅)

* 240. **BRILLO.** — Este planeta aparece en el Cielo como un astro de 6ª magnitud siempre próximo a la eclíptica de la cual el máximo apartamiento es de 46'. Observado con un telescopio, se notará en su luz una coloración azul-verdosa.

Según CAMPBELL, las variaciones de brillo de Urano sólo alcanzan $\frac{1}{7}$ de magnitud, y se llevan a cabo en un período de 10h45m lo que hace presumir una rotación del planeta en igual lapso.

Su *albedo* o poder reflexivo de luz, es tan grande como el de Saturno alcanzando el valor 0,63, de modo que podrá deducirse, que, como aquél, debe estar rodeado por una elevada atmósfera sobrecargada de nubes espesas. Por otra parte, el análisis espectroscópico de la luz solar que refleja Urano, conduce a las mismas conclusiones vistas para Saturno.

ATMOSFERA. — Como parecen comprobarlo su elevado poder de reflexión y las revelaciones espectrales, puede asegurarse que Urano, lo mismo que los dos grandes planetas que lo preceden, está

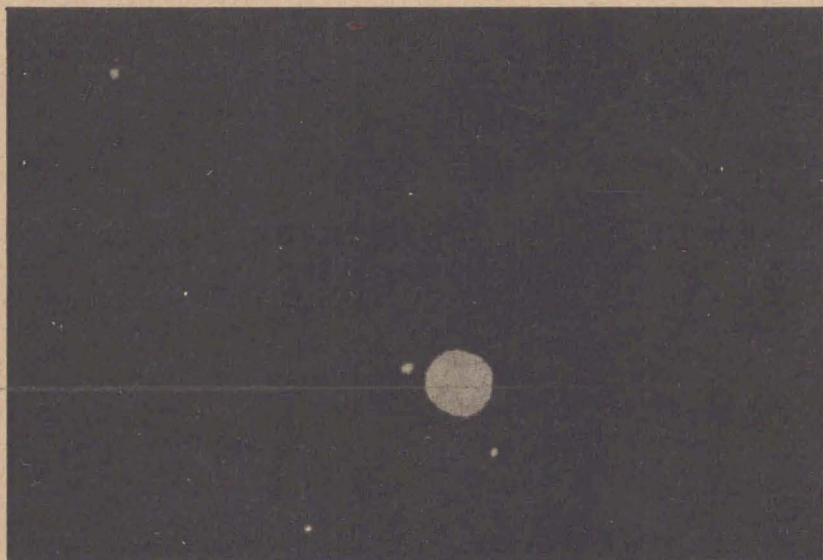


Fig. 193. — Urano y dos de sus satélites. (Observatorio de Yerkes).

envuelto en una atmósfera muy semejante a la de aquéllos. En diversos espectros obtenidos de su luz reflejada se cree haber observado la existencia de *hidrógeno* al estado libre en su atmósfera envolvente. Además, en 1932 comprobó WILD por el espectro, que la atmósfera de Urano contiene una elevada proporción de *amoníaco*, y sobre todo *metano*.

TOPOGRAFIA. — Poco puede decirse del aspecto que este astro presenta a la observación telescópica, debido a la gran distancia que lo separa de la Tierra y a la pequeñez del diámetro aparente siempre inferior a 4". Su disco no alcanza a mostrar bandas ni manchas de

alguna nitidez, las cuales de existir como se presume, son esfumadas por la distancia.

ROTACION. — La falta de manchas perceptibles hace indeterminado el período de la rotación de Urano, presumiéndose que debe ser corto por el considerable achatamiento. Del valor de éste, parecería deducirse unas 11h, confirmado ello por ciertas determinaciones espectroscópicas que le asignan 10h45m, coincidente con el período de variaciones en brillo. Lo más notable en la rotación de Urano, es que la observación espectrográfica, la registra en el *sentido retrógrado* en que se mueven sus satélites.

* 241. **SATELITES DE URANO.** — Son cuatro: TITANIA, OBERÓN, ARIEL y UMBRIEL.

En el cuadro que sigue, damos algunos datos relativos a los satélites del planeta que acabamos de estudiar.

SATELITES DE URANO

NOMBRES	Distancia	Revolución sideral	Radio	Descubridor	Año
I. Ariel	7,71	2d12h29m	?	Lasell	1851
II. Umbriel	10,75	4d 3h28m	?	"	"
III. Titania	17,63	8d16h57m	470 km.	Herschel	1787
IV. Oberón	23,57	13d11h 7m	435 km.	"	"

Las distancias de los satélites al planeta, están dadas en radios de éste (25.500 km.).

NEPTUNO (ψ)

* 242. **BRILLO.** — Se muestra el anteojo como un astro de 8ª magnitud de pequeño diámetro aparente (2",5) y con luz azulada.

El brillo de Neptuno se conserva invariable. Su albedo tiene el valor de 0,60 (muy grande), indicando la existencia de una atmósfera análoga a la de los tres planetas anteriores.

ATMOSFERA. — Por las observaciones espectroscópicas de la luz reflejada por Neptuno efectuadas por VOGEL y otros astrónomos del Observatorio de Lowell, puede darse como segura la existencia de una atmósfera parecida a las de Urano, Saturno y Júpiter, pero muy distinta de la nuestra. En el espectro aparecen bandas y

rayas oscuras de absorción que son indicios de una atmósfera absorbente. Lo mismo que en los tres grandes planetas que lo preceden, existen en la atmósfera de Neptuno *amoníaco*, y en mayor proporción *metano*, según lo comprobó WILD en 1932.

TOPOGRAFIA. — La gran distancia y la pequeñez del disco no permiten apreciar detalles claros u oscuros dignos de ser considerados.

ROTACION. — Hasta la fecha aparece indeterminada pero se cree que el período de la misma debe ser corto en virtud del fuerte achatamiento.

243. SATELITE DE NEPTUNO. — El único satélite que se le conoce, TRITÓN, fué descubierto por LASSELL a fines de 1846, es decir, pocos meses después del descubrimiento del planeta. BOND y O. STRUVE, lo mismo que el propio descubridor, obtuvieron como tiempo de revolución del satélite alrededor del planeta 5h21m.

PLUTON (PL)

* 244. La distancia que separa a Plutón del Sol constituye, por ahora, el radio límite del espacio abarcado por el conjunto del Sistema Solar.

Como se comprenderá, Plutón, de los cuerpos importantes que integran el Sistema Solar, es el de más difícil percepción, siguiéndose en sus movimientos por métodos fotográficos ya que no puede ser captado telescópicamente. Durante los 10 años transcurridos desde la fecha de su descubrimiento, este planeta apenas ha recorrido unos 14° de su órbita alrededor del Sol, desplazándose entre las estrellas a razón de 14",32, por cada día sideral.

La enorme excentricidad de la órbita de Plutón, hace que en el perihelio por el cual pasará en el año 1986, se ubique a nada más que 30 unidades astronómicas de distancia del Sol, es decir, a la distancia media de Neptuno, mientras que en el afelio por el cual pasará hacia el año 2110, esa distancia se habrá amplificado hasta 50 unidades astronómicas, de lo cual deducimos que su distancia al astro central del sistema oscila entre un mínimo de 4.600 millones de kilómetros y un máximo de 7.300 de tales unidades.

La fuerte inclinación de la órbita de este planeta con relación al plano de la eclíptica hará que en ciertas épocas al ubicarse muy distante de los nodos se habrá separado tanto de ella que aparecerá fuera de la zona del Zodíaco.

En término medio, para pasar de una constelación zodiacal a la inmediata, invierte alrededor de 21 años, mientras que Mercurio sólo emplea algo más de 7 días y la Luna apenas 2,5 días.

El cálculo conduce a asignar a Plutón una masa equivalente a $\frac{1}{9}$ de la masa terrestre en virtud de las perturbaciones observadas en la órbita de Neptuno.

La distancia que separa a Plutón de nuestro planeta, puede calcularse variable entre un mínimo de 4.580 millones de kilómetros y un máximo de 7.250 millones de kilómetros. Su diámetro aparente no se ha medido directamente dada su enorme distancia, pero puede preverse que su valor máximo no alcanza a ser de 1" en la oposición más favorable, y de 0",6 en la conjunción.

Su luminosidad es la que corresponde a una estrella de 15ª magnitud, de modo que su brillo es, en resumen, casi 400.000 veces menor que el de la estrella tipo de 1ª magnitud, siendo por lo tanto visible sólo con los grandes telescopios modernos. Este brillo experimentará variantes con el tiempo en atención a la gran diferencia entre sus distancias perihelia y afelia.

Las cantidades de luz y calor que recibe Plutón del Sol, pueden calcularse en $\frac{1}{1.600}$ parte de las que recibe la Tierra, cantidades éstas tan insignificantes que permiten asegurar que la vida de Plutón como astro, se desliza en una noche eterna, puesto que el Sol visto desde ese planeta presentará un diámetro aparente inferior al que nos ofrece Venus en su conjunción inferior.

245. DATOS COMPARADOS DE LOS CUERPOS DEL SISTEMA SOLAR. — En la figura 194 puede apreciarse cómo sería

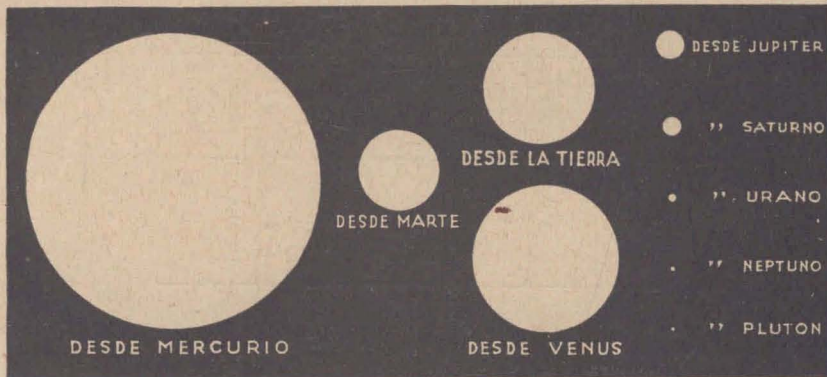


Fig. 194. — El Sol visto desde los distintos planetas.

visto el disco solar desde los distintos planetas del sistema. Los diámetros aparentes ofrecidos por el astro central a la distancia de cada planeta se obtienen alejando la figura unos 160 centímetros del observador.

Completamos las monografías planetarias con dos cuadros donde se consignan los valores numéricos de las magnitudes más importantes relativas a todos los astros del Sistema Solar estudiados hasta esta altura del texto.

CUADRO I

Nombre	Radio ecuatorial	Achatamiento	Volumen	Masa	Densidad	Pesantez	Revolución sideral	Rotación	Semieje mayor
Mercurio ..	0,37	0	0,05	0,056	1,1	0,41	87d,97	?	0,387
Venus	0,97	0	0,9	0,87	0,91	0,88	224d,70	?	0,723
Tierra	1	0,003	1	1	1	1	1a (sideral)	23h 56m 4s	1
Marte	0,54	0,005?	0,157	0,108	0,69	0,37	1a 321d,74	24h 37m 23s	1,523
Júpiter	11,14	0,066	1.300	318,36	0,25	2,53	11a 314d,92	9h 50m	5,202
Saturno ...	9,4	0,1	745	95,22	0,13	1,06	29a 167d,21	10h 14m	9,554
Urano	4	0,09	63	14,58	0,23	0,92	84a 8d,11	¿10h 45m?	19,218
Neptuno ...	4,3	0,1	78	17,26	0,30	0,95	164a 281d,6	?	30,109
Plutón	?	?	?	0,111	?	?	248a,157d	?	39,457
Sol	109	0	1.301.000	333.432	0,256	27,9	—	25d a 27d	—
Luna	0,27	0	0,02	0,012	0,606	0,166	27d7h43m11s,5	27d7h43m11s,5	—

Las revoluciones siderales, excepto la de la Tierra, están medidas en años trópicos. La de la Luna se ha considerado con respecto a la Tierra como centro del movimiento.

CUADRO II

ELEMENTOS DE LOS PLANETAS PARA 1940

Planeta	Inclinación	Excentricidad	Distancia media	Arco recorrido en un día sideral
Mercurio ..	7° 0' 14",4	0,2056	0,3871	4° 5' 31",2
Venus	3° 23' 38",4	0,0068	0,7233	1° 36' 7",2
Tierra	—	0,0167	1,0000	0° 59' 9",6
Marte	1° 51'	0,0933	1,5237	0° 31' 26",4
Júpiter	1° 18' 21",6	0,0484	5,2026	0° 4' 58",8
Saturno ...	2° 29' 27",6	0,0557	9,5547	0° 1' 58",8
Urano	0° 46' 22",8	0,0463	19,2181	0° 0' 43",2
Neptuno ...	1° 46' 30"	0,0090	30,1096	0° 0' 21",6
Plutón	17° 8' 38",4	0,2486	39,5177	0° 0' 14",4

CAPITULO QUINTO

COMETAS Y METEOROS COSMICOS

COMETAS

246. ASPECTO Y FORMA. — Los cometas (del lat. cometa; del gr. kometes, de kome, cabellera), constituyen otra categoría de astros errantes con características que les son propias en cuanto a forma, masa y recorrido.

Hasta fines del siglo XVI los cometas habían sido considerados como fenómenos luminosos de carácter atmosférico, provocando muchas inquietudes en sus imprevistas apariciones.

Para su mejor estudio debemos distinguir dos categorías de tales astros: 1º, *cometas visibles a simple vista*; 2º, *cometas telescópicos*.

1º Todo cometa visible a simple vista se compone por lo general de tres partes: *núcleo*, *cabellera* (o atmósfera) y *cola* (fig. 195).

El núcleo constituye la parte más brillante del astro, apareciendo en ocasiones como una estrella muy luminosa y con cierto



Fig. 195. — Fotografía del cometa Halley obtenida desde el O. de Córdoba con dos horas de exposición, el 5 de junio de 1910.

diámetro aparente. La cabellera circunda al núcleo bajo la forma de una masa nebulosa, cuyo brillo va en descenso a medida que se aparta de aquél. En ocasiones aparece tan iluminada en las cercanías del

núcleo que no puede establecerse una separación neta entre el uno y la otra. El conjunto del núcleo y la cabellera constituye la *cabeza* del cometa (fig. 196), la cual en algunos casos, adquiere un volumen superior al del Sol. Un fenómeno característico y común a los grandes cometas es que la cabellera reduce sus dimensiones a medida que se acerca al Sol, para aumentarlas al alejarse, después de haber



Fig. 196. — Cabeza del cometa Halley. Fotografía tomada el 5 de junio de 1910 desde el Observatorio de Mount Wilson.

pasado por su perihelio ocurriendo lo inverso con el desarrollo de la cola, a tal punto que un cometa muy alejado del Sol aparece al telescopio como una formación globular. El aspecto de la cola cometaria es el de una nebulosidad blanquecina, que partiendo de la cabeza se extiende en el espacio siempre en dirección opuesta a la del Sol (fig. 197). Su brillo va disminuyendo con el alejamiento de la cabeza y a veces suele presentar ramas que divergen, tomando el aspecto de un penacho, cuando es corta, y el de un abanico, cuando es muy extensa. En algunos cometas la longitud de la cola alcanza a muchos millones de kilómetros, extendiéndose ya en forma más o menos rectilínea en una dirección que pasa por el Sol, ya en forma de arco a curvatura poco pronunciada. En cuanto a su mayor o menor iluminación depende del mayor o menor brillo del núcleo.

2º El aspecto que ofrece un cometa telescópico es bien distinto al de los cometas visibles a simple vista, pues mientras éstos se destacan por el desarrollo de su cola, aquéllos en cambio presentan

una cabellera muy abultada, apareciendo la cola en ocasiones como un débil penacho y en otras sin manifestarse, en cuyo caso el astro se muestra al telescopio como una masa más o menos redondeada, con poca o ninguna diferencia entre el brillo del núcleo y el de la cabellera. En general, cuando un cometa está muy alejado del Sol, el cuerpo del astro queda reducido únicamente a la cabellera.

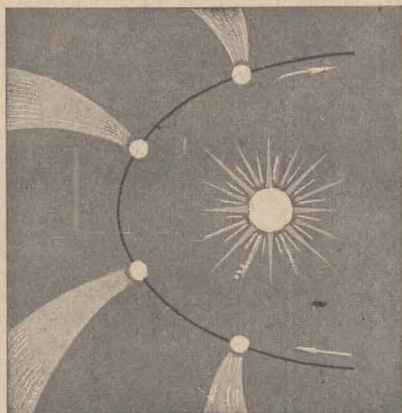


Fig. 197. — La cola de un gran cometa se aleja siempre del Sol.

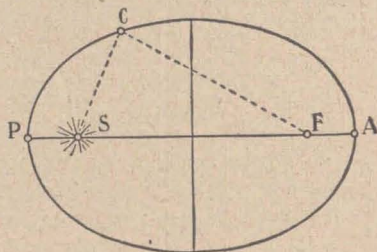
Es curioso el hecho, de que los cometas telescópicos presenten sus poco desarrolladas colas, en caso de tenerlas, dirigidas hacia el Sol y no en el sentido contrario como las muestran los cometas visibles a simple vista.

* 247. ORIGEN DE LOS COMETAS, —

Durante mucho tiempo se han debatido dos hipótesis acerca del origen de estos astros, pues mientras muchos astrónomos los consideraban como cuerpos

forjados en nuestro Sistema Solar, otros los creían formaciones provenientes de diversos sistemas estelares.

En el día se admite la primera de dichas hipótesis, apoyada en argumentos de cierto peso. En efecto: si los cometas fueran astros provenientes de otros sistemas, sus órbitas debieran ser en general hiperbólicas, es decir, que el astro después de pasar por el perihelio, se alejaría para no volver más, lo cual no pasa con buena parte de ellos que hacen sus apariciones periódicamente describiendo alrededor del Sol elipses muy excéntricas. Por otra parte, sabemos que el Sol se desplaza hacia el ápex a razón de 20 kilómetros por segundo, y si en realidad los cometas proceden de otros sistemas, el mayor número aparecería desde las regiones del Cielo situadas hacia dicho punto, ya que el Sol les iría al encuentro. Las estadísticas cometarias demuestran en cambio que es menor el número de los cometas provenientes del semiespacio que contiene al ápex, que el de los que llegan desde el semiespacio opuesto.



* 248. ORBITAS COMETARIAS: EXCENTRICIDAD; INCLINACION. — 1. De las secciones cónicas, circunferencia, elipse (fig. 198), hipérbola (fig. 199) y parábola (fig. 200), la primera y la última son poco probables como órbitas cometarias.

Fig. 198. — La elipse. $CS + CF = PA$.

En el año 1664, sostuvo Borelli que las trayectorias de los cometas eran parabólicas, y fué el mismo Newton quien comprobó que estos astros se desplazan en el espacio siguiendo su célebre ley, quedando la duda de si las órbitas recorridas son realmente parábolas o bien elipses de fuertes excentricidades.

Las estadísticas hechas sobre las diversas apariciones de cometas citadas por las crónicas desde antes del advenimiento de la era cristiana, pusieron de manifiesto que muchos de los cometas vistos en distintas épocas son *periódicos*, es decir, que de tiempo en tiempo vuelven a mostrarse al hombre en sus acercamientos al Sol, mientras otros después de aparecer en una ocasión desaparecen para no ser vistos en lo sucesivo (cometas *no periódicos*). De tales comprobaciones, se desprende que los cometas periódicos describen elipses de fuertes excentricidades, y los no periódicos se desplazan probablemente según trayectorias parabólicas o hiperbólicas.

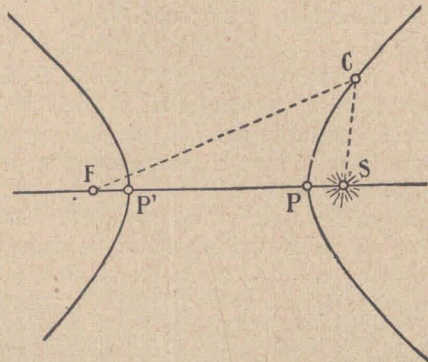


Fig. 199. — La hipérbola. $CF - CS = PP'$.

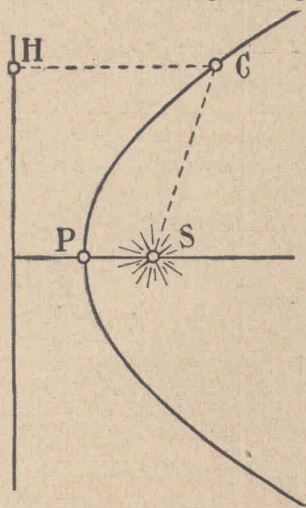


Fig. 200. — La parábola.
 $CS = CH$.

La acción ejercida por las masas de Júpiter y Saturno sobre la trayectoria de los cometas es muy considerable, pudiéndose traducir en dos formas: bien convirtiendo una órbita elíptica en otra parabólica o hiperbólica, en cuyo caso el cometa deja de ser periódico, bien transformando una órbita elíptica muy alargada (de apariencia parabólica) en otra de menor excentricidad, en cuyo caso se dice que el cometa es capturado por el astro perturbador, convirtiéndose en periódico de período más reducido.

Los cometas capturados por Júpiter, Saturno y Neptuno forman las llamadas "*familias*" de tales planetas, siendo numerosa en particular la de Júpiter. El cometa de *Halley*, cuya última aparición se verificó en el año 1910, pertenece a la "*familia*" de Neptuno.

Para saber de qué "*familia*" es un cometa periódico, basta conocer su distancia afelia (mayor alejamiento del Sol), pues si ésta es del orden de las distancias al Sol de Júpiter, Saturno o Neptuno, se dice que tal cometa pertenece a una u otra de esas familias.

Algunos cometas, bajo la acción de las atracciones del Sol y Júpiter obrando en distintos sentidos, se han fraccionado, dando lugar a astros independientes con órbitas propias.

De unas 400 órbitas estudiadas, casi la mitad son recorridas en el sentido retrógrado.

* 249. **CONSTITUCION DE LOS COMETAS.** — Los cometas telescópicos aparecen en el Cielo bajo forma de masas globulares de brillo un tanto difuso, con todo el aspecto que presentan en la Tierra las formaciones constituídas por partículas sólidas o líquidas muy próximas entre sí: nubes, humo, etc. Como las masas cometarias son insignificantes, ya que no ejercen acción apreciable sobre las órbitas de los planetas y satélites cercanos, es de presumir que su constitución sea análoga a las de las formaciones terrestres ya citadas, hipótesis que es confirmada por el hecho, de que a través de los cometas telescópicos pueden verse las estrellas sin disminución aparente de brillo. Esto indicaría que los corpúsculos constituyentes de estos astros están muy espaciados entre sí. Además, como la luz proveniente de las estrellas no sufre desviación alguna al atravesar las masas cometarias, puede deducirse que tales corpúsculos están en estado sólido.

En cuanto a la cola de un cometa, no es un apéndice del mismo como antes se creía, pues de ser así no podrían concebirse las velocidades con que giran en las cercanías del perihelio, tratándose de masas tan poco densas. En la actualidad se las considera como un "*humo*" que el cometa va abandonando en su marcha por el espacio, al igual del que emerge de la chimenea de una locomotora en movimiento. Ese "*humo*" cometario, constituido por finísimas partículas, es proyectado en el espacio debido a la acción de una especie de "*brisa*" o "*soplo*" persistente proveniente del Sol.

Dicho "*soplo*", actuando como fuerza repulsiva, es la "*presión de la luz*" que se manifiesta sobre partículas muy pequeñas.

* 250. **CHOQUES CON LA TIERRA.** — En muchas ocasiones se ha preguntado el hombre cuáles serían las consecuencias de un choque entre un cometa y la Tierra. En primer lugar, las probabilidades de tal choque son muy remotas dada las enormes dimensiones del espacio interplanetario. No puede decirse lo mismo de un paso del planeta que habitamos por la cola de uno de esos astros, cosa que ya ocurrió en los años 1861 y 1910 sin que se hayan notado efectos de ninguna naturaleza. En el supuesto de que pudiera producirse un encuentro entre la Tierra y el núcleo de un cometa, las consecuencias que se derivarían podrían ser variadas, según se tratara de un cometa telescópico o de uno de los grandes visibles a simple vista. En el primero de esos casos, lo más probable, sería la producción de una intensísima lluvia de meteoritos, apareciendo la superficie del planeta como bombardeada por numerosos bólidos cuyos residuos de pequeños tamaños llegarían al suelo animados de fuertes velocidades; en el segundo las consecuencias serían mayores, aun cuando no pueden preverse, pues desconocemos la magnitud de las masas cometarias.

Se ha calculado, que si la Tierra en 1910 hubiera atravesado la parte principal de la cola del cometa de Halley, habría substraído al mismo unas 250 toneladas de materia, y tal cantidad repartida sobre la superficie del planeta pasaría inadvertida en razón de la gran masa de éste.

MONOGRAFIAS DE ALGUNOS COMETAS IMPORTANTES

* 251. COMETA HALLEY. — Este gran cometa observado por última vez en el año 1910, tiene un período aproximado de 75 años y 6 meses. Su órbita forma el afelio a mayor distancia que Neptuno, por lo cual se le considera de la "familia" de este planeta. En su perihelio se ubica a unos 23.000.000 de kilómetros del Sol.

El astro fué observado y estudiado por HALLEY en su aparición del



Fig. 201. — El cometa Morehouse en noviembre 16 de 1908, fotografiado desde el Observatorio de Yerkes.

año 1682, por lo cual se le asignó el nombre del gran astrónomo inglés.

Investigaciones posteriores revelaron que el cometa había sido visto, según lo consignan las crónicas, desde el año 187 a. de J. C. habiendo efectuado hasta la fecha 27 apariciones.

Las perturbaciones ejercidas sobre su órbita por los grandes planetas hacen que el periodo de este cometa presente variaciones hasta de varios meses. Así, su aparición del año 1759 fué retardada en casi 20 meses por las atracciones de Júpiter y Saturno, pero ya CLAIRAUT había previsto y

calculado este efecto. En su aparición última pasó por el perihelio el 20 de abril, tres días después de lo calculado por algunos astrónomos. El 19 de mayo el núcleo del cometa desfiló ante el disco del Sol, calculándose para la "cabeza" un diámetro de un millón de kilómetros, e indudablemente entonces, la Tierra fué envuelta en una cola secundaria del astro. En tal fecha la longitud de la cola se avaluaba en 30 millones de kilómetros. Este cometa pudo ser seguido y estudiado desde setiembre de 1909, hasta junio de 1911 en que dejó de ser perceptible al telescopio. La próxima aparición se registrará a fines del año 1986.

* 252. **COMETA MOREHOUSE.** — Fué descubierto el 1 de setiembre de 1908, siendo el astro que aportó mayores revelaciones a la astronomía cometaria por los notables y rápidos cambios en la configuración de la cola y las conclusiones derivadas del estudio de su espectro.

Desde su aparición, se hizo notable por las variantes en el brillo y forma de la cola, las que fueron sorprendentes en setiembre, a tal punto que varios astrónomos las consideraron debidas a verdaderas explosiones que superaban en mucho a las que se habían observado en el cometa de *Rordame* el año 1893.

* 253. **COMETA BROOKS.** — Fué descubierto en 1889, siendo el V que ese año pasó por el perihelio. El astrónomo BARNARD del Observatorio de Jerkes, descubrió dos compañeros más débiles que el principal, pero presentando grandes analogías con el mismo, por lo que puede suponerse que estos cometas secundarios eran desprendimientos del astro principal cuyo período se calculó en 7 años aproximadamente. Además de los dos cometas secundarios citados, se descubrió desde Viena un tercer acompañante. Uno de los cometas secundarios descubiertos por Barnard perdió el núcleo al cabo de corto tiempo y después de convertirse en una masa difusa fué esfumándose hasta desaparecer, mientras el núcleo del tercer acompañante adquiría tal brillo, que alcanzó a superar al del cometa principal, para declinar después hasta su estado primitivo.

* 254. **COMETA ENCKE.** — En sus diversas apariciones, verificadas en 1786, 1795, 1805 y 1818, no demostró poseer un período fijo de revolución. En el año 1818 lo encontró Pons en Marsella, identificándosele después con el de 1805. ENCKE es el que emprende los cálculos que le llevan a demostrar que el período de revolución es de unos 1.200 días, es decir, 3,28 años y que si no se le había observado en todas sus apariciones, se debía a que no siempre se presentaba en condiciones favorables de visibilidad.

* 255. **COMETA BIELA.** — Fué observado por el astrónomo austriaco BIELA en 1826, determinándose su período en unos 6 años, 9 meses. Después se comprobó que había sido visto antes en 1772 y 1805, no habiéndosele percibido en otras ocasiones por presentarse en condiciones desfavorables de observación. En 1845 volvió a vérselo sin que se apreciaran en él cambios notables en un principio, pero a fines de diciembre ya había experimentado variaciones realmente extraordinarias. Llamó mucho la atención el hecho de que se fraccionó en dos cometas de aspectos distintos en forma y brillo, pero el menor fué haciéndose cada vez más brillante hasta igualar al otro en febrero de 1846, a partir de cuya fecha fué declinando hasta desaparecer en marzo, mientras el compañero siguió viéndose otro mes más. Su aparición siguiente se efectuó en agosto de 1852, apareciendo el cometa principal y el acompañante, pero separados ahora en cerca de 2.500.000 kilómetros. Ambos desaparecieron a fines de setiembre de ese año para perderse definitivamente, pues en vano se esperó la vuelta

en las épocas que el cálculo asignaba para sus apariciones, que debían ser los años 1859, 1865, 1872, ... etc. Se da por comprobado que las intensísimas lluvias de estrellas fugaces observadas en las noches del 27 de noviembre de 1885 y 23 de noviembre de 1892, fueron motivadas por fragmentos del antiguo cometa de Biela atraídos por la Tierra y penetrando en la atmósfera de la misma.

* 256. OTROS COMETAS IMPORTANTES. COMETA DONATI. — Fué descubierto desde Florencia en junio de 1858, apareciendo en un principio como una difusa masa globular, pero cuatro meses después brillaba como una estrella de 1^a magnitud, cerca de ARTURO, alcanzando su cola en tal época, la longitud de 70 millones de kilómetros. Una de sus características esenciales fué, precisamente, la forma poco común de la cola muy parecida a la de una pluma de ave. Además, presentaba este cometa en su época de mayor brillo otra cola secundaria estrecha y rectilínea.

COMETA DE 1744. — Tal vez el más notable en luminosidad de todos los vistos por el hombre, pues se le alcanzaba a divisar a simple vista en pleno mediodía. Por la noche presentaba un aspecto fantástico con sus seis colas dispuestas en abanico.

COMETA DE 1843. — De los cometas del siglo XIX, es uno de los más importantes en razón de haber sido el que más se acercó al Sol, ubicándose el núcleo en el perihelio a sólo unos 130.000 kilómetros de su superficie. Su cola, recta, estrecha y de extraordinario brillo, alcanzó a la enorme longitud de 250 millones de kilómetros.

METEOROS COSMICOS

* 257. ESTRELLAS FUGACES. — Se designa con este nombre a los numerosos puntos brillantes que aparecen inopinadamente en el Cielo, en particular en ciertas fechas del año, y que después de recorrer una trayectoria más o menos amplia desaparecen repentinamente, dejando o no rastros a lo largo del recorrido. Debido a que tales recorridos aparecen siempre al observador como arcos de círculos máximos de la esfera celeste, puede deducirse que las estrellas fugaces se desplazan generalmente en línea recta.

La duración del fenómeno, inapreciable casi en algunas ocasiones, suele alcanzar a dos o tres segundos de tiempo en otras, y en casos excepcionales hasta cuatro, y en cuanto al brillo de estas efímeras luminosidades, suele ser el correspondiente al de las estrellas de 6^a, 5^a, 4^a, 3^a y hasta 2^a magnitud. La luz que nos muestran, por lo general blanca, presenta en algunas ocasiones tonalidades rojizas, verdosas o azuladas.

En toda noche despejada y sin Luna pueden verse, en término medio, de 5 a 6 estrellas fugaces por hora; pero, en fechas especiales del año su número puede alcanzar hasta varios millares en el mismo espacio de tiempo.

Para su mejor estudio pueden dividirse las estrellas fugaces en dos categorías: ESPORÁDICAS y PERIÓDICAS.

Las *esporádicas* pueden verse en toda época del año emanando desde distintos puntos del Cielo como fenómenos independientes los unos de los otros; en cambio, las *periódicas*, que aparecen en gran número en fechas determinadas, parecen surgir de puntos determinados de la esfera celeste llamados *puntos radiantes*, constituyendo verdaderos *enjambres* con trayectorias paralelas e iguales velocidades en sus desplazamientos cuando emergen del mismo radiante. En ciertos casos es tal el número de estrellas fugaces del mismo enjambre, que el fenómeno se convierte en una verdadera "lluvia de estrellas".

Los dos principales enjambres de estrellas fugaces tienen sus puntos radiantes en las regiones del Cielo ocupadas por las constelaciones de PERSEO y LEÓN. Las del enjambre de Perseo, llamadas *Perseidas* o *Lágrimas de San Lorenzo*, aparecen en las noches comprendidas entre el 10 y el 13 de agosto de cada año; las del enjambre del León, denominadas *Leónidas*, pueden verse en gran número en las noches del 11 al 13 de noviembre.

Además de los importantes enjambres que se acaban de mencionar, existen otros muchos cuyos radiantes están ubicados en distintas regiones de la esfera celeste, pudiéndose citar las *Ariétidas*, *Táuridas*, *Geminidas*, etc. El nombre de estos enjambres deriva del de la constelación donde parece estar ubicado el radiante.

Algunas estrellas fugaces, sobre todo de las leónidas, suelen dejar rastros a lo largo de sus recorridos, los cuales se presentan bajo forma de vapores o cenizas, que van disipándose más o menos lentamente, bajo la acción de las altas corrientes atmosféricas. En otros casos el fenómeno es acompañado de una especie de chisporroteo cuyas huellas luminosas persisten, a veces, durante algunos segundos.

* 258. ORIGEN DE LAS ESTRELLAS FUGACES. — Antiguamente se consideró a las estrellas fugaces como fenómenos lumino-

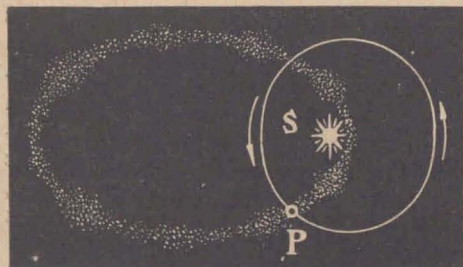


Fig. 202. — Pasaje de la Tierra por un anillo meteórico. (N. D.).

sos con asiento en nuestra atmósfera. En la actualidad se han disipado las dudas relativas a la naturaleza de estos fenómenos a raíz de las investigaciones realizadas sobre los principales enjambres por SCHIAPARELLI, HEIG, SCHMIDT, DENNING y otros muchos astrónomos. Se deduce de ellas, que en el espacio interplanetario

existen copiosísimas multitudes de pequeños corpúsculos, que a modo de diminutos asteroides o cometas se desplazan alrededor del Sol, describiendo órbitas muy excéntricas. Muchos de estos corpúscu-

los, más o menos espaciados entre sí, dan lugar a la formación de anillos elípticos con focos en el Sol, más densos en algunas de sus partes que en otras. Si se supone entonces que la Tierra en su revolución anual (fig. 202), se interna en uno de esos anillos al llegar al punto P de su órbita, se comprenderá como gran número de tales corpúsculos o piedras del espacio penetrarán en nuestra atmósfera a altas velocidades, de tal modo que su energía cinética, transformándose en calor, los llevará al estado de incandescencia que los convierte en estrellas fugaces.

Se calcula que los pedruscos que originan los meteoros cósmicos sólo pueden penetrar en nuestra atmósfera con velocidades comprendidas entre los 12 y los 72 km. por segundo.

ALTURA. Presenta muchas dificultades la obtención de las alturas en que una estrella fugaz inicia o termina su estela luminosa, ya que el fenómeno se produce en forma imprevista. Sin embargo, operando dos observadores separados por una distancia previamente determinada (fig. 203), bastará que éstos determinen el punto del Cielo en que ven proyec-

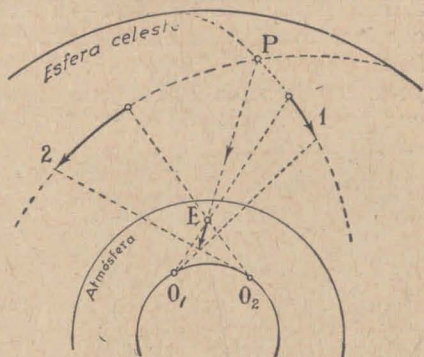


Fig. 203. — Dos observadores situados en O_1 y O_2 ven a la estrella fugaz E según los recorridos 1 y 2 sobre la esfera celeste. Dichos recorridos permiten fijar el punto P del Cielo, y conocida la distancia O_1O_2 , se calcula trigonométricamente la altura en que la estrella fugaz inicia o termina su estela luminosa.

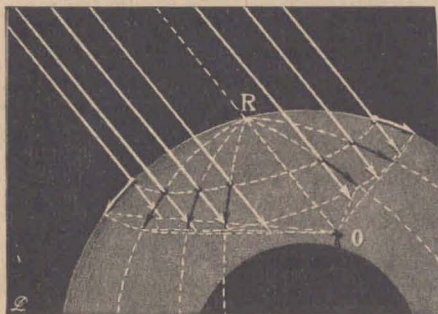


Fig. 204. — Explicación de los puntos radiantes.

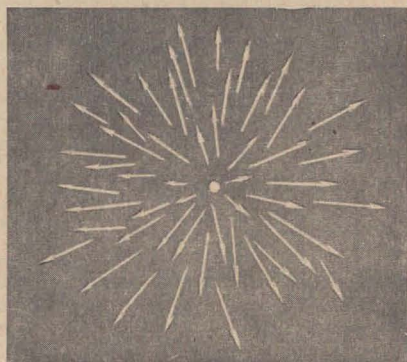


Fig. 205. — Punto radiante.

tarse a una misma estrella fugaz para determinar trigonométricamente la altura buscada. El mérito de la primera determinación de alturas de una estrella fugaz, debe ser asignado a dos estudiantes de Gottingen, BENZENBERG y BRANDES, quienes en 1798 alcanzaron el éxito apetecido. Hoy se emplea el método fotográfico,

Se ha encontrado que la altura de aparición oscila entre los 100 y 130 km., y la de extinción entre los 60 y 80 km.

* 259. **PUNTOS RADIANTES. PERIODICIDAD DE LOS ENJAMBRES METEÓRICOS.** — Consideremos un haz de corpúsculos que inciden sobre la atmósfera terrestre siguiendo trayectorias paralelas (fig. 204). El observador *O* verá las estelas luminosas proyectadas sobre la esfera celeste según arcos de círculos máximos que se cortan en un punto *R*, el cual se presenta como centro de irradiación de estrella fugaces (figura 205).

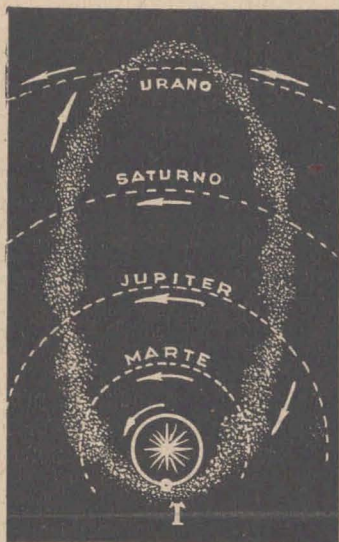


Fig. 206. — Órbita del enjambre de las leónidas. Período 33 años. (N. D.).

PERIODICIDAD. — Como ya se ha visto, los enjambres meteóricos tienen un período de aparición que es de un año, vale decir, el mismo en que la Tierra efectúa una revolución alrededor del Sol.

Con respecto a las leónidas (figura 206), parece existir otro período de 33 años 4 meses, aproximadamente, superpuesto al período anual.

ADAMS, de Cambridge, explicó a satisfacción el período anotado, admitiendo que el anillo meteórico de las leónidas, con todos sus corpúsculos, cumple una revolución alrededor del Sol en el tiempo indicado. Si se admite además que dicho anillo en una de sus partes ofrece una condensación de corpúsculos mayor que en toda otra región del mismo, se comprenderá que al ponerse en contacto con la órbita de la Tierra aquella condensación, al cabo de cada revolución sideral del anillo, se produzcan los efectos apuntados.

* 260. **RELACIONES ENTRE COMETAS Y METEOROS COSMICOS.** — Por las numerosas observaciones y estudios verificados por WEISS, SCHIAPARELLI y otros muchos astrónomos, parece ser un hecho ya comprobado que las órbitas de varios enjambres meteóricos importantes coinciden con las de diversos cometas ya desaparecidos, de modo que los corpúsculos que por incandescencia dan lugar a las estrellas fugaces, no serían más que los restos nucleares de aquellos astros.

El cometa Biela cuyo período era de 7 años, no pudo ser observado en 1839 por presentarse en condiciones precarias de visibilidad, pero sí lo fué en el año 1846 en que su núcleo se desdobló en

dos porciones dando lugar a otros tantos cometas parciales que siguieron su marcha a través del espacio según órbitas muy poco separadas entre sí. En el año 1852 volvieron a aparecer ambos astros gemelos, esperándoseles inútilmente en las apariciones que debieron efectuar en 1859 y 1866. Se les volvió a aguardar en el año 1872, habiéndose calculado que el 27 de noviembre del mismo, la Tierra debía atravesar la cola de uno de ellos.

La búsqueda resultó infructuosa, pero en la fecha indicada, una copiosísima lluvia de estrellas fugaces (*biéridas*) iluminó cierta región de la esfera celeste durante gran parte de la noche. El fenómeno se repitió en noviembre de 1885 con características semejantes, pero no volvió a observarse en lo sucesivo debido a las perturbaciones provocadas por la atracción de Júpiter sobre el enjambre meteórico formado por los restos del desaparecido cometa. Por diversas determinaciones, se ha afirmado también que la trayectoria seguida por el anillo meteórico de las leónidas, no es otra que la del antiguo cometa de TEMPEL, así como la de las perseidas coincidiría sensiblemente con la órbita del cometa de TUTTLE, cuyo período era de 108 años (fig. 207).

Sin embargo sería aventurado afirmar que todos los enjambres de meteoros cósmicos sean de origen cometario, debiéndose admitir la existencia en el espacio de numerosas nubes de corpúsculos meteóricos, además de las formadas por las disgregaciones cometarias.

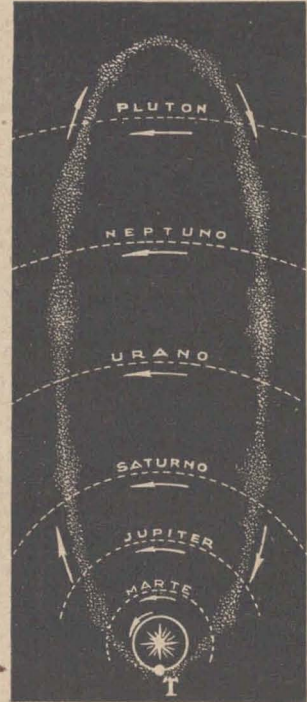


Fig. 207. — Probable órbita de las perseidas. Período 108 años. (N. D.).

* 261. ESTRELLAS FUGACES ESPORÁDICAS. — Además de los enjambres de estrellas fugaces que emanan de puntos radiantes en determinadas fechas del año, aparecen otras en cualquier época y en cualquier punto de la esfera celeste, pudiéndose contar en término medio, desde un lugar determinado, de 6 a 7 por hora. Si tenemos en cuenta que desde toda la superficie de la Tierra podrán verse en el mismo lapso un número 15.000 veces mayor, llegamos a la conclusión de que diariamente penetran en nuestra atmósfera alrededor de 2.000.000 de tales corpúsculos, sin contar los provenientes de los enjambres. A este número, habrá que agregar otro mucho mayor constituido por todos aquellos meteoritos cuya luminosidad escapa a la observación, el cual debe ser de muchos millones.

Se ha podido apreciar, por el tiempo que dura la luminosidad, de una estrella fugaz, que su masa es del orden de los décimos de gramo, por lo cual, a pesar de la constante caída sobre la Tierra de esta materia cósmica, la masa de nuestro planeta no aumenta en forma apreciable. En cuanto a la frecuencia con que se perciben estrellas fugaces, se ha observado que es mucho mayor horas antes



Fig. 208. — Las estrellas fugaces son más frecuentes al amanecer. (S. D.).

del amanecer, lo que se explica si se tiene en cuenta (fig. 208), que la parte de la Tierra en la cual aún no ha amanecido, es la que va al encuentro, por su movimiento traslatorio, de los corpúsculos que originan el fenómeno. Las estrellas fugaces del anochecer serían originadas, en cambio, solamente por aquellos corpúsculos cuya velocidad fuera superior a la de traslación de la Tierra.

BOLIDOS Y URANOLITOS

* 262. **BOLIDOS.** — En algunas ocasiones los corpúsculos del espacio que penetran en nuestra atmósfera suelen tener dimensiones más considerables que las de aquéllos que originan las estrellas fugaces, y en tales casos el meteoro llamado *bólido* adquiere características muy especiales. En un principio el bólido se muestra como

una masa de escaso brillo animada de un rápido movimiento y adquiriendo prontamente, por aumento de su brillo, todo el aspecto de un globo ígneo perceptible a veces en pleno día. Cuando el fenómeno se produce de noche, la iluminación que ocasiona en las regiones terrestres cercanas suele ser superior a la de la luna llena. El color de la luz emitida por el bólido experimenta grandes variantes: comienza en general por ser blanco o amarillento, adquiriendo poco después una pronunciada tonalidad verdosa, para terminar en el rojo, pudiéndose notar en las fases intermedias toda una gama de matices difíciles de precisar para los distintos observadores. En término medio, la frecuencia de los bólidos en toda la superficie de la Tierra es de unos 60 por año, casi la mitad de los cuales aparecen en pleno día, en cuyo caso dejan a lo largo de su trayectoria una faja de humo oscuro que persiste durante varios minutos y va disipándose lentamente arrastrada por las corrientes atmosféricas. Cuan-

do el fenómeno se verifica en horas de la noche, el rastro es blanco y brillante, abarcando en ocasiones una longitud superior a los 100 kilómetros.

La mayor parte de los bólidos, presentan un fuerte chisporroteo y explotan como una bomba en el momento culminante del fenómeno, percibiéndose la detonación, en ocasiones, a más de 100 kilómetros del lugar de la explosión. Esta, suele ser seguida de retumbos y detonaciones parciales parecidas al crepitar de ametralladoras, como si los fragmentos resultantes de la explosión principal fueran estallando a su vez; en muchos casos las crepitaciones suelen percibirse hasta varios segundos después de la explosión del bolido y en ocasiones hasta algunos minutos.

Los residuos de tales explosiones llamados *aerolitos* (piedras del aire) y con más propiedad *uranolitos* (fig. 209) (piedras del Cielo) llegan comúnmente a tierra, penetrando a pequeñas profundidades y conservando aún temperaturas elevadas durante algún tiempo. Casi siempre, los residuos del bolido se diseminan sobre una superficie de forma elíptica que algunos astrónomos llaman *campo de distribución*, siguiendo en su caída los fragmentos mayores, recorridos curvilíneos, y los menores sensiblemente rectilíneos.

Entre los bólidos más importantes registrados durante el siglo XIX, pueden citarse los siguientes:

El de abril del año 1803 que estalló en *L'Aigle*, departamento de L'Orne (Francia), cuyo campo de distribución abarcó una longitud de 11.000 metros por 1.000 metros de ancho, y en el cual se diseminaron más de 3.000 uranolitos, pesando algunos de ellos hasta 10 kilogramos; el de *New Concord* (Ohio) en mayo de 1860; el de *Orgueil* (Francia) del año 1864 cuya luz fué visible desde París a Santander; el de *Pultusk* (Polonia) en junio de 1868 que distribuyó sobre una vasta franja de tierra más de 100.000 uranolitos de todos los tamaños; el de *Homestead* (Yowa) del año 1890, etc. Uno de los más notables de los registrados en el siglo XX, es el bolido que estalló en *Holbrooc* (Arizona) en julio de 1912 y del cual se recogieron alrededor de 15.000 trozos.

En ocasiones se han hallado a ciertas profundidades, algunos uranolitos de peso considerable: el de *Villamette* pesa alrededor de 16.000 kilogramos y se conserva como un objeto raro en el museo de New York, siendo el de *Ranchito* (Méjico), de 50 toneladas el mayor que se ha encontrado hasta ahora.

Si la Tierra no estuviese rodeada de una elevada capa atmosférica, los voluminosos y pesados cuerpos que constituyen los bólidos, llegarían directamente a su superficie animados de grandes velocidades, originando los destrozos consiguientes. La atmósfera, constituye para el planeta,



Fig. 209. — Uranolito de 237 kg. encontrado en 1896 en Nueva Méjico. Las dos líneas transversales corresponden a cortes efectuados para su estudio.

una capa protectora contra el bombardeo de bólidos, mucho más eficaz que la más rígida de las corazas, ya que al provocar la explosión de tales proyectiles, hace que a la superficie sólo lleguen fragmentos poco considerables de los mismos.

*** 263. CONSTITUCION QUIMICA DE LOS URANOLITOS. —**

El elemento predominante en los uranolitos es sin duda alguna el hierro, ya presentándose al estado nativo, ya bajo la forma de sulfuro o de protóxido. En ocasiones, los compuestos ferruginosos aparecen mezclados con materiales pétreos formando una masa esponjosa en la que se presenta comúnmente la sílice y la magnesia, al par que diversos silicatos de los que abundan en las piedras terrestres. Otros elementos comunes en estas piedras del Cielo son: níquel, cobalto, cromo, manganeso, azufre, cloro, aluminio, estaño, cobre, etc., habiéndose logrado hallar en casos muy raros el carbono al estado de grafito, y hasta de diamante, aun cuando en pequeñísima proporción.

*** 264. URANOLITOS ARGENTINOS. —** En 1783 MIGUEL RUBÍN DE CELIS describe al hierro meteórico hallado por los indios en el desierto del Gran Chaco llamado *Otumpa* y que aquéllos designaban con el nombre de *Mesón de Hierro*. Este uranolito de *Otumpa* sobresalía del suelo, según CELIS, sólo unos 30 cm. y su peso debía ser de unas 15 toneladas. Un trozo de hierro meteórico hallado cerca de la masa principal fué transportado a Buenos Aires y regaiado al embajador inglés, el cual lo remitió al Museo Británico, donde se encuentra desde 1826. El Museo de La Plata posee del *Otumpa*, sólo un fragmento de 870 gramos, en tanto que el que se conserva en el Museo de Londres tiene un peso cercano a los 650 kg. Por más que se ha buscado empeñosamente, la masa

principal de “*Mesón de Hierro*”, no ha podido ser reencontrada hasta hoy.

En noviembre de 1923 fué encontrado un hierro meteórico de 4.210 kg. a 21 kilómetros al sudoeste de la estación Gancedo (F. C. C. N.) que desde 1925 se conserva en el Museo de Buenos Aires, habiéndole designado su director, profesor MARTÍN DOELLO JURADO, con el nombre indígena de “*El Toba*”.

A menos de 10 kilómetros del lugar donde fué hallado *El Toba*, se encontró en agosto de 1925 “*El Mocoví*” de 732 kilogramos de peso. En la misma región comprendida entre la



Fig. 210. — Figuras de corrosión en el uranolito de Puerta de Arauco. (Original del Dr. Herrero Ducloux)

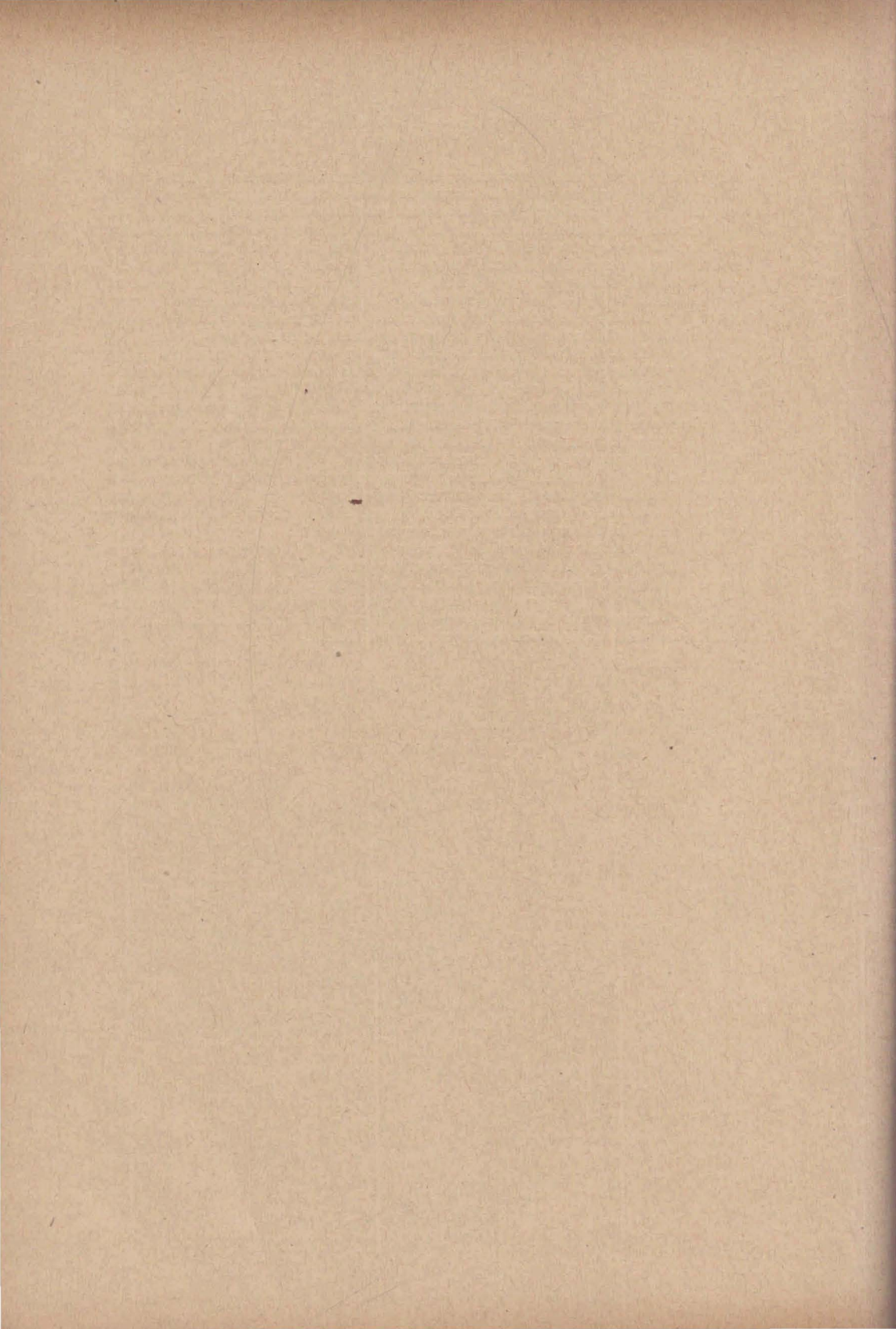
provincia de *Santiago del Estero* y la gobernación del *Chaco*, se han encontrado otros trozos de hierro meteórico por lo cual se ha denominado a la misma “*Campo del Cielo*”.

Las investigaciones llevadas a cabo por el químico argentino doctor ENRIQUE HERRERO DUCLOUX sobre esos uranolitos, conducen a la conclusión de que todos ellos, incluso el de *Otumpa*, han pertenecido a un bolido

cuya masa originaria debe haber sido de unas 100 toneladas. El *Campo del Cielo* no sería más que el *campo de distribución* del gigantesco bóido cuya explosión se efectuó posiblemente antes del descubrimiento de América.

Entre los procedimientos seguidos para clasificar e individualizar a los meteoritos, aparte del análisis químico, tiene particular importancia el estudio de las curiosas figuras de corrosión que aparecen en una superficie pulida del mismo, al ser atacada por un ácido. La figura 210, muestra esas figuras de corrosión obtenidas por HERRERO DUCLOUX en el hierro meteórico de la *Puerta de Arauco* caído en ese lugar (La Rioja), en 1904. La trama revela lo complicado de la estructura interna del mismo.

Pero de todos los uranolitos que se han encontrado hasta ahora en suelo argentino, el de mayor valor científico es, sin duda alguna, el *uranolito carbonoso de Nogoyá* caído el 30 de junio de 1879 en la provincia de Entre Ríos, en las cercanías del lugar que le dió nombre. Este uranolito, cuyo peso original era de 2.250 gramos, se dividió en varios fragmentos que se repartieron para su estudio entre las principales academias científicas y museos del mundo, conservándose en el Museo de Buenos Aires un trozo de 356 gramos. Sobre este pequeño trozo el doctor HERRERO DUCLOUX realizó sus investigaciones confirmando que en él se encontraban *humoides*, es decir, cuerpos complejos de naturaleza orgánica como los que se hallan en la tierra arable y que son resultados de procesos bioquímicos bien definidos. Los átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno se hallaban en el uranolito formando moléculas como las que engendran los seres orgánicos en sus manifestaciones vitales. Los contados ejemplares de uranolitos de esta clase encontrados hasta hoy en el mundo entero parecen traernos un mensaje revelador de la existencia de vida, en quién sabe que remotas regiones del espacio y del tiempo.



LIBRO SEXTO
ESTRELLAS Y NEBULOSAS

INTRODUCCION A LA ASTRONOMIA ESTELAR

265. **GENERALIDADES.** — Hace apenas un siglo hubiera parecido absurdo creer que algún día se podría tener conocimientos positivos acerca de las condiciones físicas que reinan en las estrellas y nebulosas más lejanas. Sin embargo, esos conocimientos constituyen hoy toda una realidad. La débil luz que recibimos de estrellas y nebulosas remotas, captada por los potentes telescopios modernos, fijada en placas fotográficas ultrasensibles, analizada por poderosos espectrógrafos, medida su intensidad por fotómetros sensibilísimos, permite al hombre inducir de ese cúmulo de hechos el estado físico, presión, temperatura, densidad, etc., así como la composición química de la materia diseminada en el espacio ilimitado en forma de estrellas y nebulosas.

Comenzaremos por estudiar los instrumentos de observación.

INSTRUMENTOS DE OBSERVACION

266. **ANTEOJO ASTRONÓMICO. REFRACTORES Y REFLECTORES.** — La figura 211 representa esquemáticamente un anteojo astronómico refractor.

La imagen de un objeto lejano dada por el objetivo Ob , se produce en el plano focal del mismo PP' . Esta imagen se observa a través del ocular O_c . Si se acomoda el ojo para ver nítidamente al infinito, el foco

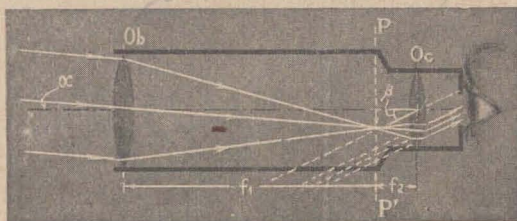


Fig. 211. — Anteojo refractor.

del ocular debe coincidir con el del objetivo. De este modo el haz de rayos que parte de cualquier punto de la imagen que está en el plano PP' , que es también el plano focal del ocular, después de atravesar a éste se convierte en un haz de rayos paralelos, que el sistema óptico del ojo del observador hará converger en un determinado punto de su retina.

Si llamamos I al diámetro de la imagen dada por el objetivo, siendo α el diámetro aparente del objeto se tiene:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I}{f_1},$$

donde f_1 es la distancia focal del objetivo. Llamando β al diámetro aparente con que se ve la imagen a través del ocular, tenemos:

$$tg\beta = \frac{I}{f_2},$$

siendo f_2 la distancia focal del ocular.

El *aumento* es la relación entre la tangente del diámetro aparente del objeto observado con el anteojo, y la tangente del diámetro aparente del mismo observado sin anteojo, o sea:

$$a = \frac{tg\beta}{tg\alpha} = \frac{f_1}{f_2}. \quad [1]$$

Este aumento da también la relación entre el diámetro lineal de la imagen retiniana observada con el anteojo y el diámetro de la imagen del objeto que se produce en la retina al observarlo a simple vista.

El objetivo de los anteojos refractores consta, en realidad, de dos lentes adosadas con el objeto de corregir la aberración cromática y de esfericidad, correcciones que no se pueden llevar a cabo en forma absoluta.

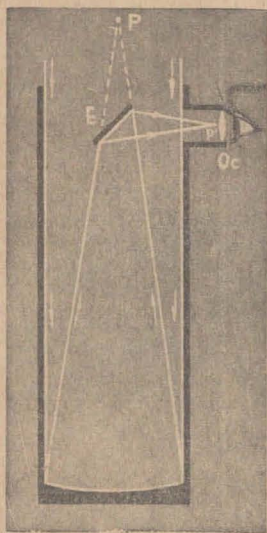


Fig. 212. — Telescopio de Newton

En los anteojos reflectores, en los cuales el objetivo está constituido por un espejo cóncavo, no existe aberración cromática alguna y la aberración de esfericidad se corrige dándoles forma parabólica. Estos espejos son de vidrio, cuya superficie se platea o aluminiza por un procedimiento especial. La figura 212 representa un corte esquemático del Hamado telescopio de Newton. El espejo plano E inclinado a 45° con respecto al eje del anteojo, hace que la imagen del objeto se produzca en P' en lugar de hacerlo en P , donde se observa con el ocular Oc .

Las figuras 213 y 214 muestran otros tipos de reflectores.

Veremos más adelante que el poder de un anteojo depende fundamentalmente del diámetro del objetivo, el cual conviene que sea lo más grande posible. Si se trata del objetivo de un refractor, hay que trabajar cuatro superficies ópticas, en tanto que en los reflectores basta con una sola. Por esta circunstancia los telescopios de mayor poder en uso actualmente son reflectores.

Se entiende por *claridad* de una imagen retiniana, a la cantidad de luz que incide sobre la unidad de superficie de la retina.

La *claridad* de un anteojo no es otra cosa que la relación entre la claridad con que se ve con él una superficie iluminada, la Luna,

p. ejem., y la claridad con que se la vería observándola a simple vista.

Para aprovechar por completo toda la luz que penetra por el objetivo y obtener con el anteojo una claridad máxima, debe procurarse que aquella luz penetre íntegramente por la pupila del ojo del observador.

La llamada *pupila de entrada* del instrumento no es otra cosa que el mismo objetivo, y la *pupila de salida*, por donde salen todos los rayos que entraron por aquél no es más que la imagen del objetivo dada por el ocular. Dirigiendo el anteojo hacia cualquier superficie brillante, se percibe la pupila de salida como un pequeño círculo luminoso colocado delante del ocular.

Los objetos con diámetro aparente sensible, como la Luna, aparecen siempre en la observación telescópica con brillo menor que observados a ojo desnudo. En cambio las estrellas, que no tienen diámetro aparente apreciable, se perciben con un brillo tanto mayor, cuanto mayor sea la superficie del objetivo.

Las estrellas aparecen siempre, por grande que sea el aumento empleado, como puntos brillantes. El poder de un anteojo, en lo que a la observación estelar se refiere, está dado por el brillo de las imágenes que es capaz de dar y por su *poder separador*. Se dice que el poder separador de un anteojo es de α si es posible percibir con él, nítidamente separadas, dos estrellas distantes angularmente en esa magnitud.

Brillo y poder separador dependen esencialmente del diámetro del objetivo. La limitación en el

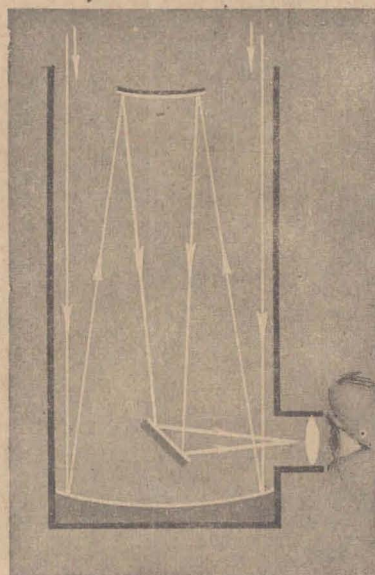


Fig. 214. — Telescopio combinación Cassegrain y Newton

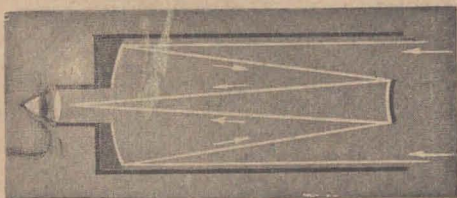


Fig. 213. — Telescopio Cassegrain. El objetivo está perforado en el centro desde donde se observa. Un espejo convexo, hiperbólico, envía la luz que recibe del objetivo al ocular.

poder separador de un instrumento se debe a fenómenos de difracción, por los cuales la imagen de una estrella es un pequeño círculo en lugar de un punto. La fig. 215 muestra como se ven dos estrellas próximas, con anteojos del mismo aumento y cuyas aberturas (diámetro de los objetivos) están en la relación 1; 2 y 4.

* 267. AUMENTO EXIGIBLE. — Debido también a la difracción el ojo humano tiene un poder separador de $1'$ aproximadamente, lo que quiere decir que se pueden ver separados dos puntos, siempre que su distancia angular sea igual o mayor de $1'$.

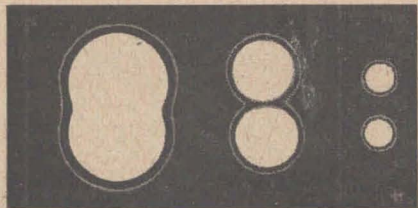


Fig. 215. — Poder separador de un anteojo.

Este ángulo de $1'$ es el ángulo bajo el cual se ve un segmento de 1 mm. colocado normalmente a la visual a una distancia de 3,44 metros.

Si el objetivo es capaz de separar dos estrellas o dos puntos que distan angularmente en α segundos, para verlas separadas a través del ocular será necesario que éste permita recibirlo bajo un ángulo de $1'$ por lo menos, o sea, de $60''$, por lo cual el aumento mínimo indispensable o aumento exigible será:

$$a_e = \frac{60''}{\alpha}$$

Para un objetivo de unos 20 cm. de diámetro, cuyo poder separador es de $1''$ aproximadamente, se requerirá un aumento igual a 60, lo que significa que si la distancia focal del objetivo es igual, p. ejem., a 120 cm., la del ocular deberá ser igual o menor a 2 cm. Conviene utilizar para una visión cómoda, aumentos 2 ó 3 veces mayores que el exigible. En condiciones atmosféricas favorables pueden utilizarse aumentos 6 ó 7 veces mayores (*aumento máximo*).

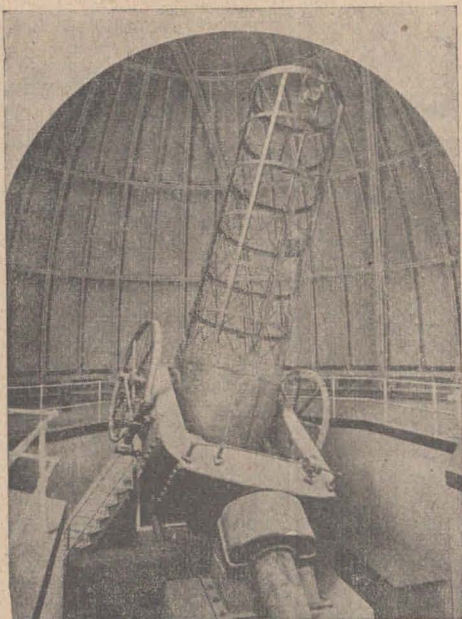


Fig. 216. — Reflector de 1,52 m. de abertura del Observatorio Astrofísico de Bosque Alegre, dirigido por E. Gaviola, sucursal del de Córdoba. En el hemisferio austral sólo el reflector instalado en Africa del Sur, sucursal del Harvard College, lo iguala en dimensiones

* 268. CAMPO. — Se llama campo de un anteojo al ángulo con vértice en el centro del objetivo formado por dos generatrices opuestas del cono que limita el espacio que puede ser visto por medio del instrumento. También se le llama campo a dicho espacio. Para lograr una iluminación uniforme del mismo,

se coloca en el plano focal del objetivo un diafragma consistente en un disco metálico con un orificio circular, cuyo centro coincide con el eje óptico del anteojo. Este diafragma viene unido a la armadura del ocular.

Es fácil demostrar que el campo es tanto menor cuanto mayor es el aumento, por lo cual los anteojos muy potentes están munidos de otro más pequeño de mayor campo que se denomina *buscador*. El eje óptico del buscador debe ser paralelo al eje óptico del anteojo.

269. ASTROGRAFICOS. — Actualmente la fotografía estelar ha reemplazado casi por completo a la observación visual. En el plano focal del objetivo se coloca la placa fotográfica. La región del Cielo a fotografiarse se localiza por un anteojo auxiliar provisto de retículo y cuyo eje debe coincidir con el del anteojo principal.

El montaje del anteojo debe ser ecuatorial y un preciso aparato de relojería permite seguir al astro en su movimiento diurno, lográndose así la posibilidad de obtener fotografías con largos tiempos de exposición.

Al aumentar el tiempo de exposición las estrellas más brillantes aparecen en la placa como círculos de diámetro relativamente grande. Ello se debe a que la luz se difunde en los gránulos de la emulsión sensible. Esta circunstancia hace dificultoso el revelar la existencia de una estrella débil cercana a otra mucho más brillante.

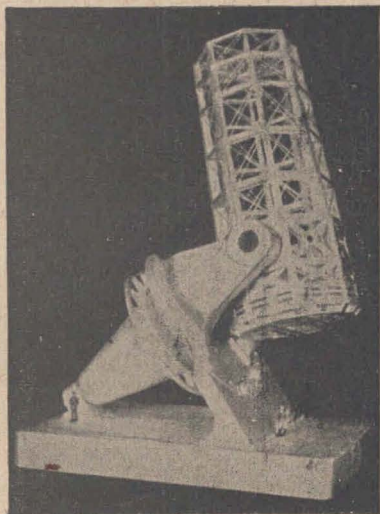


Fig. 217. — Proyecto del gran reflector de 5 m. de abertura de Monte Palomar. En las medidas para el parabolizado del espejo se empleará un método ideado por los físicos argentinos E. Gaviola y R. Platzek.

270. DIMENSIONES DE REFRACTORES Y REFLECTORES.

— Cuanto mayor es el diámetro del objetivo, mayor es, como hemos visto, el poder separador del anteojo y también su poder lumínico. En el cuadro siguiente damos las características ópticas de diversos objetivos, desde el modesto anteojo de 5 cm. de abertura hasta uno de 5 m. de diámetro que corresponde al gran reflector de Monte Palomar (fig. 217), que difícilmente se terminará de construir antes de 1944. Se ha supuesto igual a 5 milímetros el diámetro de la pupila del ojo.

POTENCIA DE LOS ANTEOJOS ASTRONOMICOS

Diámetro del objetivo cm.	Poder separador α	Aumento mínimo exigible	Se perciben estrellas hasta la magnitud	Se separan dos puntos de la Luna distantes en:	Una estrella como el Sol se vería aun situada a:
5	4"	15	11	7.400 m.	500 años luz
10	2"	30	12,5	3.700 "	1.000 " "
20	1"	60	14	1.850 "	2.000 " "
40	0",5	120	15,5	925 "	4.000 " "
100	0",2	300	17,5	370 "	10.000 " "
150	0",13	450	18,4	250 "	15.000 " "
250	0",08	750	19,5	148 "	25.000 " "
500	0",04	1500	21	74 "	50.000 " "

Actualmente, rara vez la distancia focal del objetivo llega a ser 10 veces mayor que su diámetro. Antes, en cambio, se construían anteojos muy largos. Así, el gran refractor de Yerkes (EE. UU.), en uso desde 1897 tiene un objetivo de 1 m. de diámetro y 21 metros de distancia focal. Con un simple ocular de 5 cm. se consigue

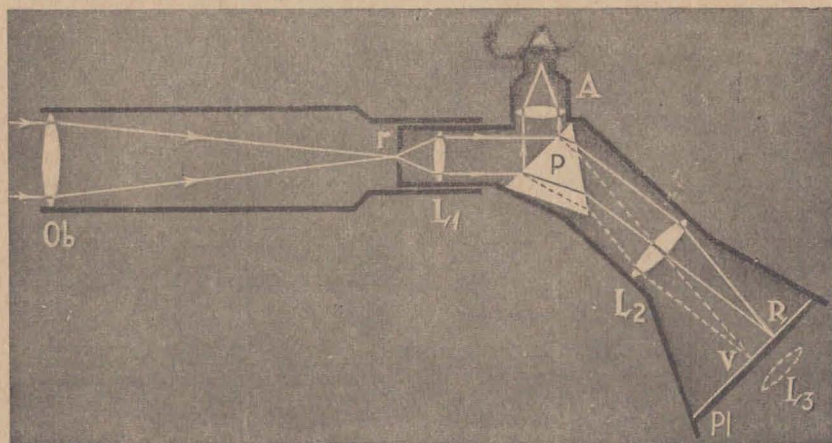


Fig. 218. — Espectrógrafo acoplado a un refractor.

un aumento de 420 diámetros. En cambio el gran reflector de Mount Wilson de 2,50 m. de diámetro, en uso desde 1919, tiene una distancia focal que es sólo unas 5 veces el diámetro: $f = 12,60$ m.

ESPECTROGRAFIA

271. ESPECTROSCOPIA Y ESPECTROGRAFIA. — La figura 218 representa esquemáticamente un espectroscopio cuya ranura

r se coloca en el plano focal del objetivo Ob del anteojo que recibe la luz del astro cuyo espectro se desea analizar. La lente L_1 , cuyo foco coincide también con r , transforma en paralelos los rayos que salen de la ranura. Si este haz de rayos fuera estrictamente monocromático, después de atravesar el prisma P y la lente L_2 , daría en el plano focal de ésta una imagen nítida de la ranura cuyo color sería el mismo que el de la luz utilizada. Si la luz que ilumina la ranura r estuviera formada por la superposición de luz roja monocromática y luz violeta también monocromática, como esta última es

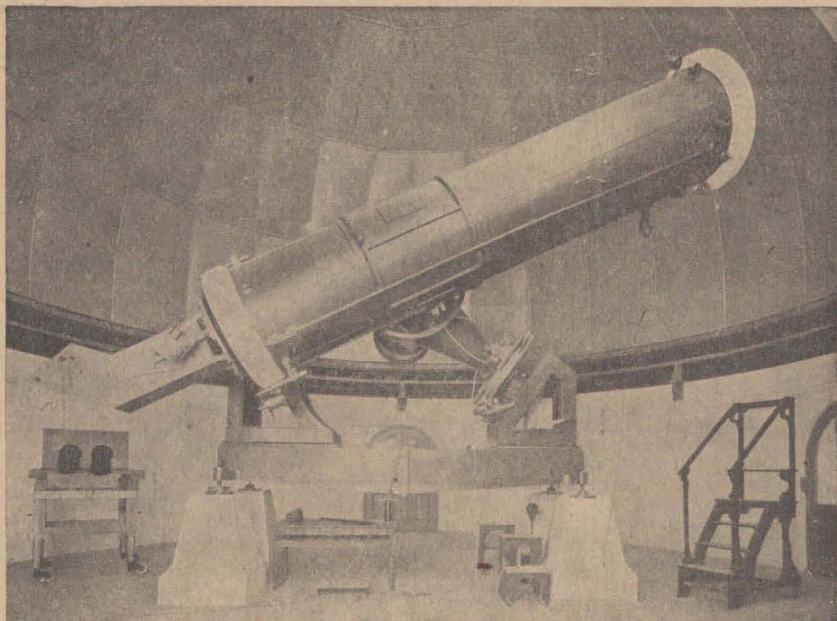


Fig. 219. — Cámara espectrográfica acoplada al reflector de 80 cm. de abertura del Observatorio Nacional de La Plata.

más refrangible que la primera se obtendrían sobre la placa Pl dos imágenes de la ranura en R y en V . El espectro de esa supuesta luz estaría formado solamente por dos líneas brillantes una roja y otra violeta. Si se suprime la placa P y se observa el espectro con una lupa u ocular L_3 , se tiene un espectroscopio. Si la placa Pl es una placa sensible se tendrá un espectrógrafo. Actualmente se utiliza únicamente esta forma de observación.

Si r se ilumina por un sólido incandescente, p. ejem., con la luz de una lámpara de filamento metálico, se observa un espectro continuo brillante que se extiende desde el rojo hasta el violeta con todos los colores intermedios. Si las lentes y el prisma son de cuarzo y

se fotografía el espectro, se observa que se extiende más allá del violeta. Son las radiaciones ultravioletas que son absorbidas casi en forma completa por nuestra atmósfera, cuando se trata de luz que nos llega de los astros.

Si la luz proviene de un gas llevado a la incandescencia por una descarga eléctrica (tubos Geissler), el espectro está formado por líneas brillantes cuyas posiciones varían según sea la naturaleza de aquél. Se observa, cuando se produce la incandescencia por calentamiento, que a temperaturas relativamente bajas el espectro de los gases está formado por bandas, las cuales a su vez están constituidas por muchísimas líneas que se condensan hacia uno de los

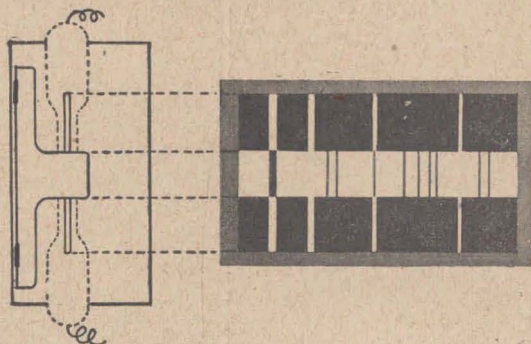


Fig. 220. — La franja central: espectro de una estrella.
A ambos lados espectro de comparación.

extremos, constituyendo las llamadas cabezas de las bandas (fig. 238, III y IV).

A temperaturas mayores las bandas desaparecen, coincidiendo esta desaparición con la disociación en átomos de las moléculas del gas.

Los espectros que hemos considerado hasta ahora son entonces:

Espectros continuos provenientes de sólidos y líquidos incandescentes.

Espectros de líneas provenientes de los átomos.

Espectro de bandas provenientes de las moléculas.

Todos éstos son espectros de emisión.

En ciertas condiciones los átomos pueden dar origen también a un espectro de emisión en parte continuo.

En la fig. 218 hemos indicado esquemáticamente como se adapta un espectrógrafo a un telescopio refractor.

Con el anteojo A, aprovechando la luz reflejada en una de las caras del prisma, se puede dirigir el aparato al astro que se desee.

Para comparar el espectro de una estrella con el de una fuente terrestre, se obtura la ranura (fig. 220) en la parte donde incide la luz del astro y se coloca luego un tubo de Geissler. Se obtiene así el espectro del astro superpuesto al espectro de un elemento conocido.

272. ESPECTROS DE ABSORCIÓN. — Si se tiene una fuente de luz que da origen a un espectro continuo y se intercala entre esa fuente y la ranura del espectroscopio una substancia, ésta absorberá ciertas radiaciones y dejará pasar otras. Se tendrá así un espectro

de absorción formado por líneas o bandas oscuras sobre fondo brillante. La disposición de las líneas o de las bandas depende de la naturaleza de la substancia. Si ésta es un gas a alta temperatura o un vapor metálico, el espectro de absorción estará formado por líneas. Se observa que todas las líneas de absorción de determinada substancia coinciden con líneas de emisión de la misma (Ley de KIRCHHOFF). La fig. 221 muestra el espectro de emisión y absorción de los vapores de sodio.

Esto indica que una substancia emite (entre otras) aquellas radiaciones que es capaz de absorber.

Los espectros de absorción, lo mismo que los de emisión pueden ser de líneas (átomos) de bandas (moléculas) o continuos en ciertas regiones (átomos y moléculas).

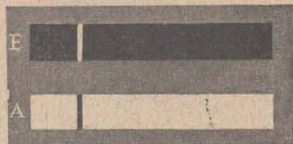


Fig. 221. — Espectro de emisión y absorción de vapores de sodio.

273. ESPECTRO NORMAL DEL SOL. — La figura 92 muestra el llamado espectro normal del Sol constituido por líneas oscuras sobre un fondo brillante. Se trata pues de un espectro de absorción. Estas líneas de absorción se originan en una parte de la superficie solar llamada capa inversora.

Si hacemos que solamente el borde de la imagen del disco solar, dada por el objetivo de un anteojo, caiga sobre la ranura del espec-

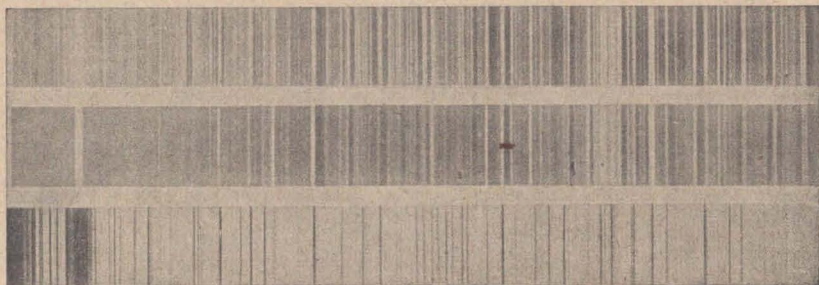


Fig. 222. — Espectro normal del Sol. Abajo: a la izquierda, las líneas *H* y *K* del calcio ionizado; a la derecha, el rojo. Arriba: dos espectros de la capa inversora tomados por E. H. Hills.

troscopio, se obtendrá así un espectro donde aparecerán líneas de emisión (brillantes sobre fondo oscuro) en el lugar en que antes teníamos líneas de absorción (fig. 222).

La figura 223 reproduce el espectro de la corona solar tomado durante un eclipse total.

* **274. ESPECTROHELIOGRAFO.** — Si fuera posible construir un filtro de luz opaco para todas las radiaciones y transparente para

una sola de ellas, p. ejem., para la luz que corresponde a la línea $H\alpha$ del hidrógeno, se podrían tomar con su auxilio fotografías del Sol en las cuales aparecerían solamente aquellas regiones en que hay nubes de aquel elemento. Con otro filtro transparente para la luz amarilla del sodio se podrían obtener fotografías que revelarían la posición y distribución de los vapores de ese metal, y así para todos los elementos. Filtros de luz perfectamente transparentes para una única radiación y opacos en absoluto para las restantes, no pueden construirse, pese a lo cual es posible obtener fotografías del Sol con



Fig. 223.

luz estrictamente monocromática por medio de aparatos especiales llamados espectroheliógrafos. Las figuras 94 y 95 muestran fotografías del Sol tomadas con la luz del calcio ionizado (luz de la línea K).

La figura 224 muestra en esquema un espectroheliógrafo. C es un espejo que gira por medio de un aparato de relojería alrededor de un eje paralelo

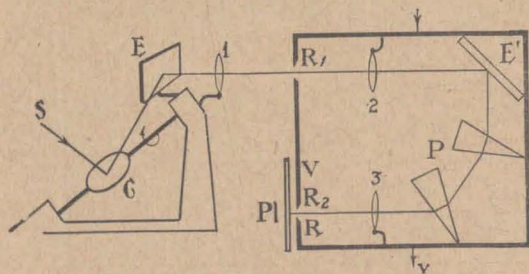


Fig. 224. — Espectroheliógrafo.

de un eje paralelo al eje del mundo dando una vuelta completa en 48 horas. Se consigue así por medio del espejo fijo E y la lente 1, una imagen real del Sol e inmóvil que cae sobre la ranura R_1 que debe estar en el foco de la lente 1 de larga distancia focal.

Por medio de las lentes 2 y 3, el espejo E' y los prismas P , se obtiene sobre el plano de una segunda ranura R_2 , que puede desplazarse, la imagen nítida del espectro VR . Los planos focales de las lentes 2 y 3 deben coincidir con los planos de las ranuras R_1 y R_2 , respectivamente. También estas lentes deben ser de distancia focal larga para que el espectro VR tenga una longitud apreciable. Supongamos que la ranura R_2 se haga coincidir con una línea espectral determinada, p. ejem., con la $H\alpha$ (la primera de la serie de Balmer). Frente y junto a la ranura R_2 , que debe tener el mismo ancho que la R_1 , se coloca la placa fotográfica Pl . A todo el

aparato se le imprime un movimiento uniforme de traslación en el sentido de la flecha v . La ranura R_1 irá pasando, en consecuencia (fig. 225), frente a la imagen del Sol que, como hemos dicho, permanece inmóvil. Sobre la placa Pl irá quedando grabada la imagen de aquellos puntos del Sol que *emiten* luz correspondiente a la línea $H\alpha$. Si H fuera una protuberancia de hidrógeno, ésta habría quedado registrada en H' . En cambio, si C es una nube de calcio, ésta no impresionará la placa Pl . En el momento que representa la figura, ya ha sido fotografiada la región AB del Sol y falta impresionar aún la BC .

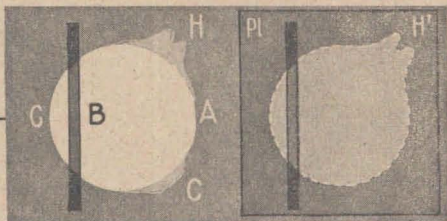


Fig. 225. — Espectroheliógrafo.

Observemos que si la placa se impresiona, ello corresponde a líneas de emisión, líneas éstas que están justamente en el lugar ocupado por líneas oscuras, lo que corrobora la ley de Kirchhoff.

FOTOMETRIA

275. FOTOMETRIA ASTRONOMICA. — Hay muchísimos tipos de fotómetros estelares. La figura 226 representa, esquemáticamente, el llamado de cuña fotométrica y que ha sido muy usado en el Observatorio de la Universidad de Harvard. Por medio de una lámina de vidrio V inclinada 45° se obtiene sobre el plano focal F del

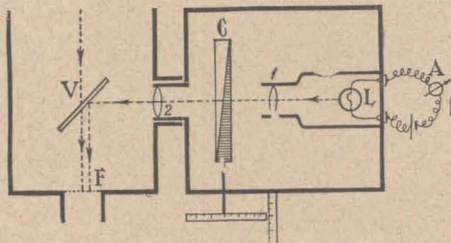


Fig. 226. — Fotómetro de cuña.

anteojo la imagen de la estrella a estudiarse junto con la imagen de una pequeñísima lámpara eléctrica L cuyo consumo se controla con el amperímetro A . La lámpara L hace las veces de una estrella artificial que sirve de comparación. El brillo de esta estrella artificial se varía a voluntad haciendo que se desplace la cuña fotométrica C que consiste en una cuña muy delgada de vidrio ennegrecido. La lente 1 convierte en paralelos los rayos de L y la 2 da una imagen real de L en F . En las determinaciones se desplaza la cuña por medio de un tornillo micrométrico hasta lograr que ambas estrellas se presenten con el mismo brillo. Naturalmente que es preciso efectuar determinaciones previas para conocer la absorción de la cuña en sus diversas regiones, es decir, que se necesita graduar el instrumento.

FOTOMETRÍA FOTOGRÁFICA. — Con el fotómetro descrito precedentemente se comparan los brillos visuales de las estrellas y se determinan así las llamadas *magnitudes visuales*. El ojo humano es sensible sobre todo a las radiaciones amarillas, por lo cual las estrellas de este color parecen más brillantes. La sensibilidad de la placa fotográfica, en cambio, es en general mayor para las radiaciones violetas y ultravioletas. Por eso hay que distinguir entre la magnitud visual

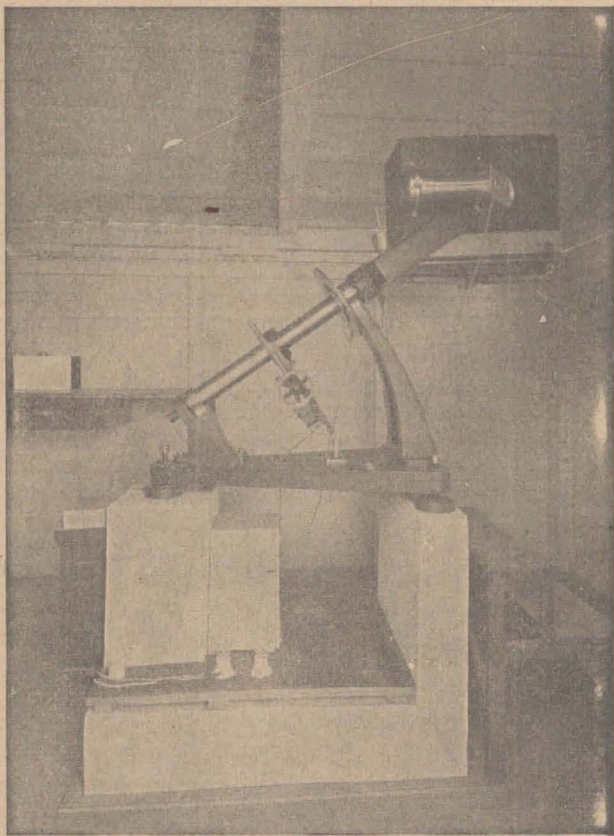


Fig. 227. — Cámara fotográfica doble con chasis móvil de Schwarzschild para fotometría estelar. (Observatorio de La Plata).

y la magnitud fotográfica de una estrella que no son siempre coincidentes. Para la determinación de esta última se puede proceder de varios modos. Uno de ellos consiste en colocar la placa fotográfica fuera de foco, con lo cual todas las estrellas aparecen en ella (en el negativo) como pequeños círculos más o menos ennegrecidos. El ennegrecimiento de los distintos puntos de la placa se determina luego haciendo pasar por ellos un haz de luz constante que se compara con

la luz de otra fuente por medio de un fotómetro. Otro procedimiento consiste en dotar a la placa fotográfica durante el tiempo de exposición, por medio de un motor eléctrico, de un movimiento vibratorio especial con lo cual la luz de las estrellas produce sobre una pequeña región un rayado denso. Este fotómetro es el representado en la figura 227.

RADIACION

276. RADIACION TERMICA. — Aun encontrándose un cuerpo en el vacío, si su temperatura es mayor que la de otros cuerpos próximos, intercambia energía con ellos hasta que sus temperaturas se igualan estableciéndose el equilibrio térmico.

La unidad de superficie de un cuerpo a la temperatura absoluta T (temperatura absoluta es igual a la temperatura centígrada más 273°) irradiará por segundo una cierta cantidad de energía (que puede medirse en calorías), que dependerá de su temperatura y de la naturaleza de la superficie. A esta energía se le llama *poder emisor* del cuerpo o mejor de la superficie.

Se llama, en cambio, *poder absorbente* de una superficie, el cociente entre la energía que absorbe y la que recibe. Este poder absorbente depende de la temperatura del cuerpo y de la "calidad" de la energía (longitud de onda) incidente. Si un cuerpo a determinada temperatura absorbe la mitad de las radiaciones rojas que sobre él inciden, reflejando el resto, se dirá que su poder absorbente para esas radiaciones y a esa temperatura es igual a $\frac{1}{2}$. Si en cambio absorbe la totalidad de las radiaciones azules, su poder absorbente será para ellas igual a la unidad. Las radiaciones absorbidas por el cuerpo se convierten en general en su interior en energía calorífica. El poder emisor y absorbente de un cuerpo están vinculados estrechamente: *cuanto mayor es el poder absorbente de un cuerpo tanto mayor es el poder emisor del mismo*. Un termo puede servir para conservar en él un líquido a temperatura alta (poder emisor pequeño) y también para conservar cuerpos a temperatura menor que la del ambiente (poder absorbente pequeño).

Si la ley anterior no se cumpliera, podría lograrse que pasara calor de los cuerpos fríos a los calientes. En efecto, si existiera un cuerpo de poder absorbente grande y de poder emisor pequeño colocado frente a otro de poder emisor grande, aun estando ambos a la misma temperatura pasaría calor del segundo al primero. Esto contradice a uno de los principios fundamentales de la física (el 2º principio de la termodinámica) de donde queda así demostrada por el absurdo la proposición que hemos enunciado y que no es otra cosa que la célebre ley de KIRCHHOFF.

277. CUERPO NEGRO. LEYES DE STEFAN Y WIEN. — Se llama así a un cuerpo cuyo poder absorbente es igual a 1 para cualquier radiación y a cualquier temperatura. Un cuerpo ne-

gro absorbe, por lo tanto, todas las radiaciones que inciden sobre él.

Una cavidad, tal como la boca de un horno, o la entrada de un largo túnel pueden constituir la realización de un cuerpo negro.

LEY DE STEFAN. — Si se calienta un cuerpo negro se observa que la cantidad total de calor que irradia por segundo y por unidad de superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Las medidas se llevan a cabo calentando eléctricamente un cilindro hueco de platino que tiene un orificio. Este orificio es el que hace las veces de cuerpo negro.

Siendo σ una constante puede establecerse:

$$Q = \sigma T^4.$$

La constante σ ha sido objeto de cuidadosas determinaciones habiéndose encontrado que su valor es:

$$\sigma = 1,37 \cdot 10^{-12} \left[\frac{\text{calorías}}{\text{cm}^2 \cdot \text{seg. grado}^4} \right]$$

Si el cuerpo se encuentra en un ambiente cuya temperatura absoluta es T' , la cantidad de calor que perderá por segundo y por unidad de superficie será la diferencia entre lo que irradia y lo que absorbe, o sea:

$$Q_p = \sigma (T^4 - T'^4).$$

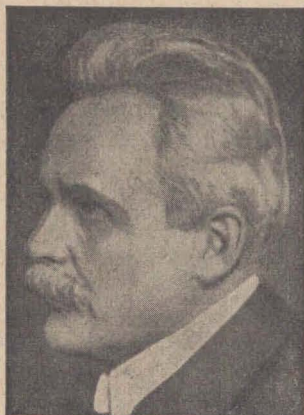


Fig. 228. — Wilhelm Wien
(1864 - 1932).

LEY DE WIEN. — Si se descompone la energía irradiada por un cuerpo negro por medio de un prisma, o mejor por una red de difracción, se obtiene un espectro continuo. Si se corre a lo largo del espectro un termómetro sensible (bolómetro) podrá apreciarse cómo se distribuye la energía en función de la longitud de onda λ . Si se representan los resultados de las medidas en una gráfica, indicando la longitud de onda en el eje de las abscisas y la energía correspondiente en el de las ordenadas, se obtienen curvas como las indicadas en la figura 229. Cuando la temperatura absoluta del cuerpo negro es de 2.900° (2.627°C), se observa que el máximo de la energía irradiada corresponde a la

longitud de onda de 1μ (un micrón = 10^{-4} cm.), irradiando además energía en toda la región visible del espectro. A la temperatura absoluta de 1.450° (1.177°C), se observa un máximo para una longitud de onda igual a 2μ . A esta temperatura el cuerpo emite con poca intensidad radiaciones rojas y amarillas. A la temperatura absoluta de 967° (694°C), el máximo de energía irradiada corresponde a

$\lambda = 3 \mu$. A esta temperatura la energía de las radiaciones rojas es insignificante. Se observa entonces que a medida que aumenta la temperatura, la longitud de onda correspondiente al máximo de la energía irradiada disminuye. Llamando λ_m a esa longitud de onda y siendo T la temperatura absoluta, se cumple:

$$\lambda_m T = \text{constante} = 2.900.$$

Esta es la expresión de la ley de WIEN, que puede enunciarse así:

El producto de la longitud de onda correspondiente al máximo de la energía irradiada por un cuerpo negro, por su temperatura absoluta es constante. El valor numérico de la constante que hemos consignado corresponde a cuando la longitud de onda se mide en micrones.

En la figura 229 las ordenadas de las diversas curvas están tomadas en escalas distintas. Si se hubieran dibujado todas las curvas en la misma escala, las ordenadas de los máximos habrían tenido que tomarse proporcionalmente a los números indicados en la figura entre paréntesis, pues la energía del máximo resulta ser proporcional a la quinta potencia de la temperatura absoluta.

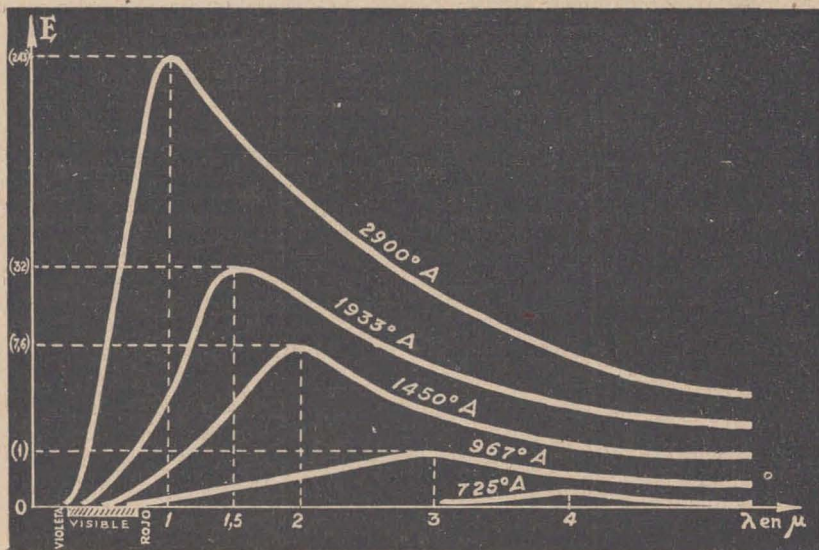


Fig. 229. — Ley de Wien.

278. PIRHELIOMETRO. DETERMINACION DE LA CONSTANTE SOLAR. — Para medir la cantidad total de energía que recibimos del Sol se utilizan diversos aparatos llamados pirheliómetros o actinómetros. Uno de los más simples es el de POUILLET consistente (fig. 230) en una caja cilíndrica plateada llena de agua y en cuyo interior se coloca un termómetro sensible. Una de las ba-

ses de la caja cilíndrica se recubre con negro de humo y se expone a la acción de los rayos solares haciendo que éstos incidan normalmente sobre la cara ennegrecida. Para reconocer si la incidencia es normal basta con observar si la sombra de la caja cilíndrica coincide con la pantalla *P* del aparato. Para aumentar el tiempo de exposición conviene que su montaje sea ecuatorial.

Supongamos, por ejemplo, que la masa de agua contenida en la caja sea de 500 gramos. Si la temperatura aumenta en 1° C por minuto ello nos revelaría que en ese tiempo la superficie expuesta al Sol absorbe 500 calorías. Si esa superficie fuera de 300 cm.², cada cm.² absorberá por minuto $\frac{500}{300} = 1,67$. Se observa que cuando el

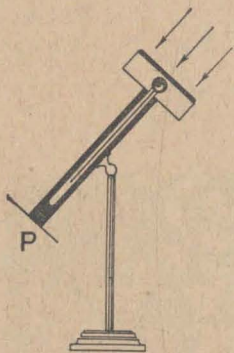


Fig. 230. — Pirheliómetro.

Sol está próximo al horizonte el calor que recibe el aparato es menor que estando aquél en las proximidades del cenit. Ello se debe a la absorción del calor por parte de la atmósfera terrestre. Puede así efectuarse una gráfica que dé la dependencia entre el calor recibido y el espesor de las capas de aire atravesadas por los rayos solares. Hecha la gráfica es fácil deducir (por una simple extrapolación) el calor que recibiría 1 cm.² de superficie de la Tierra expuesta normalmente a los rayos del Sol durante un minuto en el caso de que no existiera atmósfera. A este valor se le llama *constante solar* y se ha encontrado que dicha constante es igual a 1,93 calorías por minuto y por cm.².

279. TEMPERATURA EFECTIVA DEL SOL. — Suponiendo que el Sol se comporte como un *cuerpo negro* es fácil calcular su temperatura. La temperatura así calculada se llama *temperatura efectiva* que es pues aquella que debería tener un cuerpo negro de las dimensiones del Sol para irradiar en la forma en que él lo hace. Es lógico considerar al Sol como un cuerpo negro, ya que, si suponemos que incide sobre ese astro una radiación cualquiera, las capas gaseosas que lo envuelven la absorberán casi por completo. El porcentaje de radiación reflejada será muy pequeño. Por esta circunstancia la “temperatura efectiva” no debe diferir mucho de la verdadera.

Siendo la constante solar igual a 1,93 calorías por minuto y por cm.² la energía total que atravesará la superficie *S* de una esfera de centro en el Sol y de radio igual al de la órbita terrestre será por cada minuto:

$$1,93 S.$$

$$\text{En cada segundo atravesará la superficie considerada } \frac{1,93 S}{60}$$

y por lo tanto si llamamos s a la superficie total del Sol la cantidad de calor irradiada por segundo y por cm^2 será:

$$\frac{1,93 S}{60 s}.$$

De acuerdo a la ley de Stefan este calor debe ser igual a σT^4 de donde:

$$T = \sqrt[4]{\frac{1,93 S}{60 \sigma s}}.$$

La relación $\frac{S}{s}$ es igual a $\frac{d^2}{R^2}$ siendo d la distancia Sol - Tierra y

R el radio solar. Como $\frac{R}{d}$ no es otra cosa que el diámetro aparente del Sol (expresado en radianes) el cociente $\frac{d}{R}$ es conocido y resulta ser igual a 215,7.

Reemplazando estos valores y el valor de σ (277) en la fórmula resulta:

$$T = 5.860^\circ \text{ absolutos.}$$

También puede calcularse la temperatura efectiva aplicando la ley de Wien. Medidas directas efectuadas sobre el espectro solar revelan que el máximo de la energía irradiada corresponde en el caso del Sol a la longitud de onda $\lambda = 0,5 \mu$.

Luego debe ser:

$$0,5 \cdot T = 2.900.$$

De donde:

$$T = 5.800^\circ \text{ absolutos.}$$

Como se ve se obtienen valores concordantes aplicando la ley de Stefan o la de Wien.

En cuanto a la temperatura verdadera debe ser algo mayor pues como hemos visto el cuerpo negro es el que tiene mayor poder emisor. Si el Sol no se comportara exactamente como un cuerpo negro, para irradiar en la forma en que lo hace, debería tener una temperatura que en su superficie (fotosfera) no debe diferir mucho de los 6.000° absolutos.

280. BOLOMETRO. — Con este instrumento se puede medir con mucha precisión la distribución de la energía en el espectro solar. El bolómetro de LANGLEY se basa en las variaciones que experimenta la resistencia de un hilo metálico al variar su temperatura. Este alambre ennegrecido que forma parte de un circuito especial (es una de las cuatro resistencias de un puente de Weasthorne) se

lleva sucesivamente a distintas regiones del espectro. Las desviaciones de un galvanómetro sensible (que se inscriben sobre una banda de papel arrollada a un cilindro móvil) dan las variaciones de resistencia del alambre de las cuales puede deducirse el aumento de su temperatura y de aquí la energía absorbida. Con este dispositivo pueden medirse diferencias de temperatura del orden del millonésimo de grado centígrado.

281. MEDIDA DE LA TEMPERATURA DE LAS ESTRELLAS.

— Estudiando el espectro de las estrellas puede llegarse a saber con relativa exactitud el valor de la longitud de onda que corresponde al máximo de la energía irradiada. Aplicando la ley de WIEN se obtendrá de este modo la temperatura efectiva del astro.

Se ha logrado también, medir directamente la energía total irradiada por algunas estrellas. Se emplean con tal objeto pilas termoeléctricas muy sensibles.

CAPITULO SEGUNDO

ESTRELLAS *

* 282. CATALOGOS ESTELARES. — Para el estudio del Cielo se han formado catálogos estelares, donde se procura dar la posición de cada estrella en la forma más exacta posible, valiéndose de sus coordenadas ecuatoriales absolutas (50). El primer catálogo de estrellas está contenido en el "ALMAGESTO" de TOLOMEO, en el cual se dan la longitud y latitud de 1.025 estrellas. Pese a las deficiencias de este catálogo primitivo, derivadas de la imperfección de los instrumentos utilizados por HIPARCO y TOLOMEO en la determinación de las posiciones ocupadas por aquellos astros sobre la esfera celeste, el catálogo mencionado ha servido de precioso instrumento para demostrar, que el aspecto que ofrece el Cielo estrellado en la actualidad, es el mismo que ofrecía hace 19 siglos, pues las figuras de las diversas constelaciones han permanecido poco menos que inalterables.

Con la aplicación del anteojo a la observación de los astros han podido confeccionarse, sucesivamente, una serie de catálogos cada vez más perfectos y de mayor amplitud en cuanto al número de estrellas consignadas. Hasta fines del siglo XVII el astrónomo inglés FLAMSTEED, (1646-1719), publicó uno conteniendo 2.866 estrellas. El de ARGELANDER contiene alrededor de 325.000 comprendidas entre el polo celeste norte y el paralelo celeste de 2° de declinación austral. Este notable catálogo es incrementado con otras 133.659 estrellas hasta la declinación de 23° austral por SCHÖNFELD y posteriormente fué continuado por THOME, del observatorio argentino de Córdoba, quien lo amplió hasta el paralelo celeste austral de 61° . Su prematuro fallecimiento, acaecido en el año 1908, interrumpió la tarea de extenderlo hasta el polo celeste sur, pero a pesar de ello, el catálogo así formado, y que se publicó en 1914, alcanza a registrar 580.000 estrellas hasta la 10^{a} magnitud.

En el año 1863 se constituyó una asociación internacional a fin de dar con la mayor precisión la posición de las estrellas de todo el Cielo hasta la 9^{a} magnitud. Hacia el año 1925 ya se habían catalogado 138.000 de tales estrellas, comprendidas entre los paralelos celestes de 80° norte y 2° sur. En la actualidad se prosiguen los trabajos para completarlo, correspondiendo al OBSERVATORIO NACIONAL DE LA PLATA el estudio de la zona celeste abarcada entre los paralelos australes de 22° y 33° .

Es digno de mención entre los últimos catálogos publicados el de BOSS, que da la posición de 4.188 estrellas visibles a simple vista

* Véase capítulo IV del Libro I.

hasta la 6ª magnitud y, además, de otras 2.000 de menor brillo. Las coordenadas asignadas a todas esas estrellas corresponden al año 1909.

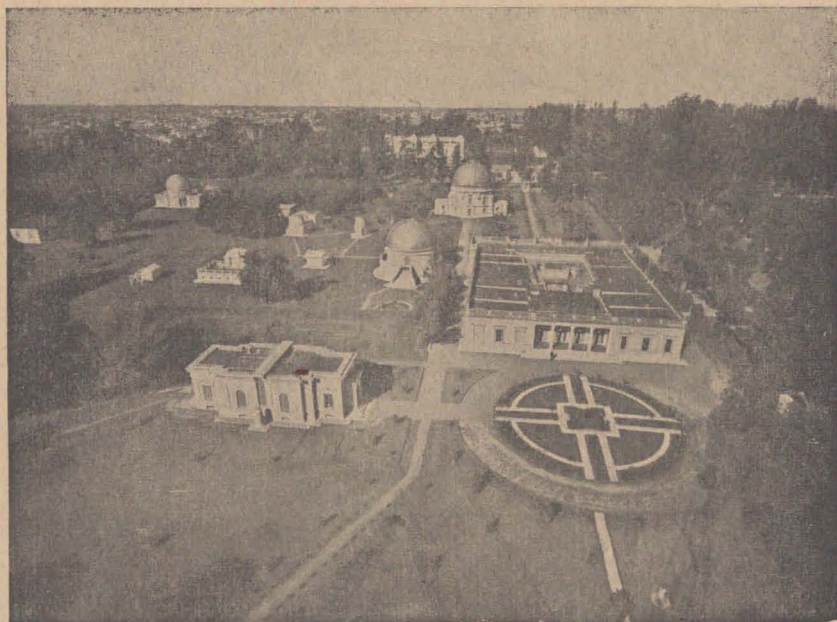


Fig. 231. — Vista panorámica del Observatorio N. de La Plata.

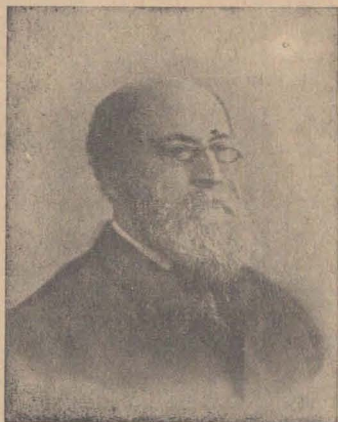


Fig. 232. — B. A. Gould.

Además de los catálogos estelares, se han confeccionado para el estudio del Cielo *cartas celestes* y aun *globos celestes*. La mejor carta del hemisferio austral la constituye la "URANOMETRÍA ARGENTINA" de GOULD, donde se dan las posiciones de todas las estrellas australes visibles a simple vista. El mismo Gould desde el OBSERVATORIO DE CÓRDOBA confeccionó un catálogo del cielo austral que contiene 105.608 estrellas hasta la 9ª magnitud. Una buena carta celeste del hemisferio boreal es la "URANOMETRÍA NOVA", de ARGELANDER.

En los últimos tiempos se ha aplicado con notable éxito la fotografía para la confección de catálogos estelares. En el "CATÁLOGO FOTOGRÁFICO DE EL CABO", de GILL y KAPTEYN, aparecen 454.875 estrellas hasta la 10ª magnitud, comprendidas entre el polo celeste austral y el paralelo celeste de 19° sur.

283. DISTANCIA A LAS ESTRELLAS. AÑO LUZ Y PARSEC.

— Los pequeños valores de las paralajes estelares (150), demuestran las enormes distancias que separan a tales astros del Sistema Solar. Las unidades utilizadas en la medición de esas distancias, son el "AÑO LUZ" y el "PARSEC".

El año luz es la distancia que recorre el rayo luminoso en un año y representa, aproximadamente, 9,5 billones de kilómetros. Luego la Próxima del Centauro, la más cercana de las estrellas, situada a 4,2 años luz, estaría separada de nosotros en 40 billones de kilómetros, y un avión desplazándose a 500 kilómetros por hora, tardaría en cubrir esa distancia más de 9.100 siglos.

El Parsec (par. paralaje; sec, segundo), es la distancia a que debiera estar ubicada una estrella, u otro objeto del Cielo, para que su paralaje anual tomara el valor de 1". Equivale, aproximadamente, a 3,26 años luz.

El Sol llevado a la distancia de un parsec, se vería como una estrella amarilla de igual brillo que La Cabra, aproximadamente.

Agreguemos que muchos millones de estrellas distan del Sistema Solar centenares y hasta millares de parsecs.

Damos un cuadro donde se consignan las paralajes y distancias, en años luz y parsecs, de las veinte estrellas primarias.

DISTANCIAS DE LAS 20 ESTRELLAS PRIMARIAS

ESTRELLA	Brillo comparado	Paralaje	DISTANCIAS	
			En años luz	En parsecs
α del Centauro ..	2,40	0",76	4,3	1,3
Sirio	10,70	0,37	8,7	2,7
Proción	1,60	0,31	10	3,1
Altair	1,10	0,21	15	4,6
Fomalhaut	0,76	0,14	23,3	7,1
Arturo	1,92	0,12	27,2	8,4
Vega	2,20	0,12	27,2	8,4
La Cabra	2,10	0,07	46,6	14,3
Aldebarán	0,91	0,06	54,5	16,7
Pólux	0,83	0,06	54,5	16,7
Achernar	1,58	0,05	65,3	20
Acrux	1,00	0,05	65,3	20
β del Centauro ..	1,20	0,04	81,7	25
Betelgeuse	1,10	0,03	108,9	33,4
Antares	0,76	0,03	108,9	33,4
Régulo	0,76	0,03	108,9	33,4
Rigel	1,81	0,02	163,4	50
Canopus	5,60	0,01	326,8	100
La Espiga	0,83	0,01	326,8	100
Deneb	0,76	?	?	?

284. DETERMINACION FOTOGRAFICA DE LA PARALAJE. — Actualmente para las estrellas relativamente cercanas, casi el único método empleado en la determinación de paralajes es el fotográfico. Se toman con este objeto sobre una misma placa varias fotografías de una misma región del Cielo en el transcurso de un año. Las estrellas muy lejanas de esa región impresionan siempre el mismo punto de la placa, en tanto que las más cercanas se desplazan con respecto a aquéllas. Esta placa se examina luego con un microscopio apropiado para medir esos desplazamientos, de los cuales se obtienen las paralajes.

Las medidas pueden llevarse a cabo con una precisión del orden del centésimo de segundo, por lo cual con este método sólo es posible hallar la paralaje de estrellas distantes de nosotros en menos de 100 parsecs.

285. MAGNITUDES ABSOLUTAS. — Hemos definido en otro lugar (56) lo que se entiende por magnitud aparente de una estrella. Los brillos aparentes B y B' de dos estrellas, cuyas magnitudes son m y m' , guardan entre sí la relación:

$$\frac{B}{B'} = 2,512^{m'-m}. \quad [1]$$

Estos brillos aparentes dependen de los brillos intrínsecos y de las distancias.

Se llama *brillo absoluto de una estrella al brillo aparente que tendría si estuviera colocada a una distancia de 10 parsecs (32,6 años luz)*.

Consideremos, p. ejem., una estrella de 6ª magnitud aparente y cuya distancia fuera igual a 100 parsecs. Su paralaje será, pues, 0",01. Si dicha estrella estuviera a 10 parsecs, la distancia se reduciría a la décima parte y su brillo aparente sería 100 veces mayor, pues *la intensidad de iluminación varía en razón inversa del cuadrado de la distancia*. La estrella aparecería, entonces, como de 1ª magnitud.

La magnitud que tendría una estrella colocada a 10 parsecs, se llama magnitud absoluta. En el ejemplo anterior la magnitud absoluta es 1, y la magnitud aparente 6.

Designando por M a la magnitud absoluta, por m la aparente y por ω a la paralaje se obtiene:

$M = m + 5 + 5 \log \omega$, que es la llamada fórmula de POGSON.

En esta fórmula se ha supuesto que la intensidad de la luz decrece en razón inversa del cuadrado de la distancia, es decir, propagándose en los espacios interestelares sin absorción alguna, lo que no es del todo exacto.

286. LUMINOSIDAD. — 1. Se llama *luminosidad L de una estrella, a la relación entre la cantidad total de luz emitida por la misma,*

y la que emite el Sol. El cuadro siguiente ilustra sobre la magnitud absoluta y luminosidad de estrellas importantes, según cálculos de ARMELLINI, utilizando las magnitudes aparentes y paralajes tomadas de los catálogos de Harvard:

Estrella	Magnitud absoluta M	Luminosidad L	Estrella	Magnitud absoluta M	Luminosidad L
S Dorada ..	— 8,90	300.000	Altair	2,44	9
Rigel	— 5,77	18.000	Proción	2,95	6
Betelgeuse .	— 2,95	1.300	α Centauro	4,46	1,5
Antares ...	— 1,70	420	Sol	4,85	1,00
Scheat	— 1,47	340	61 Cisne (principal)	8,40	0,04
La Cabra ..	— 0,41	127	Satélite de Sirio ...	11,20	0,003
Arturo	— 0,25	111	40 Eridano (satélite)	11,20	0,003
Aldebarán .	— 0,16	100	Estrella de Barnard	13,40	0,0004
Vega	+ 0,60	51	Estr. de Van Maanen	14,50	0,0001
Sirio	1,26	28			

La luminosidad L se halla fácilmente teniendo en cuenta la diferencia de magnitudes absolutas, entre la estrella dada y el Sol. Así, p. ejm.: entre *S Dorada* y el Sol la diferencia de magnitudes es 13,7; luego:

$$2,512^{13,7} = L = 302.000.$$

Como se aprecia por el cuadro anterior, la insignificante, al parecer estrella *S* de la Dorada, emite una cantidad de luz 300.000 veces mayor que la de nuestro Sol, el cual si estuviera a 10 parsecs se vería como una estrella minúscula de 5ª magnitud (4,85).

MOVIMIENTOS ESTELARES

* 287. MOVIMIENTO PROPIO DE LAS ESTRELLAS. EFECTO DOPPLER. — La distancia que nos separa de las estrellas hace que sus movimientos propios hayan pasado poco menos que inadvertidos durante un largo lapso. Sin embargo, las estrellas se desplazan en el espacio con velocidades lineales más o menos considerables.

El astrónomo HALLEY (1656 - 1742) y también CASSINI (1677 - 1750), fueron los primeros en observar desplazamientos de algunas estrellas con respecto a otras comparando sus posiciones, dadas por

el "Almagesto", con las que ocupaban en su época. MAYER, fundándose en las observaciones de RÖMER, controló movimientos propios en 80 de las estrellas visibles a simple vista. El catálogo de MÄDLER publicado a mediados del siglo XIX registra unas 3.200 y el de BOSS de 1910, más de 6.000.

De todas esas estrellas, sólo las seis que se consignan en el cuadro que sigue se desplazan con una velocidad angular superior a los 5" por año.

Estrella	Magnitud	Movimiento anual en segundos	Desplazamiento en mil años
Flecha de Barnard .	9,7	10",3	2052'
Córdoba Z, 243	8,3	8,7	2025'
Groombridge 1880 ..	6,5	7,1	1058'
Lacaille 9352	7,4	7,0	1056'
Córdoba G. C. 32416	8,3	6,0	1040'
61 Cisne	6	5,2	1027'

EFEECTO DOPPLER. — Representemos por un vector V a la velocidad de una estrella en su movimiento propio (fig. 233). Podremos descomponer a la velocidad V en otras dos V_1 y V_2 , dirigidas la primera según el rayo visual a la estrella y la segunda según la normal al mismo. La primera de ambas componentes, es decir V_1 , se denomina *velocidad radial* y la segunda V_2 , *velocidad proyectada*.

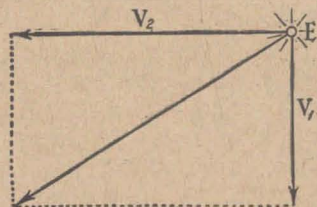


Fig. 233. — Velocidad radial y velocidad proyectada.

La *velocidad radial* V_1 de una fuente luminosa se mide, aproximadamente, por el efecto o principio de Doppler, establecido en acústica y aplicado luego al campo de la óptica. Según dicho principio, la altura de un sonido aumenta o disminuye, según que la fuente sonora se acerque o aleje del observador.

La aplicación de este principio a las ondas luminosas, dada la gran velocidad de éstas, ofreció grandes dificultades que fueron sin embargo superadas por BELOPOLSKY y GALITZIN, al determinar con gran aproximación las velocidades radiales de la Luna y varios planetas. Para ello se coteja el espectro producido por una fuente terrestre (espectro de comparación) con el espectro de la fuente luminosa cuyo movimiento se pretende determinar. Si la fuente luminosa se acerca al observador, las rayas de su espectro, con respecto

al de comparación, se corren hacia el violeta y si aquélla se aleja el corrimiento tiene lugar hacia el rojo. Si λ es la longitud de onda el corrimiento $\Delta\lambda$ es tal que:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c},$$

siendo v la velocidad de la fuente respecto al observador y c la de la luz. Como en la determinación de la diferencia $\Delta\lambda$ se alcanza hasta 0,01 angstrom, pueden determinarse así velocidades hasta de 1 kilómetro por segundo. Como espectro de comparación suele tomarse el del hidrógeno por ser éste el elemento predominante en la mayoría de las estrellas.

Para estrellas visibles a simple vista las velocidades radiales obtenidas son siempre inferiores a los 80 kilómetros por segundo, considerándose las como positivas o negativas, según que las estrellas se alejen o se acerquen a la Tierra. Entre las estrellas telescópicas se han encontrado alrededor de 20 con velocidades radiales comprendidas entre los 100 y 340 kilómetros por segundo en uno u otro sentido.

VELOCIDAD PROYECTADA. — La velocidad proyectada V_2 de una estrella, se la calcula conociendo la magnitud del arco α recorrido por la estrella en un año y la distancia d de la misma a la Tierra.

Se obtiene:

$$V_2 = \frac{\alpha d}{365,25 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} \cdot \left[\frac{\text{km.}}{\text{seg.}} \right].$$

Para Sirio resulta: $V_2 = 16 \frac{\text{km.}}{\text{seg.}}$, pues el arco α recorrido en un año es de $1'',32$ y su distancia d puede calcularse por su paralaje anual ($0'',37$).

VELOCIDAD PROPIA. — Determinados los valores de la velocidad radial V_1 y de la velocidad proyectada V_2 , se calcula la velocidad propia V de la estrella como resultante entre V_1 y V_2 .

Para gran número de estrellas, sus velocidades con respecto al Sol son del orden de las decenas de kilómetros por segundo; pero para otras, suelen alcanzar valores que sobrepasan los $300 \frac{\text{km.}}{\text{seg.}}$.

* 288. **CORRIENTES ESTELARES.** — El estudio estadístico de las velocidades de las estrellas de determinada constelación, nos revela si las mismas pertenecen o no a una misma familia estelar o si, simplemente, aparecen próximas las unas a las otras por efectos de perspectiva. En el caso de la Osa Mayor, p. ejm., se ha encontrado

que sus siete estrellas principales se desplazan paralelamente y con velocidades casi iguales, lo que hace suponer que todas ellas pertenecen a un mismo grupo o enjambre, tanto más, si se agrega la circunstancia de que todas dan espectros análogos. Algo semejante ocurre con estrellas de la constelación del Toro.

Si se trata, en cambio, de estrellas independientes entre sí, representando la velocidad de cada una de ellas, prescindiendo de su posición, por vectores del mismo origen, se observa que los extremos de dichos vectores quedan en el interior de una esfera cuyo radio representa la velocidad máxima de las estrellas del grupo. Por lo tanto no hay ninguna dirección de privilegio contrariamente a lo que sucedía en los casos anteriores. De este modo, en 1905, el astrónomo KAPTEYN, representando el movimiento propio de unas 8.000 estrellas cercanas al Sol y situadas hacia todas las direcciones de la bóveda celeste, encontró que los vectores representativos de sus velocidades se podían disponer en el interior de un elipsoide alargado. Ello significa que según el eje mayor del elipsoide situado en la dirección que une al Sol con la constelación de *Sagitario* (centro de la Vía Láctea) las velocidades estelares son máximas. Existirían, pues, dos grandes corrientes estelares denominadas por KAPTEYN, *corrientes* I y II, de direcciones paralelas y sentidos contrarios.

Los puntos del Cielo hacia los cuales se dirigen esas corrientes son los llamados *vertex* I y II, determinados por la dirección del eje mayor del elipsoide. Las primitivas coordenadas de los *vertex* determinadas por KAPTEYN eran:

$$\begin{array}{ll} \text{Vertex I. } \alpha = 85^{\circ} & \delta = -11^{\circ} \\ \text{Vertex II. } \alpha = 260^{\circ} & \delta = -48^{\circ} \end{array}$$

En resumen, las estrellas de una misma corriente estelar se desplazarían, utilizando una imagen del mismo Kapteyn, como una multitud de peces que se mueven en todas direcciones, pero que son arrastrados en conjunto por la corriente del río.

* 289. TRASLACION DEL SISTEMA SOLAR. — Al igual que las demás estrellas, el Sol tiene su propia traslación participando en ella todos los astros de su sistema. En tal movimiento, el Sol se dirige hacia un punto del Cielo denominado *apex*, alejándose de otro diametralmente opuesto o *antiapex*. Las coordenadas del apex obtenidas por Boss y Newcomb van a continuación:

POSICION DEL APEX

Determinador	Ascensión recta	Declinación
Boss	271°	+ 34°
Newcomb	280°	+ 35°

Para HERSCHEL, el apex era un punto situado en la constelación de HÉRCULES, pero recientes determinaciones lo ubican en La Lira, cerca de la estrella Vega, de la que según Newcomb distaría unos 4°.

La posición del apex sobre la esfera celeste sería variable, si se admite como probable que el recorrido del Sol en su traslación, se efectúa alrededor del centro de la Vía Láctea, como se verá más adelante.

En cuanto a la velocidad en el desplazamiento, se la ha determinado tomando la media aritmética de las velocidades radiales de un número de estrellas situadas hacia el apex, y otro número igual situadas hacia el antiapex, habiéndose obtenido una diferencia entre ambos valores de unos 20 kilómetros por segundo.

Además de este movimiento debemos considerar que el Sol, lo mismo que las demás estrellas, debe tomar parte en una de las grandes corrientes estelares de Kapteyn. En el día se le considera como una de las estrellas integrantes de la corriente II.

ESTRELLAS DOBLES

290. ESTRELLAS DOBLES Y MÚLTIPLES. — Se denominan estrellas dobles o múltiples a estrellas muy cercanas entre sí formando sistemas físicos regidos por las leyes de la gravitación universal. En todo sistema doble aparece siempre un astro principal y otro secundario llamado *acompañante* o *satélite*. En algunos casos, los acompañantes son dos o más astros constituyendo sistemas triples, cuádruples y hasta séxtuples. En los sistemas dobles, los integrantes describen órbitas elípticas alrededor del centro común de gravedad. En los sistemas múltiples, las órbitas son en general muy complicadas.

Las estrellas dobles, muy numerosas en el Cielo, y las múltiples en general, aparecen a ojo desnudo como un solo astro, siendo una excepción el sistema MIZAR - ALCOR situado en la cola de la OSA MAYOR, donde los integrantes pueden separarse a simple vista, aun cuando con alguna dificultad.

A las estrellas dobles se las suele clasificar en dos categorías:

- a) *Estrellas dobles visuales o telescópicas;*
- b) *Estrellas dobles espectroscópicas.*

Las primeras son aquellas que pueden ser separadas por el ante-ojo haciéndose en consecuencia visible el acompañante. No deben ser confundidas con estrellas visualmente cercanas (*compuestas ópticas*) que son astros independientes entre sí, pero casi alineados con la Tierra.

Las estrellas dobles espectroscópicas, son las que no se desdoblan con el telescopio y que sólo revelan su carácter por anomalías observadas en sus espectros luminosos.

ESTRELLAS DOBLES TELESCÓPICAS O VISUALES.— El primer astrónomo que sugirió la hipótesis de que en el Cielo pudieran existir sistemas físicos de estrellas fué W. HERSCHEL (1738 - 1832), quien de inmediato se dedicó a individualizarlos.

En 1804 pudo presentar a la Sociedad Real de Londres, una lista de 50 estrellas dobles con movimientos estudiados cuidadosamente. W. STRUVE en 1837, catalogó 2.700 de estos pares, y tiempo después J. HERSCHEL, publica 6 catálogos de estrellas dobles boreales, con 4.500 pares, y otro con 2.100 del Cielo austral.

Casi siempre, los acompañantes en los sistemas dobles aparecen con luz coloreada, tal vez por contraste con la luz del astro principal, predominando los tonos, rojo, anaranjado, amarillo, verde y azul, a veces fuertemente pronunciados.

Entre las 20 estrellas primarias, son dobles visuales SIRIO, VEGA, LA CABRA, RIGEL, PROCIÓN, ACRUX, α DEL CENTAURO y ANTARES. Estrellas triples son ϵ del PEGASO, ζ del ESCORPIÓN y ξ del CÁNCER, y entre las cuádruples se citan σ de ORIÓN y ϵ de LA LIRA. La estrella θ de ORIÓN, situada en la nebulosa del mismo nombre, es SÉXTUPLE, formando sus integrantes el conocido grupo llamado "TRAPECIO".

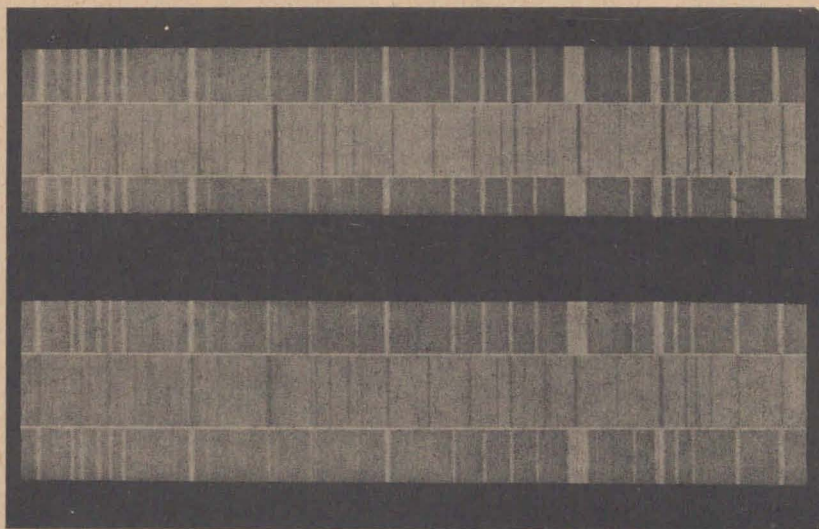


Fig. 234. — La binaria espectrográfica β de Orión, con corrimientos periódicos de sus rayas espectrales.

PERÍODO DE REVOLUCIÓN.— Los períodos de revolución de los sistemas dobles telescópicos o visuales, suelen ser largos. El menor conocido hasta la fecha corresponde a la estrella doble δ del CABALLO MENOR que es de unos 6 años. En cambio, el par que constituye la

estrella 61 del CISNE, invierte en su revolución 783 años; el de CASTOR, alrededor de 994 años, y el de la estrella doble τ de ACUARIO se ha calculado en 1758 años.

ESTRELLAS DOBLES ESPECTROSCOPICAS. — Su carácter de astros dobles es revelado por el espectro, pues comúnmente aparecen duplicadas las rayas denotando la superposición de dos espectros correspondientes a otros tantos astros, de los cuales uno permanece invisible. Algunas estrellas de este tipo presentan corrimientos periódicos de sus rayas espectrales, en uno y otro sentido, por alejarse y acercarse del observador (fig. 234).

En la actualidad se conocen más de 1.000 pares espectroscópicos, muchos de ellos descubiertos por PICKERING utilizando fotografías espectrales. Entre los pares más importantes pueden citarse: ALGO cuyo carácter de doble fué confirmado por VOGEL en 1890; LA ESPIGA, en que el período de duplicación de sus rayas espectrales es de cuatro días, en cuyo tiempo el satélite cumple una revolución alrededor del astro principal; CASTOR, doble visual, cuyas componentes α_1 y α_2 son dobles espectrográficas, de modo que donde a simple vista sólo percibimos una estrella, hay en realidad cuatro; Mizar, o τ de la OSA MAYOR, que revela pertenecer a esta categoría por un desdoblamiento periódico de la raya del calcio.

ESTRELLAS VARIABLES

291. GENERALIDADES. — Se llaman así, a las estrellas que acusan variaciones más o menos considerables en sus brillos, en lapsos a veces reducidos, a veces dilatados. En la actualidad se conocen alrededor de 6.000 de tales estrellas.

En muchas estrellas variables, los cambios de brillo están sujetos a períodos más o menos fijos de tiempo, cuya amplitud puede oscilar entre unas pocas horas y muchos años.

En cuanto a las variaciones de brillo en algunas estrellas no alcanza a 0,1 de magnitud, mientras en otras llega hasta 9 magnitudes.

Cuando las variaciones tienen períodos fijos, éstos en la mayoría de los casos están comprendidos, bien entre 200 y 400 días, *variables a largo período*, bien entre algunas horas y 10 días, *variables a corto período*. Esta duración está comúnmente ligada al color de la estrella, pues mientras las variables a corto período son por lo general blancas, las de largo período son casi siempre rojas, y de un rojo tanto más intenso cuanto más dilatado es aquél.

Las variaciones en el brillo de estas estrellas se ponen de manifiesto por gráficos llamados *curvas de brillo*, donde se toman en ordenadas las magnitudes luminosas y en abscisas los tiempos.

Un párroco de Frisia, DAVID FABRICIUS, es el primero que llama la atención, en agosto de 1596, sobre las variaciones de brillo expe-

rimentadas por la estrella llamada más tarde "*Mira Ceti*" (Maravillosa de la Ballena).

Esta estrella cambia de brillo en forma muy irregular en un año, aproximadamente, llegando a brillar en el máximo, en ocasiones, como estrella de 4ª magnitud, y en ocasiones alcanzando hasta la 2ª. Alrededor de 70 años después descubre FONTANARI que la estrella ALGOL, o β de PERSEO, varía en un período inferior a los tres días.

292. CLASIFICACION DE LAS ESTRELLAS VARIABLES. — Para estudiar con más propiedad a estos astros, se los divide en grupos con caracteres afines, tomando para cada uno de ellos una *estrella tipo*. Entre las diversas clasificaciones, es muy seguida la de PICKERING, cuyos tipos fundamentales son:

- I. *Variables a eclipse tipo Algol.*
- II. " " " " " β de La Lira (*Líridas*).
- III. " " " " " *regulares a corto período tipo δ de Cefeo* (*Cefeidas*).
- IV. " " " " " *irregulares tipo α de Casiopea.*
- V. " " " " " *a grandes cambios de brillo tipo Mira Ceti.*
- VI. " " " " " *temporarias (estrellas novas) tipo estrella Tycho en Casiopea.*

293. VARIABLES A ECLIPSE TIPO ALGOL. — Son estrellas sujetas a variaciones de brillo que se llevan a cabo en período corto

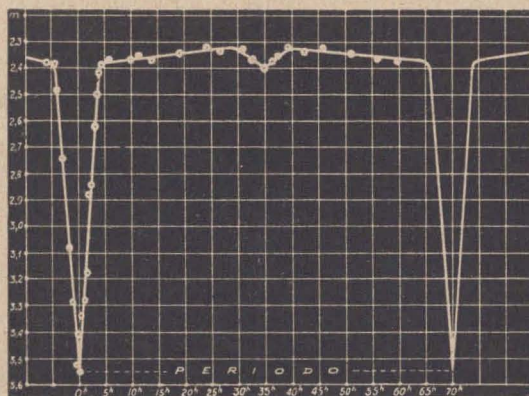


Fig. 235. — Curva de brillo de Algol. Los puntos representan medidas fotométricas.

de tiempo, pero de rigurosa constancia. En la actualidad se conocen más de 100. Las variantes son muy regulares, como puede verse en la curva de brillo de la fig. 235, que es la de Algol. La duración del período de ésta es de 2d 20h 40m, pasando de la 2ª a la 4ª magnitud.

Durante las variaciones, los espectros de las estrellas de este tipo no experimentan cambios, por lo cual se atribuyen las variantes de brillo a eclipses producidos por un acompañante más oscuro que se interpone entre el astro principal y la Tierra. Luego las variables tipo Algol son estrellas dobles, en que los integrantes están tan allegados, que no alcanzan a separarlos nuestros telescopios.

294. VARIABLES A ECLIPSE TIPO β DE LA LIRA (LIRIDAS). — Se conocen actualmente unas 20 estrellas de este grupo. La estrella tipo tiene un período de casi 13 días, presentando entre dos mínimos principales (fig. 236), un mínimo secundario que se verifica 6,5 días después que cada uno de aquéllos.

En el mínimo principal el brillo de esta estrella corresponde a la magnitud 4,5, en el secundario a la 3,9, y en el máximo a la 3,4. La estrella de más corto período en este grupo es U de PEGASO (9 horas), y la de período más amplio W de LA CRUZ (198d 12h).

El mínimo secundario se explica admitiendo que el satélite que produce el eclipse posee también un cierto brillo, por lo cual al ocultarse detrás del astro principal, sólo permite advertir el brillo de éste.

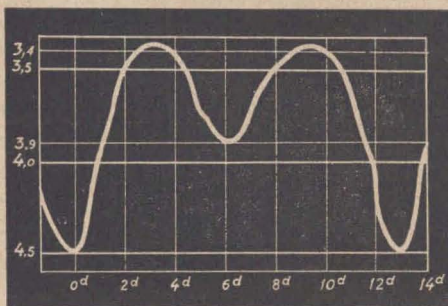


Fig. 236. — Curva de brillo de β de la Lira.

295. VARIABLES REGULARES A CORTO PERIODO, TIPO δ DE CEFEO (CEFEIDAS). — La característica importante de las cefeidas, es que el aumento de brillo se lleva a cabo en menor tiempo que el empleado en la disminución, como lo muestra la curva de la estrella tipo (fig. 237). Además la rama ascendente de dicha curva es siempre regular, mientras que la descendente, en la mayoría de los casos, presenta sinuosidades más o menos pronunciadas que varían de una estrella a otra del grupo.

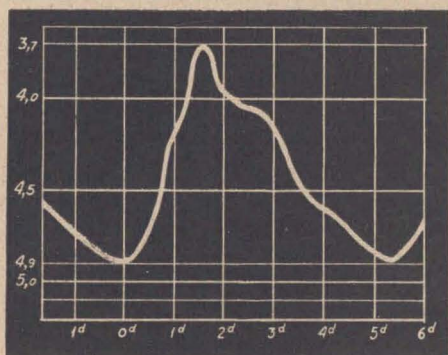


Fig. 237. — Curva de brillo de δ de Cefeo.

En aquéllas permanece inalterable durante un tiempo. Entre el par de centenas de cefeidas conocidas, exceptuando las de las nebulosas, hay unas 70 con períodos inferiores a un día, y sólo cinco cuyos períodos están comprendidos entre 30 y 45 días. El período más corto (3h 15m) corresponde a las estrellas RV de los PERROS DE CAZA, y XX del

CISNE, habiéndose observado que los períodos son tanto más largos cuanto mayor es el brillo absoluto de la cefeida*.

SHAPLEY opina que estas variables son estrellas gigantes, mucho más brillantes que nuestro Sol.

En la actualidad va ganando terreno la llamada "*hipótesis de la pulsación*" desarrollada por EDDINGTON, según la cual estas voluminosas estrellas al estado gaseoso, se dilatan y comprimen alternativamente efectuando como latidos que al aumentar y disminuir su superficie las hace aparecer más o menos brillantes. Las estrellas tipo δ de Cefeo, así como las de otros tipos de variables, suelen agruparse preferentemente en los cúmulos estelares que se estudiarán más adelante.

296. VARIABLES IRREGULARES TIPO α DE CASIOPEA. —

Son estrellas de poca variación caracterizadas por la amplitud de sus períodos, si es que lo tienen.

Casi todas son rojas y la variación en brillo sólo por excepción alcanza a las dos magnitudes. Entre las estrellas conocidas de este grupo, algo más de 300, deben citarse en primer lugar α de Casiopea, que suele tomarse como estrella tipo y después a Betelgeuse.

Los cambios de brillo están sujetos, en estas estrellas, a continuas variaciones y suelen oscilar entre los 45 y los 90 días. Algunas ofrecen características afines, en cierto modo, con las estrellas "*novas*" que se verán más adelante.

297. VARIABLES A GRANDES CAMBIOS DE BRILLO TIPO MIRA CETI. — Se distinguen por sus largos períodos, de los cuales en la actualidad se conocen unos 600, por más que falta determinar el de otras muchas estrellas del mismo tipo, que son, entre las variables, las que más abundan en el Cielo.

El menor período conocido corresponde a la estrella T DEL CENTAURO y es de 90 días, mientras el mayor que es el de S DE CASIOPEA, alcanza a 611 días, estando comprendidos, los más de ellos, entre los 200 y 400 días.

La estrella tipo o MIRA CETI, presenta un período variable entre 320 y 370 días y en los máximos el brillo oscila entre las magnitudes 2ª y 4ª, mientras en los mínimos la magnitud del brillo es la 8ª o la 9ª.

298. VARIABLES TEMPORARIAS (ESTRELLAS NOVAS). —

Este tipo original entre las estrellas variables, suele observarse con más frecuencia de lo que se cree desde los observatorios astronómicos, calculando BAYLEY, que aparecen, término medio, unas nueve por año, cuyo brillo en el máximo alcanza a la 9ª magnitud. Se trata de astros de magnitudes inferiores, a veces ya registrados

* Esta circunstancia permitió a MISS LEAVITT hallar la magnitud absoluta de estrellas de este tipo muy lejanas determinando así su paralaje y su distancia.

en los catálogos estelares, y otras no, que inusitadamente aumentan de brillo en un corto período de tiempo, y después de alcanzar el máximo inician una declinación algo más lenta hasta volver al brillo primitivo, y en ocasiones a otro inferior.

Es célebre en el historial de estas variables la nova aparecida en 1572 en la constelación de CASIOPEA y observada por TYCHO-BRAHE, la cual se hizo visible en pleno día. Las crónicas registran apariciones de tales astros desde el año 134 antes de nuestra era, en que fué observada una nova muy brillante en la CABEZA DEL ESCORPIÓN.

Entre las novas aparecidas en las últimas décadas, se destaca, en primer lugar, la del AGUILA, vista por primera vez en la noche del 7 de junio de 1918.

Como el proceso de todas las novas en sus variantes suele ser con ligeras diferencias el mismo, pasamos a describirlo para la nova últimamente mencionada.

Cuando esta estrella reveló su condición de variable temporal, su brillo había alcanzado la 1ª magnitud, figurando anteriormente en los catálogos estelares como un astro de 11ª. Al día siguiente el brillo alcanzado llegaba a la magnitud $-0,6$, apareciendo en consecuencia con la luminosidad de CANOPUS, y cinco días después de su aparición sólo brillaba como estrella de 4ª, siguiendo el proceso descendente con alguna lentitud hasta que a fines del año 1921 el telescopio la registraba como un astro de 10ª. En la actualidad aparece como una tenue nebulosa de color verdoso con un diámetro aparente superior a 3". Se alcanzó a comprobar que las declinaciones de brillo no eran regulares, sino que se producían a "saltos", como se había ya observado en otras estrellas de este grupo.

Otro fenómeno común a todas las novas, es el cambio de color que experimentan durante las variaciones. El color primitivo que por regla general es el blanco, pasa rápidamente al amarillo y de éste al rojo, iniciándose a continuación el proceso inverso y volviendo a tomar el astro su color inicial. Las variaciones de color no deben atribuirse exclusivamente a cambios de temperaturas, pues el espectro varía durante la explosión por otras causas.

Según VOGEL, la aparición de las novas se debe al choque de dos estrellas, convirtiendo su masa por el calor desarrollado en gases incandescentes. Lo que no alcanza a explicar esta hipótesis es la rapidez del enfriamiento que ocasiona el considerable descenso del brillo en pocos meses, así como tampoco la frecuencia con que aparecen.

SEELIGER, a raíz de sus observaciones sobre la NOVA DEL COCHERO, opinó en 1892 que ciertas regiones del espacio están pobladas por masas absorbentes oscuras constituidas por gases fríos o polvo cósmico, y que la nova se origina al penetrar una estrella en una de tales masas. A causa de la resistencia ofrecida a la penetración, el calor producido alcanza a provocar la incandescencia de la superficie del astro, lo mismo que la de una gran porción de la masa absorbente. Los fenómenos observados en 1901, a raíz de la aparición de la NOVA DE PERSEO,

parecen confirmar esta hipótesis, con la cual se explicaría la nebulosidad que después envuelve a las novas.

Actualmente parece fuera de duda que la formidable explosión que da origen a las novas proviene de energía interatómica, puesta súbitamente en libertad por un proceso aun desconocido.

* 299. LAS SUPERNOVAS. — Las novas pueden alcanzar una magnitud absoluta igual a -7 , lo que equivale a un brillo de unas 90.000 veces mayor que el del Sol. Otras novas llamadas *supernovas* alcanzan una magnitud absoluta igual a -14 . Su brillo, en breve intervalo, llega a ser cientos de millones de veces superior al del Sol. Hasta 1938 se habían estudiado 18 de estas estrellas. El astrónomo WHIPPLE, del Observatorio de Harvard, en una memoria publicada en 1939, sostiene que las supernovas se originan por el choque de dos estrellas.

Después del extraordinario aumento de brillo producido por la colisión podría originarse una nebulosa, por la expansión brusca de los gases al aumentar la temperatura. LUNDMARK, director del Observatorio de Upsala (Suecia), cree, p. ejem., que la nebulosa del Cangrejo * de la constelación del Toro, haya sido originada por una supernova que según crónicas chinas y japonesas fué observada en esa región del Cielo en el año 1054.

* Este nombre le fué dado por LORD ROSSE, debido a su forma que la halló parecida a la de aquel crustáceo.

CONSTITUCION DE LAS ESTRELLAS

300. COLOR DE LAS ESTRELLAS. — De las estrellas visibles a ojo desnudo, son muy pocas las que se apartan del color blanco o blanco azulado. Las escasas estrellas coloreadas son rojas, anaranjadas o amarillas, encontrándose entre las primeras tres estrellas primarias, ALDEBARÁN, BETELGEUSE y ANTARES; entre las anaranjadas, ARTURO y entre las amarillas, LA CABRA.

Observadas con anteojos, las coloraciones que ofrecen las estrellas son las mismas que presentan a simple vista. Entre las estrellas dobles telescópicas (290) suelen aparecer acompañantes de colores verde y azul, coloraciones que se atribuyen al contraste entre la luz que emite el astro principal y la más débil que emana del satélite.

Las estrellas rojas y anaranjadas, han sido objeto de gran atención por parte de los astrónomos, debido a que la mayor parte de las variables (291) suelen presentar esas coloraciones durante el proceso del cambio de brillo, sobre todo las "*novas*" que pasan del blanco al anaranjado y de éste al rojo, para iniciar a continuación el proceso inverso terminado en el color primitivo.

Se han publicado catálogos de estrellas de color, entre ellos uno muy completo de MÜLLER y KEMPF que contiene unas 14.000. Los mismos autores hacen notar la influencia que ejerce el color sobre el brillo de las estrellas, pues en algunos casos la determinación fotométrica de las magnitudes de estrellas coloreadas conduce a errores que suelen alcanzar hasta casi 0,4 de magnitud.

Como dato ilustrativo, consignamos que la estrella más roja del Cielo, según J. Herschel, es una de 8ª magnitud situada cerca de β de la Cruz.

301. ESPECTROS ESTELARES: CLASIFICACIONES DE SECCHI Y VOGEL. — El padre SECCHI (1818-1878), es el primero que clasifica a las estrellas según las características de sus espectros, relacionando éstos con el color de aquellos astros. La clasificación de SECCHI comprende cuatro grupos o *tipos* que se pasan a detallar:

TIPO I. — Pertenecen a este grupo las estrellas blancas y blanco-azuladas, cuyos espectros se caracterizan por líneas en general anchas y oscuras correspondientes al hidrógeno. Estos espectros, muy ricos en radiaciones azules y violetas, ponen de manifiesto elevadas temperaturas capaces de disociar en átomos a todas las moléculas de las substancias conocidas. A las estrellas de este tipo, se las subdivide en tres subtipos:

En el subtipo Ia, están agrupadas las estrellas de carácter nebuloso, llamadas *estrellas Wolf-Rayet*. Estas estrellas situadas todas en la *Vía Láctea* (67), presentan espectros de emisión a rayas brillantes correspondientes al helio y al hidrógeno.

Al subtipo Ib pertenecen las llamadas *estrellas a helio*, apenas separadas del estado nebuloso. Aparecen también en la *Vía Láctea*, y sus espectros en la región del violeta, están surcados por rayas brillantes y oscuras de *helio* e *hidrógeno* muy intensas, apareciendo más débiles las rayas de otros elementos, como ser, silicio, magnesio,

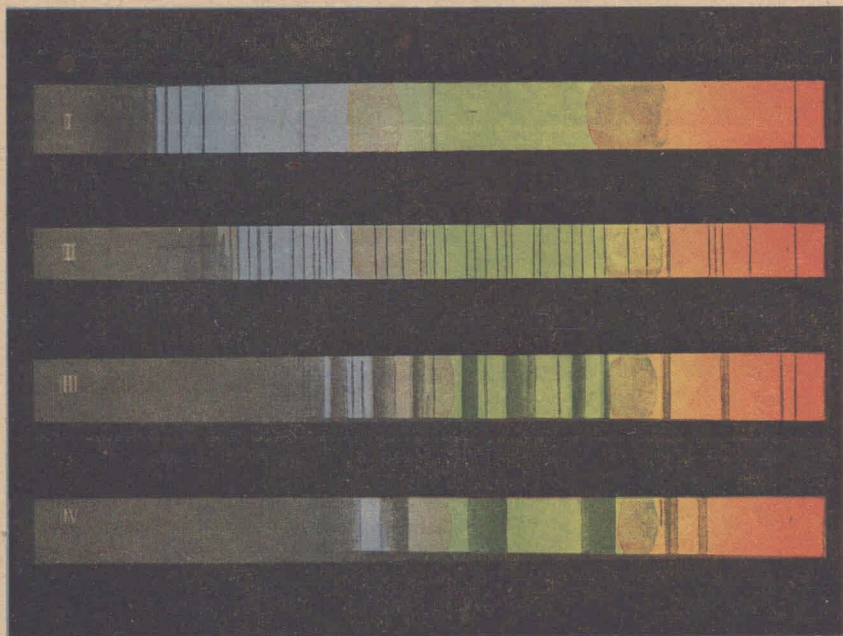


Fig. 238. — Los 4 tipos espectrales de Secchi.

nitrógeno y oxígeno. A este subtipo pertenecen *Rigel*, *Régulo*, *La Espiga*, *Bellatrix*, *Alcyone* y otras muchas estrellas.

El tercer subtipo, o sea Ic, comprende a las denominadas *estrellas a hidrógeno*, astros de luz blanca, entre ellos *Sirio* y *Vega*. En los espectros de tales estrellas predominan las rayas del *hidrógeno*, apareciendo otras mucho más débiles correspondientes al *hierro* y al *calcio*.

TIPO II. — Está formado por estrellas amarillentas con espectros análogos al de nuestro Sol. La temperatura de estas estrellas es inferior a las del tipo I, siendo por consiguiente sus espectros menos ricos en radiaciones azules y violetas. Forman parte de este grupo, además del Sol, *La Cabra* o *Capella*, la polar norte α de la *Osa menor*, *Pólux*, α de la *Osa mayor*, etc.

En los espectros tipo II, son muy numerosas las rayas metálicas, en tanto que las del hidrógeno van perdiendo la intensidad que las caracterizaba en el tipo I. A algunas estrellas de este grupo se las suele llamar *estrellas solares*, entre ellas a La Cebra; en cambio otras como *Proción*, parecen estar en el límite de separación de los tipos I y II, mientras *Aldebarán* estaría en el deslinde de los grupos II y III.

Las estrellas del tipo II son menos numerosas en el Cielo que las estrellas blancas y blancoazuladas del grupo anterior.

TIPO III. — Está constituido por estrellas rojas y anaranjadas con temperaturas inferiores a la del Sol. Sus espectros son relativamente débiles en radiaciones azules y violetas, predominando en ellos una serie de anchas bandas oscuras al par que muchas rayas finas de absorción. *La presencia de bandas, revela la existencia de moléculas*, lo que prueba que la temperatura reinante, relativamente baja, no alcanza el valor necesario para producir la disociación de las mismas en átomos.

Las bandas en los espectros estelares del tipo III de SECCHI, se caracterizan por ser bien limitadas hacia el violeta y esfumadas hacia el rojo, y por su posición, revelan la presencia de *óxidos metálicos*, sobre todo de *titanio* y *manganeso*. A tales estrellas, entre las cuales pueden citarse *Betelgeuse*, *Antares* y la variable *Mira Ceti*, se las suele llamar *estrellas oxidadas*.

TIPO IV. — El último tipo de la clasificación de Secchi, comprende a estrellas de color *rojo - rubí* cuyos espectros presentan bandas más anchas que las del tipo III, pero que se esfuman ahora hacia el violeta. Dichas bandas que corresponden al *carbono* y a los *hidrocarburos*, hacen que a tales astros se los designe a veces con la denominación de *estrellas a carbón*. Estas, cuyo número es muy reducido, pues no pasa de algunos centenares, son las de menor temperatura de todas las estudiadas en la clasificación, y en cuanto a su brillo son muy raras las que alcanzan la 6ª magnitud, entre las cuales debe citarse la 19 de los Peces.

El espectro de las estrellas rojas de los tipos III y IV, revela que éstas no poseen hidrógeno al estado libre, sino combinado con otros elementos, siendo ésta una de las características diferenciales con las estrellas de los grupos I y II, donde el hidrógeno libre es el elemento más abundante.

La clasificación espectral de Vogel, puede considerarse como una ampliación de la del padre SECCHI. Los tipos espectrales de VOGEL son solamente tres: I, II y III, pero el tipo III lo subdivide en IIIa y IIIb, correspondientes, respectivamente, a los tipos III y IV de SECCHI.

Al agrupar VOGEL en un solo tipo a las estrellas de los tipos III y IV de SECCHI, lo hace con la finalidad de evitar confusiones respecto al grado evolutivo de los astros comprendidos en los mismos. En efecto: por la clasificación de SECCHI, pareciera deducirse que las estrellas del tipo IV son más evolucionadas que las del III, y que, en consecuencia, pertencie-

ron a este tipo anteriormente. En cambio VOGEL considera que ambos tipos derivan paralelamente del II, de modo que las estrellas de este último siguen su proceso evolutivo, bien hacia el tipo III (IIIa de Vogel), bien hacia el tipo IV (IIIb de Vogel).

* 302. CLASIFICACION ESPECTRAL DEL HARVARD COLLEGE. — La clasificación de VOGEL, lo mismo que la del padre SECCHI, seguidas durante largo tiempo, resultaron insuficientes para

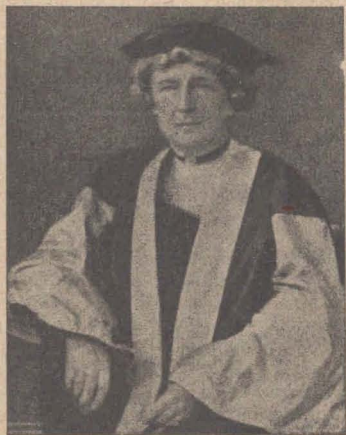


Fig. 239. — Miss Annie Cannon.

poner de manifiesto las diversas gradaciones y características de los espectros estelares cuando se conocieron los de unas 200.000 estrellas que aparecen en "*The Henry Draper Catalogue*" publicado en los anales del Observatorio de Harvard por PICKERING, en colaboración con Miss CANNON.

Para la confección del tal catálogo, MISS CANNON utiliza tipos, o clases espectrales que designa por letras.

Los tipos espectrales utilizados en la actualidad son los designados con las letras Q, P, O, B, A, F, G, K, M, N, R y S. De ellos, los dos últimos, R y S, fueron introducidos en la clasificación de MISS CANNON, el R en

el año 1908, y el S en 1922 por el CONGRESO INTERNACIONAL DE ASTRONOMÍA DE ROMA.

En el cuadro de pág. 323 se consignan las características más importantes de los diversos tipos espectrales. Se mencionan en él

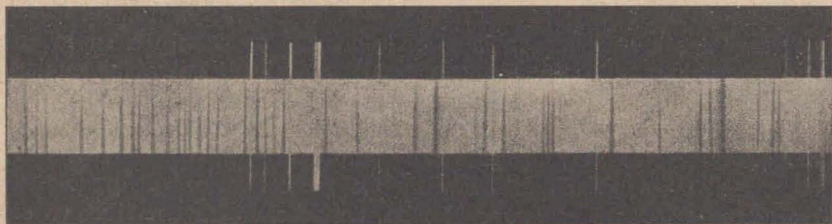


Fig. 240. — Espectro de la estrella ϵ de Perros de Caza. (Tipo B). (Ob. Yerkes).

las temperaturas correspondientes y en los ejemplos figuran todas las estrellas primarias. Las cruces que acompañan a algunos símbolos químicos indican el grado de ionización: O_{++} indica que aparecen en el espectro las líneas de absorción del átomo de oxígeno doblemente ionizado o sea que ha perdido dos de los ocho electrones que posee en estado neutro.

CLASIFICACION DE HARVARD

Tipo espectral	Nombres característicos	Particularidades del espectro	Temperatura en ° C	Ejemplo
<i>Q</i>	Novas	Espectro variable. Líneas de absorción corridas hacia el violeta. Anchas líneas de emisión.	8.000 - 10.000	Nova del Aguila.
<i>P</i>	Nebulosas planetarias	Espectro de fluorescencia. Estrella excitatriz tipo Oe. Líneas "prohibidas" del <i>O</i> y <i>N</i> ("Nebulio").	—	Nebulosa anular de la Lira.
<i>O</i> (Blanco - azuladas)	Gigantes blancas Masa = 40 — 50 Densidad = 0,1 — 0,01	Líneas de <i>O</i> ⁺⁺ , <i>C</i> ⁺⁺ , <i>N</i> ⁺⁺ y <i>Si</i> ⁺⁺ . Líneas y bandas de emisión.	22.000 - 15.000	γ del Navio.
<i>B</i> (Blanco - azuladas)	Estrellas a Helio (Oriónidas) Masa = 10	Líneas de <i>O</i> ⁺ , <i>Mg</i> ⁺ y <i>Si</i> ⁺⁺ . Líneas intensas del <i>He</i> .	15.000 - 10.000	Rigel, Régulo, ε de Orión, } del Centauro, Algol, Acrux, Achernar, Espiga.
<i>A</i> (Blancas)	Estrellas a hidrógeno Masa = 6	Línea <i>K</i> del <i>Ca</i> ⁺ . Serie de Balmer en absorción muy intensa.	10.000 - 8.000	Sirio, Vega, Altair, Deneb, Formalhaut.
<i>F</i> (Blanco - amarillento)	Estrellas presolares a calcio	Muy intensas líneas <i>H</i> y <i>K</i> del <i>Ca</i> ⁺ .	8.000 - 6.000	Canopus, Proción, Polar Norte.
<i>G</i> (Amarillo - blanquizco)	Estrellas solares	Además de las líneas <i>H</i> y <i>K</i> del <i>Ca</i> ⁺ la <i>G</i> del <i>Fe</i> .	6.000 - 5.000	Sol, La Cabra, α del Centauro.
<i>K</i> (Amarillo - rosado)	Estrellas post-solares	Líneas de átomos metálicos no ionizados.	5.000 - 4.000	Arturo, Aldebaran, Polux.
<i>M</i> (Rojo)	Estrellas a titanio	Bandas de <i>TiO</i> .	4.000 - 3.000	Betelgeuse, Mira Ceti, Antares.
<i>N</i> (Rojo - sangre)	Estrellas a carbono	Bandas de compuestos del <i>C</i> .	< 3.000	19 Peces.
<i>R</i> (Amarillo - rosado)	Segundo tipo de estrellas a carbono	Bandas de compuestos del <i>C</i> . Espectro más intenso hacia el violeta que en <i>N</i> .	< 3.000	α = 19h17m. δ = -10°54'.
<i>S</i> (Rojo)	Estrellas a zirconio	Bandas de <i>ZrO</i> ₂ .	< 3.000	R Andrómeda.

* 303. ESTRELLAS GIGANTES Y ENANAS. RADIOS Y VOLÚMENES. — El astrónomo HERTZSPRUNG, propuso en 1908 llamar estrellas *gigantes* a las de gran brillo absoluto, y *enanas* a las de débil brillo absoluto. Supongamos dos estrellas de igual tipo espectral en la clasificación de Harvard, p. ejm., del tipo K, la una de magnitud absoluta 0, y la otra de magnitud absoluta 8. Dichas estrellas por pertenecer al mismo tipo espectral, tendrán más o menos la misma temperatura, vale decir que el brillo emanado por unidad de superficie en ambas es el mismo. Pero, como la primera de ellas es $2,512^8$ (56) veces mayor en brillo que la segunda, podre-

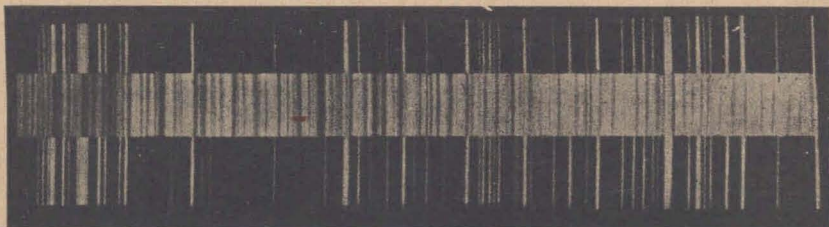


Fig. 241. — Espectro de α del Toro (Aldebarán). (Tipo K). (Ob. Yerkes).

mos deducir que su superficie es también $2,512^8$ veces mayor, o lo que es lo mismo, que la estrella de magnitud absoluta 0 es en superficie unas 1.600 veces mayor que la de magnitud absoluta 8. Luego, suponiéndolas esféricas, correspondería a la primera un radio 40 veces mayor que el de la segunda y en consecuencia su volumen sería también unas 64.000 veces mayor. Atendiendo a las consideraciones anteriores, se han podido calcular con cierta aproximación, los radios de muchas estrellas, y con ello el volumen, tomando como unidad de medida el radio del Sol.

En las tablas que siguen se dan algunos de los resultados obtenidos para estrellas gigantes y enanas.

TABLA I
RADIO Y VOLUMEN DE ESTRELLAS GIGANTES

ESTRELLA	RADIO Unidad: radio solar	VOLUMEN Unidad: volumen solar
Arturo	27	19.700
Aldebarán	38	55.000
Scheat	40	64.000
Betelgeuse	300	27.000.000
Mira Ceti	300	27.000.000
α Hércules	400	64.000.000
Antares	450	91.000.000

TABLA II

RADIO Y VOLUMEN DE ESTRELLAS ENANAS

ESTRELLA	RADIO Unidad: radio solar	VOLUMEN Unidad: volumen solar
Agena	11,0	1.330
Vega	2,4	14
Proción	1,9	7
Sirio	1,8	7
Altair	1,4	4
Rigil Kenturus ..	1,0	1

* 304. RELACION ENTRE LA MAGNITUD ABSOLUTA Y EL TIPO ESPECTRAL DE LAS ESTRELLAS: DIAGRAMA DE RUSSELL. ENANAS BLANCAS. — Consideremos un sistema cartesiano ortogonal (fig. 242), sobre el cual se llevan como abscisas los tipos espectrales de Harvard, y como ordenadas las magnitudes absolutas. De este modo a cada estrella de magnitud absoluta y tipo espectral conocidos le corresponderá un punto imagen. En tal caso, y según lo hizo RUSSELL en 1913, valiéndose de varios centenares de estrellas, y después CURTIS utilizando unas 3.000, se aprecia en la gráfica obtenida por este último, que las imágenes de las estrellas estudiadas se disponen en tal diagrama según una *Z* invertida cuya rama inferior aparece muy raleada. La rama media inclinada con respecto al eje de las abscisas es llamada por PICKERING "*secuencia media*" y corresponde a las estrellas enanas. En dicha rama, la más nutrida de las trigs, está ubicado el Sol ofreciendo el máximo de condensación en la región correspondiente a las estrellas del tipo *F* y en parte del *G*. Las estrellas gigantes forman una rama casi paralela al eje de las abscisas con gran condensación en la región correspondiente a las estrellas de los tipos *G* y *K*, presentando otra condensación parcial en el tipo espectral *M*.

En conformidad con el gráfico de CURTIS, pueden considerarse tres ramas más o menos definidas, para estos astros:

1ª RAMA: Es la de las estrellas gigantes, que podríamos llamar "*jóvenes*", donde el astro en razón de su poca densidad ofrece un gran volumen, y en consecuencia, gran superficie de brillo.

2ª RAMA: La forman las estrellas de la "*secuencia media*", con menores temperatura y brillo absoluto que las de la rama anterior, presentando en cambio mayores densidades, como se verá en parágrafo siguiente.

3ª RAMA: Es la de las estrellas "enanas blancas" con temperaturas muy elevadas, como lo indica el color, y grandes densidades. Entre éstas pueden citarse además del *satélite de Sirio*, el de la estrella 40 de *Eridano* y la llamada *estrella de Van Maanen*.

En lo sucesivo, seguiremos llamando estrellas enanas, no tan sólo a las de este último grupo, de las cuales por otra parte se conocen muy pocas, sino también a las de la rama de la "*secuencia media*", donde se agrupan los cinco sextos de las estrellas del Cielo.

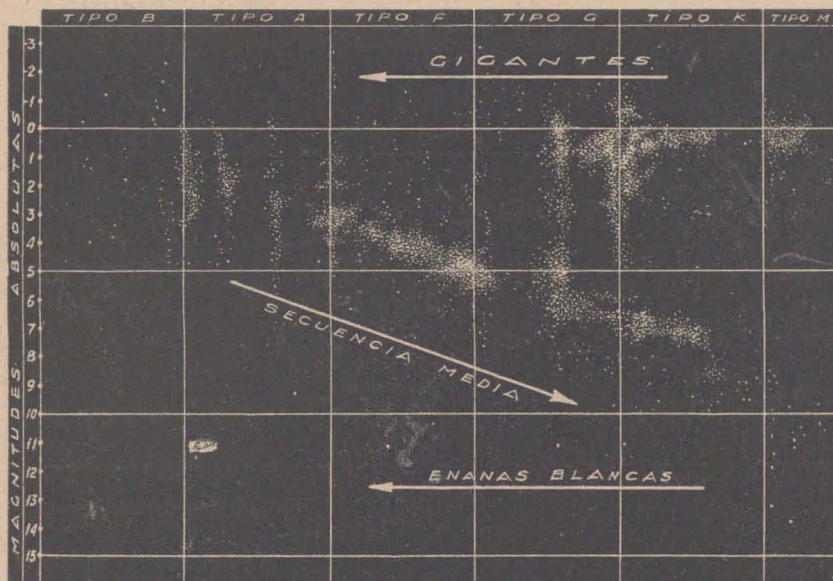


Fig. 242. — Diagrama de Curtis.

* 305. MASA Y DENSIDAD DE LAS ESTRELLAS. — En las estrellas dobles la determinación de la masa se obtiene aplicando la ley de Newton. Se ha encontrado así que a mayor masa estelar corresponde en general una mayor luminosidad (286). Esto permite obtener con cierta aproximación la masa de una estrella cualquiera (aunque no sea doble) si se conoce la magnitud absoluta del astro. Los resultados obtenidos demuestran que las masas estelares están comprendidas entre 0,1 y 10 masas solares. Como además pueden determinarse los volúmenes de las estrellas (303) se podrá conocer la densidad media de las mismas.

En el cuadro que sigue se consignan algunos resultados obtenidos para las densidades de estrellas gigantes, de la secuencia media y enanas blancas, tomadas con respecto al agua. Las figuras 243 y 244, dan los tamaños comparados de algunas estrellas gigantes, enanas y enanas blancas. Como se ve las densidades de estas

últimas son asombrosamente grandes. La materia alcanza en ellas un grado de condensación fabuloso que se explicaría admitiendo que los átomos están en ellas casi totalmente ionizados, quedando reducidos a poco más del núcleo.

DENSIDAD DE ESTRELLAS

GIGANTES	SECUENCIA MEDIA	ENANAS BLANCAS
Scheat ... 0,0000020	Agena 0,02	Satélite de Si- rio 50.000
Antares .. 0,0000003	Vega 0,11	Satélite 40 de Eridano 64.000
Betelgeuse. 0,0000006	Proción 0,16	Estrella de Van Maanen 400.000
Aldebarán . 0,00002	Sirio 0,42	Estrella de G. P. Kuiper .. 35.000.000
Arturo ... 0,0003	Altair 0,60	
La-Cabra . 0,0024	Rigil Kenturus . 1,10	
	Sol 1,41	

EVOLUCION DE LAS ESTRELLAS

* 306. PRELIMINARES. PARADOJA DE LANE. — Para formarse idea de como se desenvuelve la vida de los innumerables astros que noche tras noche contemplamos en el Cielo, la primer preocupación consistirá en considerar un gran número de ellos, y tratar de establecer sus caracteres afines y diferenciales.

A pesar de las distintas teorías elaboradas en las últimas décadas por LOCKYER, RUSSELL y otros astrónomos modernos, el problema de la evolución de las estrellas no puede considerarse como resuelto.

PARADOJA DE LANE. — Imagina LANE un astro que en un principio está constituido por gas perfecto, es decir que cumple en absoluto las *leyes de Mariotte y Gay Lussac*. En tales condiciones demuestra el mencionado investigador, que: *un astro que se contrae en equilibrio convectivo, genera una cantidad de calor, superior a la energía que entre tanto irradia*, o lo que es lo mismo: *el astro que se contrae (en aquellas condiciones) irradia calor y se calienta al mismo tiempo*. A este resultado paradójal, el teorema debe su nombre.

* 307. EVOLUCION DE LAS ESTRELLAS: LAS DOS HIPO-
TESIS. — Ya que todas las estrellas del Cielo, de las cuales en la actualidad se conocen el tipo espectral y la magnitud absoluta, forman

su imagen en el diagrama en una u otra de las 3 ramas de la Z invertida (304), es lógico admitir que el proceso evolutivo según el cual se desarrolla la vida de estos astros, debe guardar una relación estrecha con dicho diagrama.

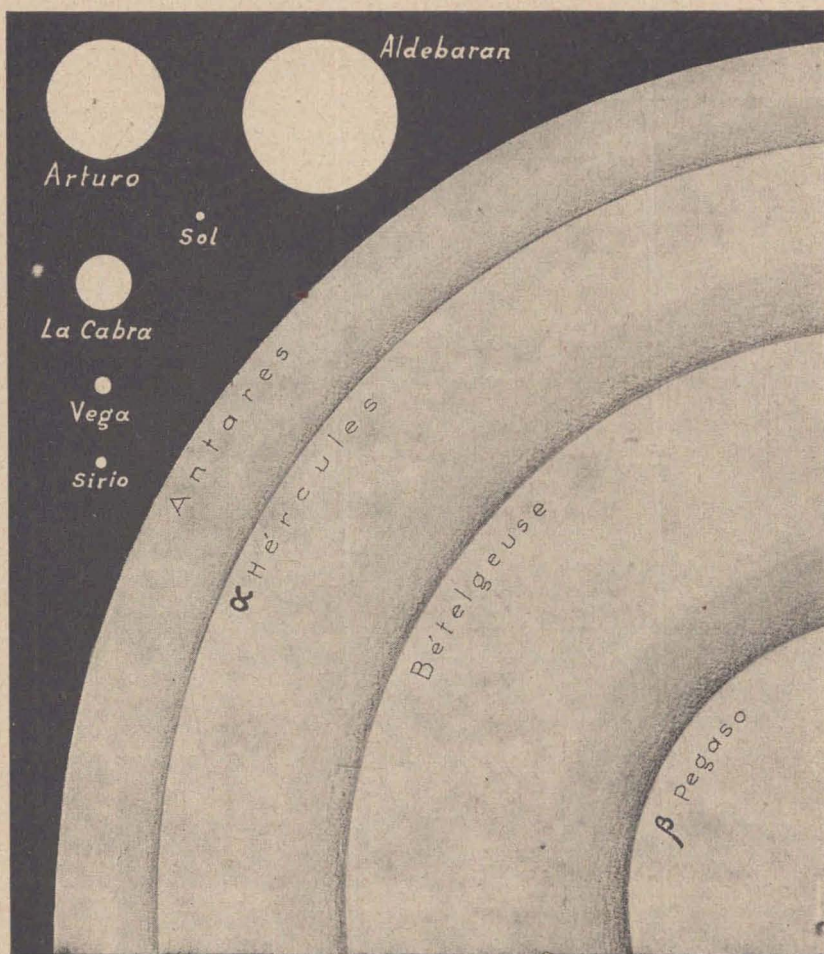


Fig. 243. — Gigantes y enanas de la secuencia media.

El estudio del mismo conduce a dos hipótesis acerca de la forma en que evolucionan posiblemente las estrellas:

HIPÓTESIS A. — *La estrella durante su vida recorre en imagen la Z invertida según el camino indicado por las flechas 1 (fig. 245). En tal caso el astro comienza por ser una estrella gigante, y en un proceso cuya duración se contaría en millones de milenios, después de*

convertirse en estrella enana de la "secuencia media", termina su vida de astro luminoso en la recta de las enanas blancas, con gran densidad y pequeño volumen.

HIPÓTESIS B. — *La estrella en imagen, no recorre la Z invertida del diagrama, siendo las ramas de éste, simples lugares de estacio-*



Fig. 244. — Tamaño comparado de algunas enanas blancas con la Tierra.

namiento. En tal supuesto la imagen de la estrella podrá seguir p. ejm. el recorrido indicado por la flecha 2, con largas estancias en e_1 y e_2 . Por esta hipótesis se inclinan las teorías más recientes.

* 308. TEORIAS EVOLUTIVAS DE LOCKYER Y RUSSELL.

— 1. LOCKYER, desconociendo aún las magnitudes absolutas de las

estrellas, consideró que el tipo espectral de las mismas era función de dos variables: temperatura y densidad. En su esquema evolutivo, dispone a las estrellas en 16 tipos, agrupando en los 8 primeros a aquellas de temperatura y densidad creciente, y en los 8 últimos

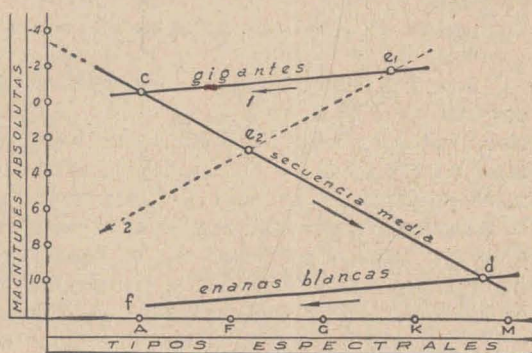


Fig. 245. — Diagrama de la Z invertida.

a las de temperatura decreciente y densidad creciente.

2. La primera teoría evolutiva de RUSSELL enunciada en el año 1913, corresponde a la parte del diagrama llamado *siete invertido* integrado por las rectas de las gigantes y la secuencia media, pudiéndose la considerar como consecuencia inmediata del descubrimiento verificado a principios del siglo XX, de que dentro de un mismo tipo

espectral de Harvard se agrupan estrellas gigantes y estrellas enanas, como lo demuestran las magnitudes absolutas de tales astros.

Para Russell, las estrellas no son cuerpos al estado líquido, como se las consideró antes, pues bajo este punto de vista no podría explicarse la débil densidad de las estrellas gigantes. Consideró entonces, que esos astros deben formarse de materia fría contenida en las nebulosas, de modo que en un principio no serían más que formaciones gaseosas más o menos globulares de debilísima densidad y baja temperatura. Esta, al contraerse la masa así formada, irá en ascenso según lo visto en la *paradoja de Lane*, con lo cual el astro irá tomando las coloraciones roja, anaranjada, amarilla, blanca y blanca azulada, ínterin el tipo espectral recorre la escala *M, K...*, *A, B* (fig. 246).

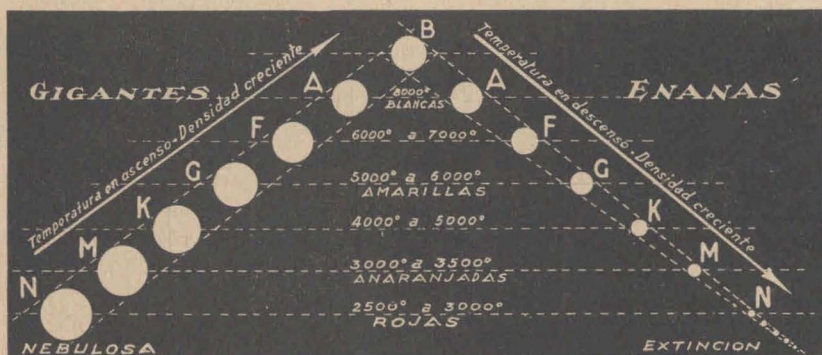


Fig. 246. — Evolución estelar según la primitiva teoría de Russell.

Durante este proceso, la estrella es gigante y su imagen se desplaza de derecha a izquierda en el diagrama del párrafo anterior, hasta que la densidad por haber llegado a un valor relativamente alto, hace inaplicable la paradoja de Lane, por no ajustarse ya la masa estelar a las leyes de los gases perfectos. En estas condiciones, la temperatura del astro comienza a descender debido al calor perdido por irradiación, mientras su masa sigue contrayéndose dando lugar a una disminución de la luminosidad, que en la primer etapa se había mantenido casi constante. A raíz de todo ello, el astro pasa a la condición de estrella enana, y su imagen recorre en el diagrama la secuencia media, volviendo a pasar por los mismos tipos espectrales recorridos sobre la recta de las gigantes, pero en sentido inverso *B, A...*, *K, M*.

Para Russell, la masa de la estrella juega un rol importante en el proceso evolutivo, pues cuando es pequeña, no alcanza el astro a adquirir la temperatura necesaria para que su espectro sea del tipo, *B, A*, etc., en cuyo caso las estrellas pierden su carácter de gigantes, a veces al llegar a *A*, y otras en *F, G...*, etc., pasando en

seguida a la categoría de enanas de la secuencia media. En consecuencia, las estrellas son gigantes o enanas, no ya por su masa, sino por su superficie.

La teoría de Russell apareció en un principio como una verdadera solución del problema relativo a la evolución estelar, pues daba razón de diversos hechos antes inexplicables, como ser, la mayor masa que por lo general tienen las estrellas de los tipos espectrales *A* y *B*; el porque de la división de las estrellas en gigantes y enanas, así como la mayor densidad de estas últimas. Sin embargo, el descubrimiento de las estrellas enanas blancas, que transforma el diagrama a siete invertido, o *diagrama de Russell*, en otro a zeta invertida, hicieron que se la abandonara después de un corto reinado de 10 años.

Por otra parte, en la actualidad, se dan como probados dos hechos en abierta contradicción con la teoría esbozada. En primer lugar, la fuente del calor estelar no hay que buscarla ya en la contracción de la masa del astro, sino en la transformación en energía de parte de su materia; y en segundo, que EDDINGTON ha conseguido poner en evidencia, que las estrellas enanas de la secuencia media se comportan como si estuvieran constituidas por gas perfecto, y que en consecuencia la paradoja de Lane les es en un todo aplicable.

CAPITULO CUARTO

CUMULOS ESTELARES Y NEBULOSAS

309. CUMULOS O CONGLOMERADOS ESTELARES. — Las estrellas no siempre aparecen aisladas, existiendo regiones de la esfera celeste donde pueden verse a ojo desnudo, o telescópicamente, grandes aglomeraciones de tales astros, la mayor de todas ya estudiada en el párrafo 67, bajo el nombre de Vía Láctea, o Camino de Santiago.

Dentro de este gran conjunto de astros, o en sus inmediaciones, aparecen grupos numerosísimos de estrellas, tan apiñadas, que sólo en contados casos la vista puede desdoblar a algunos de sus integrantes, requiriéndose casi siempre la ayuda de poderosos telescopios para darse cuenta que aquello que en un principio parece una tenue luminosidad, es en realidad un verdadero enjambre de estrellas. A estas condensaciones de astros, casi siempre invisibles a simple vista, se les denomina conglomerados estelares o cúmulos (figura 247).

Los cúmulos visibles a ojo desnudo, ya eran conocidos por el hombre desde tiempos muy remotos, siendo varios los poetas de la antigüedad griega que citan a las *Pléyades* y las *Hyadas*, hablándonos también HIPARCO y TOLOMEO de otros dos cúmulos importantes, el de *Praesepe* y el de la constelación de *Perseo*, no resolubles en estrellas a simple vista.

El hecho de que la gran mayoría de estos conglomerados no se resuelvan a ojo desnudo, ha dado lugar a que durante mucho tiempo se confundieran los cúmulos y las nebulosas, clasificándose a aquéllos entre éstas, hasta que, con el descubrimiento del anteojo, se hizo un distingo entre los unos y las otras, si bien agrupando a ambos bajo la denominación general de nebulosas, de las cuales a las que se resuelven en estrellas ante la potencia de los instrumentos de óptica, se las llamó *reductibles*, para diferenciarlas de las *irreductibles* o no resolubles. Como se comprenderá, a medida que fueron perfeccionándose los medios de observación, muchas de las llamadas nebulosas irreductibles, pasaron a la categoría de reductibles, o cúmulos, por haberse comprobado su carácter de aglomeraciones estelares.

Como los descubrimientos de cúmulos y nebulosas fueron haciéndose paralelamente, ambas categorías de objetos celestes tienen una historia común, agrupándose en los mismos catálogos.

PEIRESC, en 1610, descubrió la nebulosa de Orión y dos años después SIMÓN MARIUS la de Andrómeda, pero quien más se distinguió en la búsqueda de estas formaciones fué MESSIER, que publicó dos catálogos



Fig. 247. — Región del cúmulo estelar del Escudo de Sobieski en la Vía Láctea.
Exposición 4h30m. (Del catálogo de Barnard).

en 1771 y 1777, que contenían más de 100 entre cúmulos y nebulosas, a los cuales se les sigue designando con los números que aquél les asignara, precedidos por su nombre: p. ejem., *Messier 13* es el importante cúmulo visible en la constelación de *Hércules*. Posteriormente W. HERSCHEL, estudia y descubre otras muchas de estas formaciones, a punto tal que en 1802 ya tiene una lista de más de 2.000, casi todas descubiertas por él. Su hijo JOHN continúa sus estudios trasladándose al Cabo de Buena Esperanza, desde donde descubre otros muchos del cielo austral publicando tres catálogos, de los cuales el último, "GENERAL CATALOGUE", contiene 5.097, estando comprendidos en este número, cúmulos y nebulosas. De los mismos, son visibles a simple vista, siempre que se conozca bien la ubicación, unos 20.

Aplicando un equipo fotográfico a un pequeño telescopio, se obtienen fotografías de cúmulos y nebulosas donde aparecen los menores detalles de estas interesantes formaciones celestes. En la actualidad lo más corriente es designarlas por el número que les asigna el "NEW GENERAL CATALOGUE", p. ejem., N. G. C. 3.523.

En lo que sigue, llamaremos cúmulo o conglomerado estelar, a aquellas formaciones que pueden ser resueltas en estrellas, total o parcialmente, por los medios ópticos más potentes al alcance del hombre. Se caracterizan las estrellas de un cúmulo, con respecto a otras que aparecen casi sobre el mismo rayo visual, en que las primeras están ligadas físicamente por un movimiento de conjunto, del cual no participan las últimas.

Los casos de dudas entre cúmulos y nebulosas, son resueltos en la actualidad, en última instancia, por el espectroscopio, puesto que las últimas presentan en su espectro las rayas brillantes de emisión propias de las masas gaseosas en incandescencia. Las nebulosas en espiral presentan el espectro de absorción característico de los cúmulos, siendo con toda seguridad grandes aglomeraciones estelares, pero se estudian entre las nebulosas en razón de que hasta ahora no se ha podido separar, en la mayoría de los casos, a las estrellas integrantes.

* 310. COORDENADAS GALACTICAS. — Opinaba HERSCHEL, que la base de referencia del Sistema Sideral debía ser la *Vía Láctea*, y en efecto, las coordenadas obtenidas en tal base para las estrellas y demás objetos del Cielo, pueden considerarse como prácticamente fijas durante larguísimos períodos de tiempo.

La parte media de la *Vía Láctea* determina, aproximadamente, sobre la esfera celeste un círculo máximo llamado ecuador galáctico (fig. 248); los polos Q y Q' de este círculo son los polos galácticos boreal y austral, respectivamente.

Longitud galáctica del astro A es su abscisa esférica OB referida al ecuador galáctico y a un punto O de origen. Se mide en sentido directo.

Latitud galáctica es su ordenada esférica AB.

En cuanto a la posición de los polos galácticos Q y Q', el primero o boreal está situado muy próximo a una estrella de 5ª magnitud de la *Cabellera de Berenice*, y el Q' en la constelación del *Escultor*.

Según el Observatorio de Harvard, las coordenadas ecuatoriales del polo boreal (principal) Q , son:

$$\alpha = 180^{\circ} \quad ; \quad \delta = 28^{\circ}.$$

Como punto O de origen de las longitudes galácticas, el Congreso Internacional Astronómico reunido en 1925 en Cambridge (Inglaterra), propuso a la estrella *Deneb* de 1^a magnitud que se encuentra casi sobre el ecuador galáctico y además es de muy débil movimiento propio.

311. CUMULOS ESTELARES ABIERTOS. — Los astrónomos clasifican a los cúmulos en dos grupos fundamentales.

19 *Cúmulos abiertos.*

29 *Cúmulos esféricos o globulares.*

Los cúmulos abiertos no tienen límites ni formas determinadas, apareciendo sus estrellas a veces separadas, como en el de las Pléyades (fig. 249), a veces formando conjuntos abigarrados más o menos condensados en sus diversas regiones, como el que puede verse en la figura 247. Estos cúmulos suelen abarcar diámetros aparentes más o menos apreciables.

Las paralajes determinadas hasta la fecha, varias de ellas debidas a los esfuerzos de KAPTEYN y COEBERGH, demuestran las grandes distancias que separan a estos cúmulos del Sistema Solar, contándose entre los más cercanos, los de *Præsepe*, las *Hyadas* y la *Cabellera de Berenice*, cuyas paralajes se estiman en 0",024, 0",023 y 0",012, que corresponden a distancias de 137, 141 y 274 años luz, respectivamente.

Entre las paralajes menores determinadas, se cuentan las de los cúmulos N. G. C. 6.705, y N. G. C. 6.603, que sólo alcanzan a 0",00055 y 0",00031, o lo que es lo mismo, que están alejados de nuestro sistema en 6.000 años luz el primero y en 11.000 el segundo.

312. CUMULOS ESFERICOS O GLOBULARES. — Se diferencian en primer lugar de los cúmulos abiertos, por su forma regular, ya que aparecen ante el anteojo como aglomeraciones de estrellas dispuestas en un espacio esférico o elipsoidal (fig. 250). HERSCHEL conocía 83 de estas formaciones y en la actualidad se tienen catalogadas algo más de un centenar.

El número de estrellas contenidas en estos cúmulos es muy grande, calculándose para el N. G. C. 5.272, unas 40.000, y para

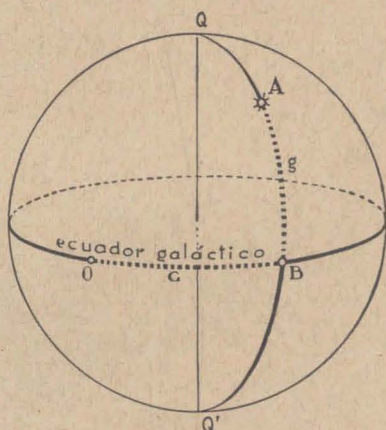


Fig. 248. — Coordenadas galácticas.

el Messier 5 de Libra, 100.000, aun cuando los números obtenidos deben ser en mucho inferiores a los reales, si se tiene en cuenta que los más grandes telescopios, como el de Mount Wilson, no per-

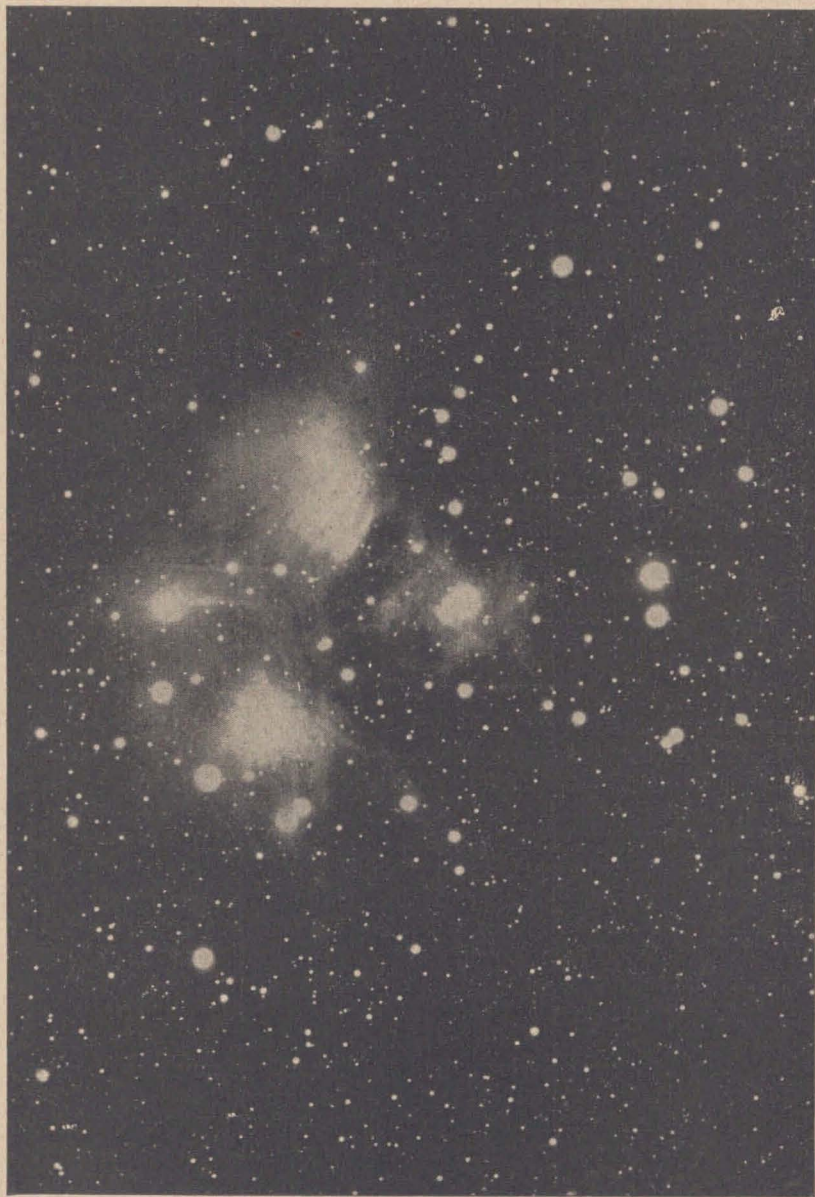


Fig. 249. — Cúmulo estelar abierto y nebulosa difusa de las Pléyades en la constelación del Toro. (Del catálogo de Barnard).

miten la observación de estrellas con brillos inferiores a las magnitudes 21^a ó 22^a .

En cuanto al brillo aparente de los conglomerados esféricos, varía entre la magnitud 5,8, apreciable a simple vista para el cúmulo N. G. C. 6.202, y la magnitud 10,5 que corresponde al N. G. C. 6.760.

Las dimensiones de los cúmulos globulares, son sencillamente grandiosas, ya que el diámetro del mayor (N. G. C. 5.272) equivale a 15 millones de veces la distancia Sol-Tierra, es decir, a unos 2.200 billones de kilómetros, empleando el rayo luminoso en recorrer tal distancia alrededor de 240 años.



Fig. 250. — Fotografía del cúmulo globular del Tucán, obtenida por el astrónomo M. Dartayet desde el Observ. de Córdoba con 1 hora de exposición. (5 setiembre de 1939).

* 313. **SISTEMA LOCAL.** — Las estrellas principales de las constelaciones que observamos en el Cielo en todas direcciones, pertenecen posiblemente a un cúmulo estelar del cual el Sol es solamente uno de los componentes. Este cúmulo no se diferenciaría esencialmente de los otros que observamos en la Vía Láctea, pues su diferencia de aspecto provendría únicamente de que a este último lo observamos desde su interior. Estadísticamente se encuentra que sus estrellas están distribuidas formando una especie de lente cuyo plano central estaría inclinado con respecto al plano galáctico en 12° . Se ha sugerido que este cúmulo, al cual se denomina *sistema local*, sea simplemente resultado de una ilusión óptica aun cuando parece indudable que en las cercanías de nuestro Sol la agrupación de estrellas es muy densa.

NEBULOSAS

314. **CLASIFICACION DE LAS NEBULOSAS.** — El grupo de las nebulosas comprende a todas aquellas formaciones celestes que no han podido ser resueltas en estrellas. Muchas de ellas se suponen

constituídas por enormes aglomeraciones de gases y polvo cósmico, no siendo pocos los astrónomos que admiten en tales masas la presencia de numerosos meteoritos para la explicación de ciertos fenómenos observados en ellas.

El análisis espectral demuestra que muchas nebulosas, entre las que adoptan la forma de espiral, son en realidad grandes aglomeraciones de estrellas, análogas a los cúmulos abiertos o conglomerados estelares.

Desde hace mucho tiempo la Uranografía clasifica a las nebulosas atendiendo a sus formas, en *planetarias*, *espirales*, *anulares*, etc.; pero en la actualidad, y para su mejor estudio suele adoptarse la clasificación de HUBBLE, quien las separa en dos grandes clases:

I. NEBULOSAS GALÁCTICAS, pertenecientes a la Vía Láctea.

II. NEBULOSAS EXTRAGALÁCTICAS.

I. NEBULOSAS GALACTICAS

315. A. NEBULOSAS DIFUSAS. — Pueden considerarse tres tipos de nebulosas difusas:

1. PREVALEMENTEMENTE LUMINOSAS.

2. PREVALEMENTEMENTE OSCURAS.

3. CAMPOS NEBULOSOS.

TIPO 1. PREVALEMENTEMENTE LUMINOSAS. — Aparecen en el Cielo como nubes de cierta luminosidad, considerándoselas constituídas por grandes aglomeraciones de moléculas gaseosas y polvo cósmico; irradiado tal vez por las estrellas bajo el efecto de las presiones originadas por la energía radiante. La luminosidad de que están dotadas estas formaciones se debe, en unos casos, a la reflexión de la luz que reciben de estrellas cercanas, y en otros, a fenómenos de *fluorescencia*, análogos a los que ocasionan las auroras polares, y también probablemente las colas cometarias, motivados por radiaciones de carácter luminoso o corpuscular (bombardeo electrónico) de las estrellas más próximas que se comportan en tales casos como *astros excitadores*. En la actualidad se conocen alrededor de 100 nebulosas prevalentemente luminosas con bajas latitudes galácticas. En su configuración suelen presentar filamentos luminosos algo pronunciados y una coloración con tendencia al verde. Los espectros son preferentemente discontinuos, surcados de *rayas brillantes de emisión*, por lo cual se diferencian de otras no pertenecientes a esta clase cuyos espectros son continuos y presentan además una coloración blanca en toda la masa.

Las dimensiones aparentes de las nebulosas del tipo que se estudia, son muy variadas: la de *Orión* (fig. 251), fuera de su núcleo principal situado en la "Espada", se extiende en forma tal que desborda de los límites del enorme cuadrilátero formado por *Rigel*, *Bellatrix*, *Betelgeuse* y *Saiph*, mientras que otras ofrecen diámetros apa-



Fig. 251. — La gran nebulosa de Orión. (Observ. Mount Wilson).

rentes tan inapreciables, que sólo a costa de grandes esfuerzos se las diferencia de las estrellas.

Las nebulosas difusas preferentemente luminosas, están vinculadas a las estrellas cercanas, como en los casos de la de Orión y la que envuelve al grupo de las Pléyades (fig. 249), reflejando la luz que reciben de dichas estrellas. Se tuvo la seguridad de esta vinculación en el año 1912, cuando SLIPHER desde el Observatorio de Lowell, encontró que el espectro de la nebulosa últimamente citada, era el mismo que el de las estrellas que integran ese grupo.

TIPO 2. PREVALENTEMENTE OSCURAS. — El descubrimiento de estas nebulosas a las cuales se asignó particular importancia en los últimos tiempos, es muy reciente. Ya a mediados del siglo XIX, W. HERSCHEL llamó la atención sobre los "vacíos" interestelares

formando contrastes con regiones ricas en estrellas, los cuales "vacíos" parecían guardar una cierta relación con las nebulosas. Los

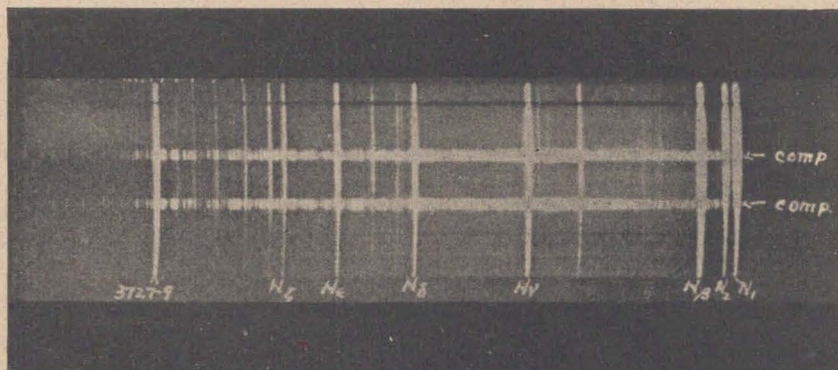


Fig. 252. — Espectro de la nebulosa de Orión. Las flechas señalan los espectros de comparación. (Observ. Lowell).

estudios fotográficos más recientes efectuados por MAX WOLF y BARNARD, demostraron que dichos "vacíos" sólo son aparentes, y se



Fig. 253. — Fotografía de la "Bolsa de Carbón" tomada por M. Dartayet desde el Observ. de Córdoba con 2 horas de exposición. Las dos estrellas brillantes rodeadas del halo fotográfico son α y β de la Cruz. Se ve también en la parte superior cerca del borde de la figura a γ y a la derecha a δ completando la cruz. El norte está hacia arriba. (16 de julio de 1939).

deben a masas absorbentes oscuras o nubes cósmicas, que a modo de pantalla ocultan a las estrellas más alejadas (figs. 253 y 254).

La mayor nebulosa oscura de toda la esfera celeste, es sin duda alguna la comprendida entre las dos ramas en que se divide la Vía Láctea entre las constelaciones del Cisne, en el hemisferio boreal, y el Centauro en el austral, cubriendo un arco de unos 100° de extensión.

SLIPHER y MAX WOLF, han encontrado que ciertas regiones de ese enorme campo oscuro, dan lugar a un débil espectro estelar que demuestra



Fig. 254. — Nebulosa oscura ("Cabeza de Caballo"), sobrepuesta a nebulosidades luminosas de Orión. (Observ. Mount Wilson).

la existencia de materia que refleja, aún cuando con poca intensidad, la luz proveniente de las estrellas. A raíz de tal comprobación, las nebulosas oscuras deben considerarse constituidas por los mismos gases y polvos cósmicos que forman a las luminosas, con la diferencia de que aquéllas no están excitadas como éstas por las radiaciones de estrellas cercanas.

Las mayores nebulosas oscuras están ubicadas en las constelaciones de *Orión*, el *Toro*, *Ofiuco* y *Escorpión*.

TÍPO 3. CAMPOS NEBULOSOS. — En ciertas regiones del Cielo de 2 a 3 grados cuadrados cada una, la esfera celeste parece perder su diafanidad apareciendo como cubierta de pequeñas nubes. **HERSCHEL** encontró 52 de tales regiones, llamadas actualmente campos nebulosos, los cuales fueron muy estudiados por **HAGEN** y fotografiados después por **ROBERTS**.

316. B. NEBULOSAS PLANETARIAS. — Estas nebulosas cuyo número en todo el Cielo es más bien reducido, son formaciones globulares gaseosas, conteniendo en su parte central a un astro de elevada temperatura o *estrella excitatriz*. Según cálculos, en la mayor parte de los casos, este astro central o *núcleo* de la nebulosa, debe tener una temperatura de 40.000 a 50.000 grados centígrados en su superficie.

Dado el pequeño número de nebulosas planetarias existentes en



Fig. 255. — Nebulosa anular de la Lira. (Observ. Mount Wilson).

todo el Cielo, se admite que sean fases excepcionales de la vida de ciertas estrellas.

Atendiendo al aspecto ofrecido por las nebulosas planetarias, se clasifican en 3 grupos:

a) NEBULOSAS ANULARES, con aspecto de anillo más o menos luminoso, cuyo brillo decae hacia la parte central que aparece oscura (figura 255).

b) NEBULOSAS PLANETARIAS PROPIAMENTE DICHAS, donde el disco aparece iluminado casi uniformemente, ofreciendo en muchos casos el aspecto de un planeta de lo cual proviene su nombre (fig. 256).

c) ESTRELLAS NEBULOSAS, que aparecen como astros envueltos en una tenue aureola (fig. 257).

Los astrónomos creyeron antes, que las nebulosas anulares eran realmente formaciones en forma de anillo, y por consiguiente con

un hueco privado de materia en su parte central; pero, en realidad son como las demás nebulosas planetarias, es decir, objetos más o menos esféricos con mayor luminosidad en la periferia que en la parte central.



Fig. 256. — Nebulosa planetaria en los Gemelos. (Observ. Mount Wilson).

La ubicación de tales nebulosas en la Vía Láctea se explica ampliamente por los valores obtenidos para sus paralajes que en término medio es de $0''.0007$ correspondiente a 5.000 años luz.

El diámetro medio calculado por ANDERSON para las nebulosas planetarias, parece ser igual a 110.000 veces la unidad astronómica, ocu-



Fig. 257. — Estrella nebulosa de los Gemelos. (Observ. Mount Wilson).

pando en consecuencia volúmenes fantásticos, a pesar de que las masas en término medio sólo alcanzan a ser unas 200 veces superiores a la del Sol. En tales condiciones, la densidad media correspondiente a las nebulosas planetarias sería igual a una trillonésima parte de la del Sol, siendo en consecuencia del mismo orden que la ya vista para las nébulas difusas.

317. FORMA Y DIMENSIONES DE LA GALAXIA. — Los miles de millones de estrellas reveladas por los instrumentos modernos forman parte de un inmenso sistema al cual pertenece nuestro Sol. Ese sistema es el de la *Vía Láctea* o Galaxia, cuya forma ya determinada por W. HERSCHEL es la de una inmensa lente biconvexa de unos 100.000 años luz de diámetro y cuyo grosor se calcula en unos 5.000 años luz.

La figura 258 muestra un esquema de nuestro sistema galáctico. Se comprende que estando nosotros en el interior del mismo, vere-

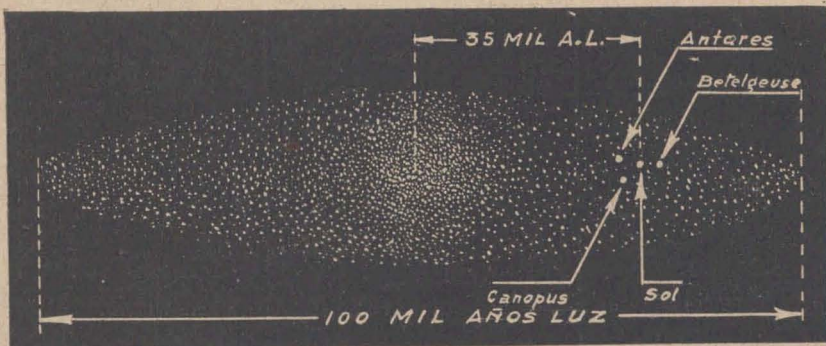


Fig. 258. — Posición del Sol en la Galaxia.

mos mayor acumulación de estrellas sobre el plano ecuatorial de la galaxia que aparece cortando a la esfera celeste por la región media de la Vía Láctea. El centro de nuestro sistema galáctico se encuentra en la dirección de Sagitario que es la región más densa de la Vía Láctea.

* **318. ROTACION DE LA GALAXIA.** — Hacia el centro de nuestro sistema galáctico la densidad estelar va aumentando y de no existir un movimiento de rotación, por la acción gravitatoria, todas las estrellas deberían "caer" hacia ese centro. Por lo tanto, apenas W. HERSCHEL puso de manifiesto la estructura de ese sistema, se sospechó en un movimiento de rotación de todo el conjunto, que, sin embargo, recién pudo ser puesto de manifiesto en estos últimos años.

Claro está que la rotación de la Galaxia no se lleva a cabo en la forma en que lo haría una rueda rígida. Las estrellas más cercanas al centro cumplen su revolución en un tiempo menor que las más alejadas, de acuerdo a la tercera ley de Kepler. Nuestro Sol y las estrellas vecinas, cumplirían una rotación completa en sentido retrógrado en unos 250 millones de años, estando animados de una velocidad próxima a los 300 kilómetros por segundo. El hecho de que nuestro Sol, lo mismo que las estrellas más próximas se desplazan a igual velocidad, fué justamente lo que hizo dificultoso poner de

manifiesto la presentida rotación. No debe confundirse este movimiento del Sol con el ya estudiado hacia el Apex; este último es comparativamente insignificante (20 kilómetros por segundo) y se trata de un desplazamiento con respecto a la posición media de las estrellas cercanas.

II. NEBULOSAS EXTRAGALACTICAS

319. NEBULOSAS EXTRAGALACTICAS: CLASIFICACION.

— Según lo que acabamos de estudiar en párrafos anteriores, las nebulosas galácticas son conglomerados de gases y polvo cósmico probablemente con numerosos uranolitos en el interior de sus masas; las extragalácticas, en cambio, son formaciones constituidas por



Fig. 259. — Grupo de nebulosas galácticas y extragalácticas. (Observ. Yerkes).

millones y millones de estrellas, entre las cuales aparecen entremezcladas numerosas variables del tipo de las cefeidas (295) y también estrellas novas (298).

Se las agrupa en dos tipos o clases que sólo difieren por la mayor o menor regularidad de sus formas:

A. NEBULOSAS EXTRAGALÁCTICAS REGULARES.

B. NEBULOSAS EXTRAGALÁCTICAS IRREGULARES.

Las del tipo A, el más importante, y que reúne el 97 % de estas nebulosas, se ponen de manifiesto por sus figuras más bien geométricas presentándose como núcleos en forma de elipsoides de revolución achatados o mejor aun de lente biconvexa, de los cuales emergen, en la gran mayoría de los casos, dos brazos que se encorvan en espiral.

320. GENERALIDADES RELATIVAS A LAS NEBULOSAS EXTRAGALACTICAS. — De estas lejanas formaciones celestes, sólo cuatro son visibles a simple vista, de las cuales las dos *nubes* (o *Nubéculas*) de *Magallanes* pertenecen a la categoría de las irre-

gulares, y las dos restantes situadas en *Andrómeda* y el *Triángulo* a la de las regulares, siendo estas últimas las más conocidas de las nebulosas en espiral, sobre todo la primera (fig. 260).

SEARES calculó que en todo el Cielo existen unas 300.000 nebulosas extragalácticas con brillo superior a la magnitud 18,6, de las cuales 170.000 están ubicadas al norte de la Vía Láctea y las restantes al sur. Las más pequeñas, que probablemente son también las más



Fig. 260. — La gran nebulosa espiral de Andrómeda. (Observ. Yerkes).

lejanas, presentan en su color una cierta tendencia hacia el rojo, siendo por lo general el núcleo de coloración más acentuada que los brazos en espiral, atribuyéndose ello a una mayor evolución de las estrellas que forman dichos brazos, con respecto a las que constituyen el núcleo, las cuales serían estrellas en formación, rojas o anaranjadas, en su proceso evolutivo ascendente.

La fotografía moderna a larga exposición, ha alcanzado tal perfeccionamiento, que por su intermedio se ha conseguido resolver en estrellas los brazos, y aun ciertas porciones de la periferia del núcleo, de varias nebulosas extragalácticas, entre ellas las nubes de Magallanes.

Las nebulosas extragalácticas sin brazos, llamadas elípticas (figura 261) y las regiones centrales de los núcleos de las nebulosas en espiral, no han podido hasta ahora desdoblarse en estrellas, pese a los esfuerzos realizados en ese sentido.

Dada la forma lenticular de la mayor parte de las nebulosas extragalácticas (regulares) puede presumirse que todas ellas rotan alrededor de un cierto eje de simetría. MAX WOLF por determinaciones espectrales, comprobó en efecto la rotación de la *nebulosa espiral de la Osa Mayor*, alrededor del menor de sus ejes.

Debido a lo enorme que resultan las distancias que separan a las extragalácticas de nuestro Sistema, los astrónomos han utilizado



Fig. 261. — Nebulosa extragaláctica elíptica en la Virgen. Nótese la gran nube absorbente del centro en forma de aro. (Observ. Yerkes).

para ciertos casos, como unidad de distancia, el *megaparsec*, equivalente a *un millón de parsecs*, o sean 3.260.000 años luz. Entre las más cercanas pueden citarse las *Nubes de Magallanes* a 90.000 años luz; la N. G. C. 6.822 del Sagitario, irregular como las anteriores, a más de 600.000 años luz; la del Triángulo a unos 700.000 años luz, y la de Andrómeda a 900.000 de las mismas unidades. Las más lejanas de las conocidas parecen ser las descubiertas por BAADE en la *Cabellera de Berenice*, para las cuales se ha calculado una distancia de 80 *megaparsecs*, vale decir, unos 260 millones de años luz.

***321. LEY DE HUBBLE.** — La gran mayoría de las formaciones extragalácticas se alejan de nosotros a altas velocidades como si el Universo todo tendiera a expandirse separándose entre sí los diversos Sistemas integrantes.

Las velocidades radiales de las extragalácticas se obtienen por los espectros que presentan (fig. 262), aplicando a los mismos el principio de Doppler.

Como ya se dijo, la gran mayoría de tales formaciones acusan velocidades radiales positivas (en el sentido de alejamiento) controladas por el corrimiento de las líneas espectrales hacia el rojo.

Se ha observado que la *relación de velocidad*, o sea, el cociente entre la velocidad y la distancia, se mantiene poco menos que cons-

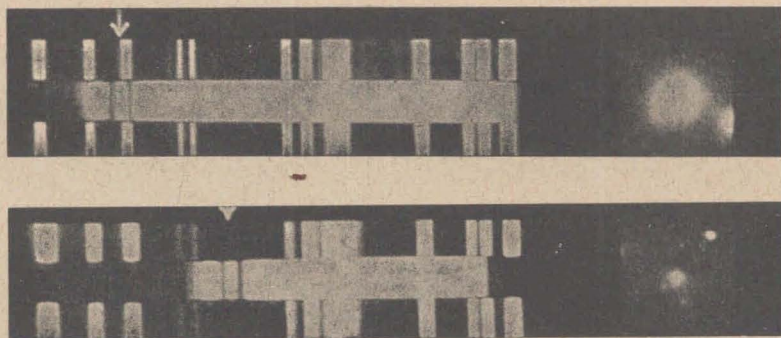


Fig. 262. — Espectro y fotografía (a la derecha), de dos nebulosas espirales. Arriba: N. G. C. 385. Velocidad de alejamiento: 5.000 km. por seg. Distancia: $D = 23$ millones años luz. Abajo: Nebulosa en el cúmulo del León. Velocidad de alejamiento: 20.000 km. por seg. Distancia: $D = 100$ millones años luz. Las flechas indican la posición de las líneas H y K muy corridas hacia el rojo. Las rayas blancas son del espectro de comparación.

tante. De tal constancia es lícito deducir la importante ley que pasamos a enunciar:

La velocidad radial de las nebulosas extragalácticas, es aproximadamente proporcional a sus respectivas distancias a la Tierra. (Ley de Hubble 1929).

El coeficiente de proporcionalidad que resulta de los valores obtenidos es muy cercano a los 600 km./seg. por cada megaparsec, pudiéndose escribir entonces:

$$V = 600 D,$$

donde V es la velocidad radial expresada en km./seg. y D la distancia medida en megaparsecs.

* 322. LOS GRUPOS NEBULARES EXTRAGALACTICOS. —

Muchas nebulosas extragalácticas aparecen agrupadas en ciertas regiones formando *verdaderos cúmulos de nebulosas*, constituyendo por su grandiosidad las formaciones más sorprendentes del Cielo. Cada uno de estos grupos comprende millares de nebulosas extragalácticas que son otros tantos Universos análogos a nuestra Galaxia. Están tan alejados, que sólo los más grandes reflectores modernos logran captarlos en la esfera celeste.

Los más importantes aparecen en las cercanías del polo boreal de la Vía Láctea, en las constelaciones de la Virgen y la Cabellera de Berenice, teniendo por lo tanto altas latitudes galácticas.

El GRUPO NEBULAR DE LA VIRGEN, situado hacia los 71° de latitud galáctica entre las constelaciones de la Virgen y la Cabellera de Berenice, es el más importante de los conocidos, conteniendo entre sus miles de nebulosas integrantes a las que llevan los nombres de las constelaciones citadas (N. G. C. 4.254 y N. G. C. 4.321, respectivamente), y a 16 de las 34 nebulosas extragalácticas del catálogo de MESSIER.

323. GALAXIA Y NEBULOSAS ESPIRALES. — Si alguna estrella, de los millones existentes en la nebulosa de Andrómeda, tuviera un planeta análogo al nuestro, habitado por seres parecidos al hombre, desde allí verían a nuestro sistema galáctico en forma parecida a como nosotros vemos aquella nebulosa.

Sobre la identidad entre nuestra Galaxia y las nebulosas espirales no puede ya haber duda alguna: las dimensiones son del mismo orden de magnitud, nuestra Galaxia rota lo mismo que aquéllas, el



Fig. 261. — Nuestra Galaxia y Andrómeda.

número de cúmulos globulares tributarios de nuestra Galaxia y catalogados hasta la fecha (alrededor de 100) es del mismo orden de magnitud que los hallados en M. 31 de Andrómeda por HUBBLE en 1932, donde alcanzó a contar 140. Sin duda alguna, si no fuera por las nebulosas oscuras de nuestra Vía Láctea, el número de cúmulos que percibiríamos sería mayor.

En la figura 261 se ha representado en escala de distancias a nuestra Galaxia, a las nubes de Magallanes M y a la nebulosa de Andrómeda.

CAPITULO QUINTO

COSMOGONIA

* 324. **COSMOGONIA.** — La Cosmogonía (del gr. Kosmogonia, de Kosmogonos; de Kosmos, mundo, y gignomai, ser, producirse) es la ciencia que estudia el génesis del Universo, abarcando las hipótesis y teorías que tienden a explicar su evolución en el espacio y en el tiempo.

Desde las épocas más remotas el hombre ha forjado variadas hipótesis sobre el origen del Mundo, muchas de ellas de carácter fantástico, como la de los hindúes que lo atribuyen al dios BRAHMA, quien sentado en profunda meditación desde miles de años antes sobre una hoja de loto, lo forma al fin de un inmenso huevo, dentro del cual ubica a la Creación entera. Así como ésta, van apareciendo sucesivamente otras hipótesis cosmogónicas, surgidas de las religiones primitivas las unas, y de meditaciones filosóficas las otras. Entre estas últimas, en tiempos relativamente modernos, la imaginación del hombre ha elaborado algunas, no carentes tal vez de un fondo de verdad, pese a la falta de cimentación científica, y a los necesarios espejismos acarreados por el vuelo del pensamiento. Pueden citarse como dignas de consideración a este respecto, las de DESCARTES, LEIBNITZ y BUFFON.

* 325. **EL CAOS PRIMITIVO.** — Del estudio de las estrellas, puede preverse, que tales astros aparecen en su período de formación como masas nebulosas más o menos sujetas a las leyes físicas encontradas por el hombre. Pero, es de presumir que tal estado nebuloso del astro al comienzo de su vida propia, debió estar precedido por otros de gestación, cuando su propia materia, muy difusa, formó parte de abigarradas y extensas nébulas que formaban verdaderas masas caóticas.

Remontándonos entonces al origen del Universo, debemos admitir para ulteriores especulaciones sobre la formación de los mundos que lo integran, la existencia de tales masas solicitadas por fuerzas que provocando en ellas los más complejos movimientos, acabaron por separar definitivamente las unas de las otras, dando lugar a un gran número de nebulosas que se distribuyeron en el espacio hasta ocupar las posiciones con que las percibimos en la actualidad. Una de esas formaciones habría originado nuestro sistema galáxico, y las otras los numerosos universos extragalácticos estudiados en el capítulo relativo a las nebulosas.

Por otra parte, cada universo, por condensaciones progresivas, ha ido, y sigue, formando sus propios astros en un lento proceso

de transformación de su materia, hasta alcanzar el estado con que se presenta a la observación del hombre en el momento actual. (Véase parágrafo 307).

HIPOTESIS COSMOGONICAS

* 326. **HIPOTESIS DE KANT.**— El primer filósofo que funda una hipótesis cosmogónica partiendo de la nebulosa primitiva, es MANUEL KANT (1724-1804).

Su hipótesis se apoya en la constitución del Sistema Solar y en la atracción newtoniana. Observa KANT dos hechos sugestivos en nuestro Sistema: 1º Que los 6 planetas y 9 satélites conocidos en su tiempo, describen todos órbitas aproximadamente circulares alrededor del Sol, en el sentido en que se verifica la rotación de este astro, y que además, los planos de las órbitas planetarias coinciden sensiblemente con el plano ecuatorial del Sol. 2º Que el espacio en que se mueven los planetas es vacío, pues en caso de contener alguna materia no se la podría considerar como tal por su insignificante densidad, ya que su acción sobre los movimientos planetarios no se manifiesta en forma alguna. Es de suponer entonces, para obtener una trabazón entre ambos hechos, que en un principio hubo de haber una vinculación material entre los integrantes del Sistema Solar, constituyendo un todo inicial que sería la nebulosa primitiva.

Las sustancias que forman el Sol, los planetas, satélites y cometas, en su estado elemental, opina Kant, debieron en un principio llenar todo el espacio interplanetario sin existir todavía en su masa ninguna forma sólida. Por condensaciones sucesivas se fué formando un núcleo atrayente central, el Sol, envuelto todavía en una gran masa nebulosa, cuyas partículas no podían seguir movimientos rectilíneos dirigidos hacia el núcleo, debido a la "*elasticidad de la materia*" interpuesta entre ellas, y a los choques de las unas con las otras. De este modo dichas partículas debieron seguir necesariamente trayectorias curvas, formando remolinos que actuando sobre el núcleo central, o sea el Sol, imprimieron a éste un movimiento rotatorio. Pero muchas de las partículas, aun participando en el movimiento común de las otras, no alcanzaron a incidir sobre la masa atrayente nuclear, debido a continuos choques con otras, dando lugar a condensaciones parciales, que originaron después la formación de otros cuerpos de diversas dimensiones, que serían los planetas, los cuales, en consecuencia, debieron moverse en el mismo sentido en que rotaba el núcleo central y en planos coincidentes con el ecuador del mismo.

En cuanto a la formación de los satélites, se explicaría en una forma en un todo análoga.

* 327. **HIPOTESIS DE LAPLACE.**— De todas las hipótesis relativas al origen de nuestro Sistema Solar, formuladas hasta hace pocos años, la de mayor validez científica fué la concebida por PEDRO SIMÓN, MARQUÉS DE LAPLACE (1749-1827) célebre geómetra, astrónomo y físico que descolló en Francia a principios del siglo XIX. Para LAPLACE, lo mismo que para KANT, el hecho de moverse todos los planetas y satélites conocidos en su tiempo, en el sentido directo igual al de la rotación solar, no podía ser una mera coincidencia, como tampoco debían serlo las pequeñas inclinaciones y excentricidades de las órbitas descritas por aquellos astros alrededor del Sol. A consecuencia de ello, opina Laplace que la causa originaria de tales "coincidencias", no puede ser otra que la de una nebulosa inicial ani-

mada de un cierto movimiento de rotación que llenaba, en un principio, los espacios interplanetarios. Al irse contrayendo por enfriamiento fué aumentando su velocidad angular de rotación, como consecuencia de la ley mecánica de la conservación del impulso rotatorio. En cierto momento, la fuerza centrífuga en la periferia, al igualar a la atracción ejercida por el núcleo central, dió lugar a un primer desprendimiento de la masa gaseosa externa. La masa desprendida, en virtud del impulso continuó desplazándose alrededor del núcleo central en el mismo sentido de la rotación de éste, no tardando en disponerse según un anillo de forma circular dotado de un movimiento giratorio.

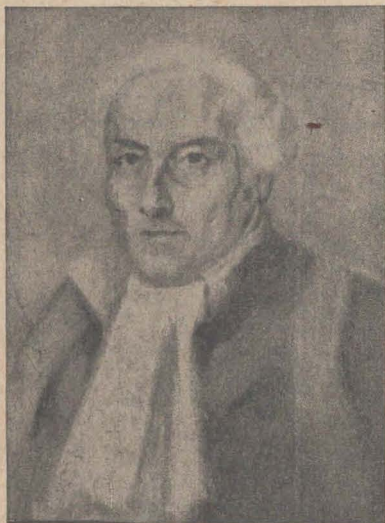


Fig. 262. — Laplace.

El rozamiento entre las partículas del anillo, aceleró el movimiento de las unas y retardó el de las otras, hasta alcanzar todas la misma velocidad, con lo cual el anillo continuó su movimiento giratorio como un todo sólido. Durante este proceso, el núcleo central seguía condensándose cada vez más, hasta que nuevamente, en su periferia, la fuerza centrífuga igualando a la atracción del centro, originó un nuevo desprendimiento formándose un segundo anillo concéntrico con el primero y ubicado entre éste y el núcleo. De este modo la masa nebular incandescente que llenaba el espacio interplanetario, se dispuso según una serie de anillos gaseosos todavía incandescentes, moviéndose todos

ellos en el sentido de rotación del núcleo central o sea el Sol. Con el transcurso del tiempo, las masas anulares por enfriamientos sucesivos, van dando lugar a condensaciones en sus regiones más densas produciéndose en ellas un proceso de solidificación y formándose núcleos parciales que van aumentando a expensas de los materiales gaseosos de los anillos. Con ello, los distintos anillos van adquiriendo densidades muy desiguales en sus diversas regiones, con lo cual cada uno acaba por fraccionarse en porciones de distintos tamaños que siguen moviéndose alrededor del Sol en el mismo sentido en que lo hacían los anillos. Si se supone ahora, que una de las porciones de cada anillo tuviera el grandor necesario como para reunir por atracción a todas las demás, quedaría explicada la formación de los planetas, que en un principio no serían más que otros pequeños soles envueltos todavía en atmósferas incandescentes de espesor más o menos considerable. Del mismo modo que lo ya visto para la atmósfera del Sol, las de los planetas dieron lugar a la formación de otros anillos que por procesos análogos se convirtieron en satélites.

La persistencia del anillo de Saturno en contradicción con la hipótesis expuesta, la explica Laplace, suponiendo que uno de los primitivos anillos del planeta nombrado, resultó tan homogéneo en toda su extensión, que las condensaciones de sus distintas partes dieron lugar a corpúsculos cuyas fuerzas mutuas de atracción fueron insuficientes para reunirlos, con lo cual no varió su forma.

Además concibe LAPLACE en la atmósfera solar, la existencia de materia tan poco densa, que no alcanzó a condensarse como la que dió lugar a los anillos planetarios. Esa materia diseminada alrededor del Sol, y dotada de un movimiento giratorio de conjunto en torno de ese astro, es la que da lugar a la luz zodiacal.

En cuanto a los cometas, los considera Laplace como pequeñas nebulosas que se desplazan de un sistema sidereal a otro, y que se forman por condensaciones de la tenue materia esparcida en el espacio. Estos astros, penetrando en el campo de atracción solar, son obligados por fuerzas que emanan del Sol, a seguir trayectorias elípticas o hiperbólicas con todas las inclinaciones y excentricidades posibles.

* 328. **OTRAS HIPOTESIS COSMOGONICAS.** — Posteriormente a Laplace y hasta nuestros días, se han confeccionado otras numerosas hipótesis, la mayor parte de ellas tendientes a perfeccionar o completar a aquella. Entre ellas damos los detalles más salientes de algunas dignas de consideración:

PICKERING y STRATTON. — Suponen que las rotaciones de planetas y satélites fueron en un principio retrógradas y que por efectos de las mareas cambiaron de sentido.

LOCKYER y SEE. — Opinan que el Sol, y demás astros de su sistema, pueden haberse formado a expensas de nubes de meteoritos captados por un núcleo central, y otros núcleos secundarios.

POINCARÉ y DARWIN. — Estudian las formas que debe adquirir una masa gaseosa de forma esférica e inicialmente homogénea en el supuesto de que siga siéndolo durante su rotación. Han demostrado a este respecto que la masa se achata hasta tomar la forma de un elipsoide de revolución, convirtiéndose a continuación en otro a tres ejes desiguales. Continuando el movimiento, el todo adquiere la forma de una pera, y más tarde la de una ampollita o reloj de arena, cuyo cuello se va adelgazando hasta romperse y dar lugar a dos masas parciales sensiblemente esféricas.

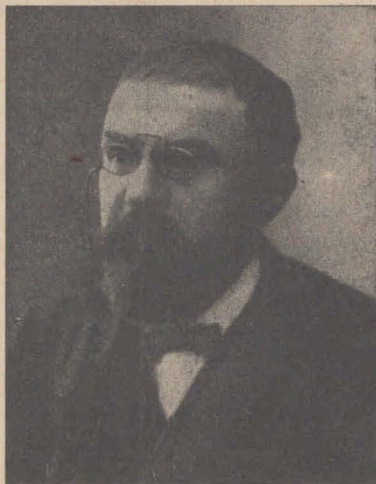


Fig. 263. — H. Poincaré.

Esta teoría, ajena en un todo a la formación del Sistema planetario, puede dar una idea acerca de como se forman los sistemas de estrellas dobles y hasta podría explicar la formación de la Luna como un desprendimiento de la masa terrestre cuando aun se hallaba al estado gaseoso.

* 329. HIPOTESIS DE JEANS. — Según este autor, la historia de nuestro sistema planetario sería la siguiente: Hace más de dos mil millones de años, por puro azar, pasó por las cercanías de nuestro

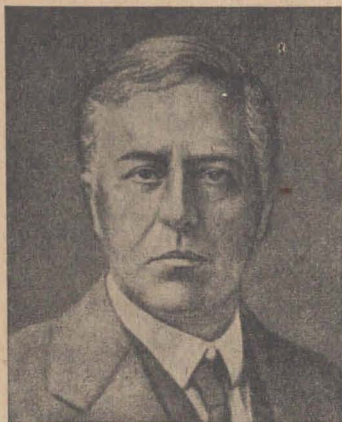


Fig. 264. — James Jeans.
Nacido en 1877.

Sol, que entonces no tenía séquito alguno de planetas, otra estrella mucho más grande que aquél. Se produjo entonces en la superficie solar una especie de marea, de dimensiones colosales. A medida que la estrella causante del fenómeno se iba acercando, surgía de la superficie solar, algo así como un inmenso brazo que se agrandaba, dirigiéndose por la acción gravitatoria hacia la otra estrella. Esta debía tener con respecto al Sol una velocidad muy grande por lo cual después de alcanzar la distancia mínima y recorrer un arco de hipérbola comenzó a alejarse, siendo hoy absolutamente imposible individualizarla. El brazo de materia solar que como una inmensa llamarada se dirigía hacia la

otra estrella fué girando alrededor del Sol siguiendo a aquella en su movimiento, comunicando a su vez a la masa solar, un movimiento rotatorio del mismo sentido.

De esa inmensa lengua gaseosa (fig. 265) que según JEANS habría tenido la forma de un cigarro habano, se fueron formando los planetas a medida que la masa se condensaba. En los comienzos las órbitas de esas "gotas" (*futuros planetas*) aun incandescentes, debían ser elipses muy alargadas que fueron tomando forma circular por la resistencia que encontraban en su movimiento, pues el espacio que rodea al Sol, después de catástrofe semejante, debió quedar lleno de residuos de materia solar, residuos que aun hoy darían origen a las estrellas fugaces y a los cometas.

Los satélites se habrían formado en forma parecida. Cuando los planetas eran aun pequeños soles, por ser sus órbitas muy excéntricas, en el perihelio se acercaban "*peligrosamente*" al Sol, el cual producía en ellos desprendimientos de materia gaseosa que al condensarse originaba los satélites. Según esta teoría los planetas de mayor masa deben ser los más ricos en satélites, pues, por su mayor volumen inicial, los desprendimientos originados en ellos por el Sol debían ser mayores*.

* Respecto a los 10 satélites indicados en la figura para Saturno, véase parágrafo 228.

* 330. FORMACION DE LOS ANILLOS DE SATURNO. FRONTERA DE ROCHE. — ROCHE demostró que si un satélite se acerca demasiado al planeta, hasta llegar a una distancia de tan solo 2,4 radios planetarios, siendo la densidad del planeta y del satélite la misma, éste, por efecto gravitorio debe estallar en pedazos. Este estallido se debe a que las partes del satélite más próximas al planeta deben girar a su alrededor en un tiempo mucho menor que las partes más distantes, de acuerdo a la tercera ley de KEPLER, lo que produce el dislocamiento. Los anillos de Saturno no serían más que restos de satélites, que se acercaron demasiado a la superficie del planeta. Si la Luna se acercara a la Tierra y traspusiera la frontera de ROCHE, se convertiría igualmente en un anillo como los de Saturno. Estos resultados teóricos, son confirmados por el hecho de que las órbitas de todos los satélites conocidos son exteriores a la frontera de Roche

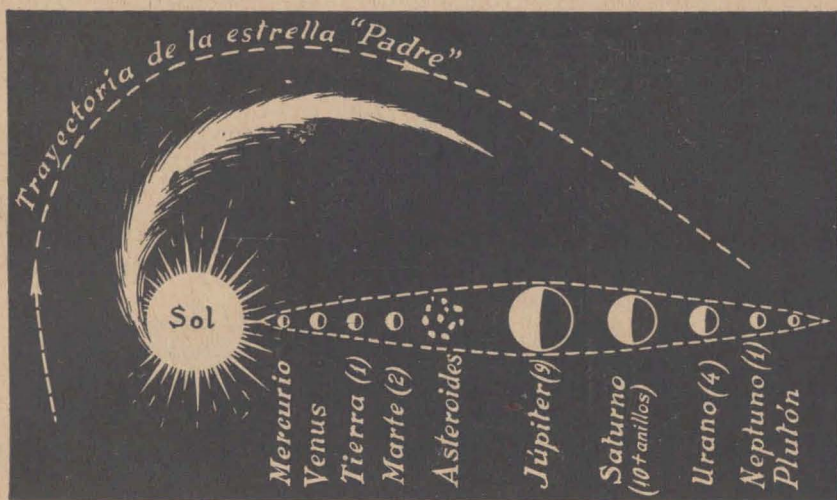


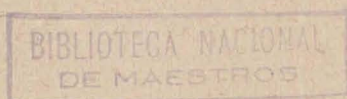
Fig. 265. — Hipótesis de Jeans. (S. D.).

* 331. COMPARACION ENTRE LAS HIPOTESIS DE LAPLACE Y JEANS. LA VIDA EN EL UNIVERSO. — En ambas hipótesis los planetas son desprendimientos de masa solar. En la hipótesis de LAPLACE, este desprendimiento se habría formado al mismo tiempo que el Sol se iba contrayendo y por lo tanto la "edad" de aquél no diferiría mucho de la de la Tierra. Esto contradice los datos que acerca de la vida media de las estrellas pueden deducirse de la evolución estelar.

En la hipótesis de LAPLACE habría que pensar que casi todas las estrellas tienen su cortejo de planetas, en tanto que en la de JEANS la formación de un sistema planetario sería un acontecimiento

rarísimo. Sin embargo, aun admitiendo con JEANS que la probabilidad de un tal acontecimiento es sólo de uno sobre cien mil, calcula LABÉRENNE, teniendo en cuenta los millones de estrellas que hay en los millones de Galaxias que existen en el Universo hasta ahora explorado por el hombre, no menos de diez mil millones de sistemas planetarios análogos al nuestro. Es pues posible que existan millones de planetas pertenecientes a diversas estrellas, en los cuales las condiciones reinantes sean parecidas a las de la Tierra, no siendo entonces ilógico pensar que en muchos de ellos puedan existir seres como nosotros.

Agregaremos que actualmente la hipótesis de Jeans es la que aceptan en general los astrónomos versados en la materia.



APENDICE

—

TRIANGULO DE POSICION

El triángulo esférico cuyos vértices son el Cenit z , el Polo Norte celeste P_n y el astro A (fig. I), constituye el llamado triángulo de posición. Los lados del triángulo tienen los valores:

$$P_n z = 90 - \varphi \quad ; \quad P_n A = 90 - \delta \quad ; \quad A z = 90 - h;$$

siendo φ la latitud del lugar que por convención se considera positiva si es boreal y negativa si es austral; δ la declinación del astro para la cual vale la misma convención y finalmente h sería la altura del mismo. En cuanto a los ángulos tienen los valores:

$$z = 180 - a \quad ; \quad P_n = t \quad ;$$

donde a y t son el azimut y el ángulo horario respectivamente. Al ángulo en A se le denomina ángulo paraláctico.

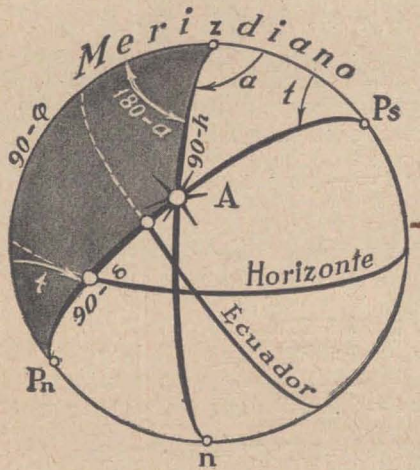


Fig. I. — Triángulo de posición.

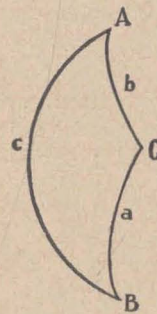


Fig. II. — Triángulo esférico.

Recordemos las fórmulas fundamentales de la trigonometría esférica aplicables a un triángulo cualquiera (fig. II). Ellas son:

$$\begin{aligned} \cos a &= \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A; \\ \sin a \sin B &= \sin b \sin A; \\ \sin a \cos B &= \cos b \sin c - \sin b \cos c \cos A. \end{aligned} \quad [1]$$

Haciendo en estas fórmulas:

$$\begin{aligned} a &= P_n A = 90 - \delta & ; & \quad b = A z = 90 - h & ; \\ c &= P_n z = 90 - \varphi & ; & \quad A = 180 - a & ; \quad B = t & ; \end{aligned}$$

y recordando que:

$$\begin{aligned} \cos (90 - \alpha) &= \sin \alpha & ; & \quad \sin (90 - \alpha) = \cos \alpha & ; \\ \cos (180 - \alpha) &= -\cos \alpha & ; & \quad \sin (180 - \alpha) = \sin \alpha & ; \end{aligned}$$

resulta:

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \sin h \sin \varphi - \cos h \cos \varphi \cos a; \\ \cos \delta \sin t &= \cos h \sin a; & (A) \\ \cos \delta \cos t &= \sin h \cos \varphi + \cos h \sin \varphi \cos a. \end{aligned}$$

El grupo de fórmulas establecido permite hallar las coordenadas ecuatoriales de un astro conociendo sus coordenadas horizontales.

Análogamente, haciendo en el grupo [1]:

$$a = 90 - h & ; \quad b = 90 - \delta & ; \quad c = 90 - \varphi & ; \quad A = t & ; \quad B = 180 - a & ;$$

resulta para las coordenadas horizontales en función de las ecuatoriales:

$$\begin{aligned} \sin h &= \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos t; \\ \sin a \cos h &= \cos \delta \sin t; & (B) \\ \cos a \cos h &= -\cos \varphi \sin \delta + \sin \varphi \cos \delta \cos t. \end{aligned}$$

APLICACIONES. — 1. *Cálculo del ángulo horario de salida o puesta de un astro.* — Si en la primera de las fórmulas (B) hacemos $h = 0$ (el astro en el horizonte), obtenemos:

$$\cos t = -\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi.$$

Calculemos como ejemplo la hora de salida y puesta del Sol durante el solsticio de diciembre en la latitud de 35° Sur. Es $\varphi = -35^\circ$; $\delta = -23^\circ 27'$ con lo cual resulta:

$$\begin{aligned} \log \operatorname{tg} \delta &= 9,63726 & (n) \\ \log \operatorname{tg} \varphi &= 9,84523 & (n) & \quad (n) \text{ significa que} \\ & & & \quad \text{se trata de valo-} \\ \log \cos t &= 9,48249 & (n) & \quad \text{res negativos.} \end{aligned}$$

$$t = 180^\circ - 72^\circ 19' = 107^\circ 41' = 7\text{h}10\text{m}44\text{s}.$$

El Sol saldrá, pues, ese día 7h10m44s antes del mediodía, o sea, a las 4h49m16s, y se pondrá a las 19h10m44s de tiempo solar verdadero.

El azimut de salida o de puesta se calcula igualmente haciendo en la primera fórmula del grupo A, $h = 0$, con lo cual se obtiene:

$$\cos a = -\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}.$$

2. Hallar la declinación y el ángulo horario de un astro cuya altura es $h = 30^\circ$, y su azimut $a = 150^\circ$, siendo la latitud $\varphi = 35^\circ$ Sur. Aplicamos la primera fórmula del grupo A:

$$\begin{array}{ll} \log \operatorname{sen} h = 9,69897 & \log \cos h = 9,93753 \\ \log \operatorname{sen} \varphi = 9,75859 \quad (n) & \log \cos \varphi = 9,91336 \\ \hline & \log \cos a = 9,93753 \quad (n) \\ & \hline & 9,78842 \quad (n) \end{array}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} h \operatorname{sen} \varphi &= -0,28679 & \cos h \cos \varphi \cos a &= -0,61436 \\ \operatorname{sen} \delta &= -0,28679 + 0,61436 = 0,32757 \\ \log 0,32757 &= \log \operatorname{sen} \delta = 9,51530 \\ \delta &= 19^\circ 7' 20''. \end{aligned}$$

Aplicando ahora la segunda fórmula del grupo A, calculamos t :

$$\begin{aligned} \log \cos h &= 9,93753 \\ \log \operatorname{sen} a &= 9,69897 \\ \hline & 9,63650 \\ \log \cos \delta &= 9,98428 \\ \hline & \log \operatorname{sen} t = 9,65222 \\ t &= 26^\circ 40' 40''. \end{aligned}$$

3. En forma enteramente análoga se calcularía la altura y el azimut conociendo la declinación, el ángulo horario y la latitud del lugar, utilizando las fórmulas del grupo B.

4. Hallar la latitud de un lugar desde donde se ha observado un astro de declinación igual a -20° con una altura de 60° y un azimut de 110° . Calcular además el ángulo horario del astro en el instante de la observación.

Comencemos por transformar la primera fórmula del grupo (A) haciéndola calculable por logaritmos, lo que además será útil para resolver ejercicios del tipo de los ya propuestos. Hagamos con ese objeto:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} h &= m \cos M, \\ \cos h \cos a &= m \operatorname{sen} M; \end{aligned}$$

introduciendo el número auxiliar m y el ángulo M . Se tiene así:

$$\operatorname{sen} \delta = m \operatorname{sen} (\varphi - M),$$

siendo:

$$\operatorname{tg} M = \frac{\cos a}{\operatorname{tg} h}.$$

Apliquemos estas fórmulas al caso propuesto.

$$\begin{array}{ll} \log \cos a = 9,53405 \quad (n) & \log \operatorname{sen} h = 9,93753 \\ \log \operatorname{tg} h = 0,23856 & \log \cos M = 9,99169 \\ \hline & \log m = 9,94584 \\ \log \operatorname{tg} M = 9,29549 \quad (n) & \\ M = -11^\circ 10' 10'', & \end{array}$$

Por ser:

$$\begin{aligned} \log \operatorname{sen} \delta &= 9,53405 \quad (n) \\ \log m &= 9,94584 \\ \operatorname{sen} (\varphi - M) &= \frac{\operatorname{sen} \delta}{m}, & \log \operatorname{sen} (\varphi - M) &= 9,58821 \quad (n) \\ & & \varphi - M &= -21^{\circ} 10' 40'' \\ \varphi &= -32^{\circ} 20' 50''. \end{aligned}$$

En cuanto al ángulo horario t se calcula en la forma en que ya se ha visto por la segunda fórmula del grupo (A). En este ejemplo resulta:

$$t = 30^{\circ} = 2 \text{ horas.}$$

Todos estos problemas y muchos otros se pueden resolver aproximadamente con el auxilio de la fig. 38 o con la de la contratapa. Se obtiene con la figura 38 para el 1: $t = 108^{\circ}$.

Para el 2: $\delta = +19^{\circ}$; $t = 26^{\circ}$.

Para el 4 utilizando la figura de la contratapa se hará girar la hoja transparente hasta que el paralelo de -20° pase por el punto para el cual $h = 60^{\circ}$ y $a = 110^{\circ}$. Se observa que ello ocurre cuando el ángulo formado por $P_s P_n$ con el horizonte es de unos 33° ; luego $\varphi = -33^{\circ}$, viéndose también que $t = 30^{\circ}$.

INDICE CRONOLOGICO DE LOS PROGRESOS DE LA ASTRONOMIA

ANTIGÜEDAD

ORIGEN.—Buscar el origen de los primeros conocimientos astronómicos del hombre sería remontarnos al origen de la especie humana, ya que el movimiento diurno del Sol no pudo pasar inadvertido al hombre prehistórico de las cavernas, pudiéndose afirmar otro tanto de la revolución mensual de la Luna con sus distintas fases, y del movimiento de las estrellas en una sola pieza cual si un vínculo material las ligara a todas. Con el andar del tiempo, el ser racional fué tomando conocimiento de otros diversos fenómenos astronómicos, como ser los cambios experimentados por los puntos de salida y puesta del Sol con el correr de los días, los desplazamientos del Sol, la Luna y los planetas entre las estrellas del zodiaco, etc.

LOS CHINOS.—Pueden considerarse los primeros en la confección de un calendario, previsión de eclipses, fijación de fechas para realizar ceremonias religiosas, etc. Para ello se designaban personas especializadas en su incipiente astronomía, pues ya 2.000 años antes de nuestra era se formaban, en ocasiones, tribunales de astrónomos.

LOS CALDEOS.—Determinaron el período SAROS de 18 años 11 días, durante el cual se repiten los eclipses de Sol y Luna. Son los primeros en construir observatorios astronómicos encargados de estudiar los fenómenos del cielo, 1.000 años a. J. C.

LOS EGIPCIOS.—Graban en sus templos los signos del zodiaco y orientan sus pirámides.

ERASTÓSTENES (276-194 a. J. C.).—Trató de medir el tamaño de la Tierra, siendo el primero en tal tentativa. Se dejó morir de hambre.

ARISTARCO (hacia 265 a. J. C.).—Sostuvo el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, e hizo tentativas infructuosas para medir la distancia Sol-Tierra. Más de 17 siglos después, el sistema heliocéntrico de Aristarco de Samos es confirmado por Copérnico.

HIPARCO (190 a 124 a. J. C.).—El más grande de los astrónomos griegos, fundador de la Astronomía matemática. Desarrolló la teoría de los epiciclos, encontró la ecuación del centro (anomalía principal del movimiento lunar); descubrió la precesión y confeccionó el primer catálogo estelar que se perdió después. También determinó los elementos de los movimientos del Sol y la Luna, e introdujo la trigonometría esférica en los cálculos del cielo. Calculó los eclipses, la paralaje de la Luna, la duración del año trópico, la posición del apogeo, la desigualdad de las estaciones, el movimiento medio de los planetas, etc.

TOLOMEO, CLAUDIO.—El más famoso de los astrónomos antiguos por su obra el "*Almagesto*", donde explica el sistema geocéntrico en con-

formidad con las ideas de la época. Sus trabajos se inspiran en la obra de Hiparco. Descubrió la evección, o sea la segunda anomalía del movimiento lunar. Perfeccionó los instrumentos de observación del cielo, y en su "Almagesto" aparece el primer catálogo estelar que se conserva.

EDAD MEDIA

Durante la Edad Media se produce un estancamiento en los progresos astronómicos que había de durar unos 13 siglos. El letargo, es apenas interrumpido por los árabes y uno que otro observador europeo, sin descollar ninguno.

EDAD MODERNA

El hombre es desalojado del centro del Universo por *Copérnico*. *Kepler* enuncia leyes precisas sobre el movimiento de los planetas. *Galileo*, al dar los fundamentos de la "NUOVA SCIENZA" consolida el SISTEMA HELIOCÉNTRICO y se comienza a escrutar el cielo con el ANTE-OJO. *Newton* crea, finalmente, la *Mecánica Celeste* demostrando que los objetos del cielo siguen las mismas leyes mecánicas que los cuerpos de la superficie de la Tierra.

COPÉRNICO, NICOLÁS (19 de febrero de 1473 - 24 de mayo de 1543). — Célebre por su sistema astronómico heliocéntrico, que había de reemplazar algún tiempo después de su muerte al geocéntrico de Tolomeo que imperó durante 15 siglos. Su sistema está expuesto en su obra "*De revolutionibus*" publicada después de su muerte. Fué canónigo de la catedral de Frauenburgo, y sus determinaciones sobre la duración del año sirvieron de base, 70 años después, para introducir en el calendario la reforma gregoriana.

TYCHO - BRAHE (14 de diciembre de 1546 - 13 de octubre de 1601). — Dinamarqués. Tomó fama por un trabajo sobre la nova de 1572. Construyó por sí mismo notables aparatos astronómicos para sus observatorios de la isla Hveen. Su trabajo fundamental lo constituyen las precisas observaciones sobre los movimientos planetarios, que superaron ampliamente a todo cuanto en ese sentido se había hecho hasta entonces, y sirvieron después a *Kepler* para hallar sus célebres leyes. Confeccionó también un sistema astronómico mixto, que no prosperó, tratando de combinar el sistema geocéntrico de Tolomeo con el heliocéntrico de Copérnico.

KEPLER, JOHANNES (27 de diciembre de 1571 - 15 de noviembre de 1630). — Fué ayudante y discípulo de *Tycho - Brahe*, quien lo trató malamente. En su "*Astronomia Nova*" expone sus dos primeras leyes relativas al movimiento planetario. Sus tablas sobre los planetas aparecidas en 1627, fueron utilizadas por todos los astrónomos posteriores hasta principios del siglo XVIII. En cuanto a su tercera ley, se publicó en su obra "*Harmonices mundi libri V*" en 1619. En su vida privada, fué Kepler uno de los hombres más perseguidos por la adversidad.

GALILEI, GALILEO (19 de febrero de 1564 - 8 de enero de 1642). — En 1597 se declara partidario del sistema de Copérnico. En 1609 construyó el anteojó astronómico de su invención y al año siguiente ya había descubierto las montañas de la Luna, cuatro satélites de Júpiter, Io, Europa, Ganymedes y Callixto, además de algunos conglomerados estelares, la "triplezidad" de Saturno, y las fases de Venus. También se atribuye a Galileo

el descubrimiento de las manchas del Sol. En una controversia sobre los tres cometas del año 1618, Galileo sostuvo equivocadamente el origen terrestre de tales astros. Su obra "Diálogo sopra i due Massimi Sistemi del Mondo" concluida en 1629, se publicó en Florencia en 1632.

Por sus ideas sobre la traslación de la Tierra alrededor del Sol, en apoyo del sistema de Copérnico, fué acusado por el dominico *Lorini* en 1615 ante la Inquisición romana, sin mayores consecuencias. Posteriormente al publicar su "Diálogo" en 1632, una comisión de sabios nombrados por el papa Urbano VIII exigió ocho correcciones a la obra, acusando además a *Galileo* por desobediencia a un decreto de 1616, en que se comprometía a no divulgar sus ideas. Después de diversas incidencias fué condenado como culpable de desobediencia imponiéndosele diversas sanciones. Al día siguiente de la condena, obtiene permiso para vivir en el palacio del embajador de Toscana, y posteriormente para trasladarse a Arce tri, donde pasó los últimos 8 años de su existencia.

NEWTON, ISAAC (5 de enero de 1643 - 31 de marzo de 1727). — Su descubrimiento fundamental lo constituye la célebre ley que lleva su nombre, siendo su obra más importante la titulada "*Philosophiae naturalis principia mathematica*", publicada en Londres en 1687. Es el fundador de la Mecánica Celeste, y en su ley gravitatoria se explican las leyes de Kepler, no demostradas anteriormente, la forma de la Tierra, las mareas, la variación de la aceleración de la gravedad con la latitud, la precesión, los movimientos de los cometas, las anomalías en los movimientos de la Luna, la nutación, etc.

HERSCHEL, FRIEDRICH WILHELM (19 de noviembre de 1738 - 29 de agosto de 1822). — En 1774 fabricó por sí mismo el primer telescopio de cierta potencia. El 13 de marzo de 1781 descubrió el planeta URANO. Siguió aumentando las dimensiones de los telescopios reflectores de los cuales construyó muchos para observatorios extranjeros hasta llegar a dar a uno un metro de abertura. Sus trabajos sobre las estrellas fueron publicados en la "Philosophical Transactions".

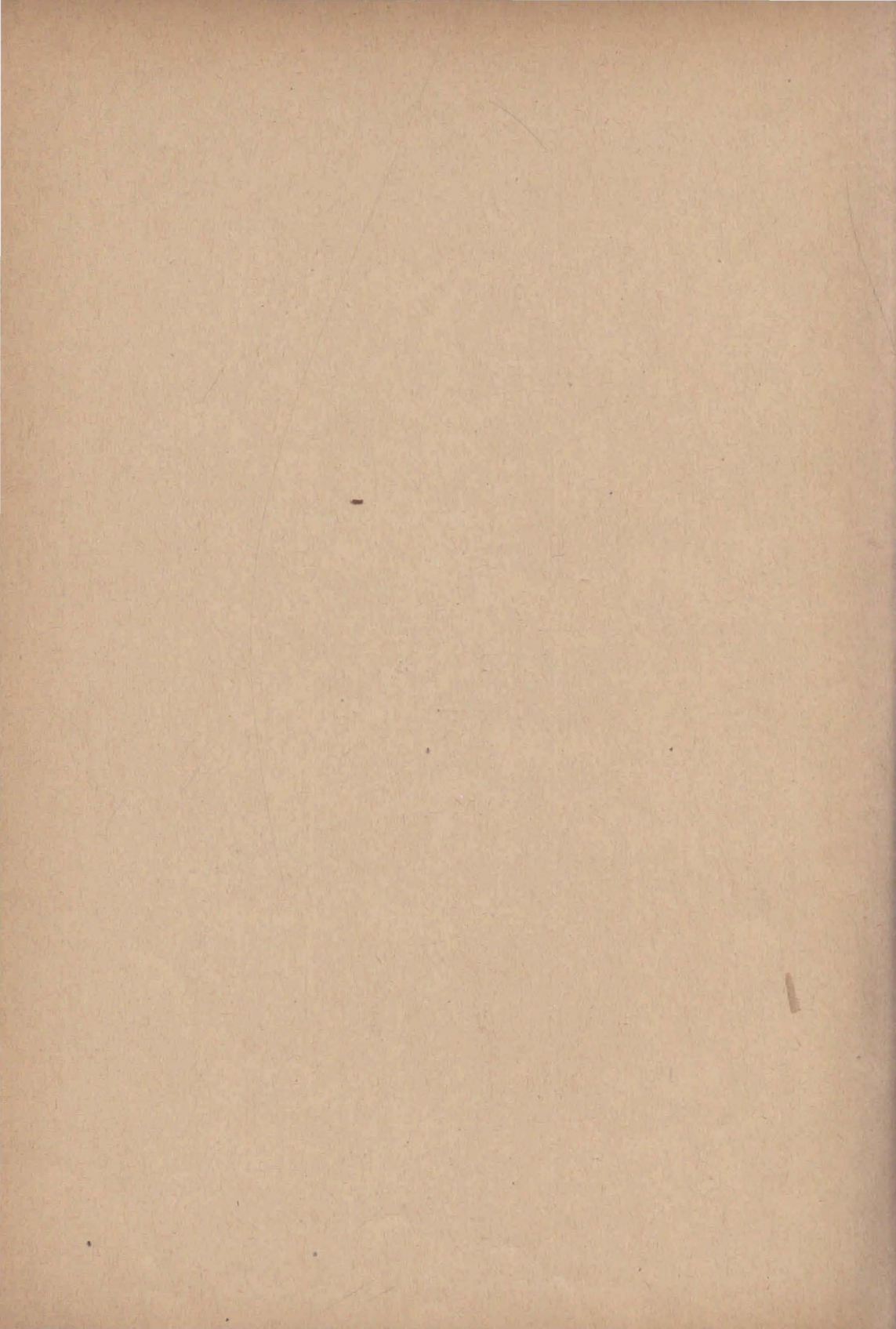
LAPLACE, PIERRE SIMON (13 de marzo de 1749 - 5 de marzo de 1827). — Se le conoce mucho por su célebre hipótesis cosmogónica de la nebulosa primitiva que subsiste en el día. Publicó las obras "*Sistema del Mundo*" y "*Mecánica Celeste*". Descubrió la invariabilidad de los movimientos medios de los planetas.

PERIODO CONTEMPORÁNEO

La Astronomía tiene su época de oro en este período. El hombre se pone en contacto con un Universo cada vez más dilatado ya que sus medios de observación van adquiriendo un desarrollo que sigue un ritmo realmente vertiginoso. Las distancias a numerosos objetos del cielo se miden con singular aproximación en años luz, parsecs y hasta megaparsecs. Surge una nueva ciencia, la *Astrofísica*, que aporta revelaciones trascendentales acerca de la constitución de los astros y demás objetos del cielo y se aplica al estudio de éste la sorprendente sensibilidad fotográfica que permite captar millones y millones de nuevos astros. La Mecánica celeste sigue en franca evolución apareciendo la revolucionaria teoría de la Relatividad de *Einstein* que introduce un cambio fundamental en nuestras concepciones del espacio y del tiempo. Los aparatos de observación alcanzan un desarrollo que supera a todo cuanto pudo preverse al respecto.



I N D I C E S



ÍNDICE DE AUTORES

Los números indican parágrafos; *ap.* apéndice.

A

Adams, 217, 259.
Aguilar, 137.
Airy, 217.
Alfonso X, 207.
Anderson, 207, 316.
Arago, 217.
Aristarco, 123, *ap.*
Aristóteles, 211.
Armellini, 286.
Augusto, 116.

B

Baade, 320.
Barnard, 233, 253, 315.
Bayley, 298.
Bessel, 150, 207, 217.
Biela, 255.
Bond, 238, 243.
Belopolsky, 287.
Benzenberg, 258.
Boss, 232.
Bouvard, 217.
Bradley, 151.
Brahma, 324.
Brandes, 258.
Buffon, 324.

C

Callandreau, 234.
Campbell, 240.
Cannon, 302.
Cassini, 238, 287.
Cavendish, 141.
Celis, 264.
Clairaut, 251.
Clarke, 138.
Coebergh, 311.
Copérnico, 207, 219, *ap.*
Curtis, 304.

D

D'Arrest, 217.
Darwin, 328.

Delambre, 138.
Denning, 258.
Descartes, 324.
Deslandres, 131.
Doello Jurado, 264.

E

Ebert, 188, 192.
Eddington, 295, 308.
Einstein, 126, 218.

F

Encke, 254.
Erastóstenes, 135, *ap.*
Fabricius, 291.
Faye, 128.
Fernel, 137.
Flammarion, 147.
Flamsteed, 282.
Flemming, 217.
Fontanari, 291.
Forbes, 217.
Foucault, 147.
212, 236, *ap.*

G

Galitzin, 287.
Galileo, 67, 128, 182,
Galle, 217.
Gauss, 233.
Gill, 282.
Gould, 58, 282.
Gregorio XIII, 117.

H

Hagen, 315.
Hale, 128, 131.
Halley, 251, 287.
Harding, 233.
Hartmann, 233.
Hayford, 138.
Hecker, 140.
Heig, 258.
Helmert, 138, 139.
Helmholtz, 126.
Hencke, 233.

Heráclito, 206.
Herrero Ducloux, 264.
Herschel, 217, 231,
237, 289, 290, 300,
309, 310, 312, 315,
317, 318, *ap.*
Hertzsprung, 303.
Hevelio, 187.
Hiparco, 374, 75, 101,
123, 206, 282, 309,
ap.
Hubble, 314, 323.
Huggins, 235.
Huygens, 231.

J

Janssen, 128, 131.
Jeans, 329, 331.
Jolly, 216.
Jorge III, 217.
Julio César, 116.

K

Kant, 326, 327.
Kapteyn, 57, 282, 288,
311.
Keeler, 238.
Kempf, 300.
Kepler, 182, 212, 213,
219, *ap.*
Kirchhoff, 130.
Krigar Menzel, 216.

L

Labérenne, 331.
Lagrange, 182, 217.
Lane, 126, 306.
Langley, 125, 280.
Laplace, 182, 238, 327,
331, *ap.*
Lassell, 343.
Leibnitz, 324.
Leverrier, 217.
Liló, 117.
Listing, 140.
Lockyer, 306, 308, 328.

Loewy, 188.
 Lord Kelvin, 126.
 Lowell, 217.
 Lundmark, 299.

M

Maclear, 207.
 Mädler, 231, 287.
 Marius, 309.
 Martínez, 233.
 Maxwell, 238.
 Mayer, 236, 287,
 Mechain, 138.
 Messier, 309.
 Metón, 181.
 Müller, 229, 300.

N

Newcomb, 122.
 Newton, 140, 182, 212,
 214, 219, *ap.*

O

Olbers, 233, 234.

P

Peiresc, 309.
 Piazzzi, 233.
 Pickering, 217, 290,
 292, 302, 304, 328.

Plateau, 147.
 Poincaré, 328.
 Pouillet, 125, 278.
 Puiseux, 188.

R

Respighi, 3.
 Riccioli, 187.
 Richarz, 216.
 Roberts, 315.
 Roche, 330.
 Römer, 236, 287.
 Russell, 125, 304, 306,
 308.

S

Scaliger, 115.
 Scheiner, 128, 129.
 Schiaparelli, 230, 231,
 258, 260.
 Schmidt, 258.
 Schönfeld, 282.
 Schu - King, 5.
 Schülen, 128.
 Seares, 320.
 Secchi, 301, 302.
 See, 328.
 Seeliger, 238, 298.
 Shapley, 295.
 Slipher, 217, 315.
 Spencer Jones, 122.

Stefan, 277.
 Strabón, 181.
 Stratton, 328.
 Struve, 235, 243, 290.

T

Thome, 282.
 Titius, 220.
 Todd, 217.
 Tolomeo, 6, 32, 123,
 134, 205, 206, 207,
 282, 309, *ap.*
 Tycho - Brake, 150,
 211, 213, 298, *ap.*

W

Vogel, 242, 292, 302.
 Weiss, 260.
 Whipple, 299.
 Wien, 277.
 Wild, 230, 235, 237,
 240, 242.
 Witz, 233.
 Wolf, 128, 315, 320.

Y

Young, 132.

Z

Zehnder, 188.

ELEMENTOS DE COSMOGRAFÍA

INDICE ANALÍTICO

LIBRO PRIMERO

LA ESFERA CELESTE

CAPÍTULO PRIMERO

NOCIONES PRELIMINARES

	Página
1. Astros	3
2. Visual, distancia angular, diámetro aparente	3
3. Astros fijos o estrellas. Centelleo	4
4. Astros errantes	6
5. Ciencias astronómicas y cosmografía: su importancia y objeto	7

LA ESFERA CELESTE

MOVIMIENTO APARENTE DIURNO

6. Esfera celeste	8
7. Movimiento diurno de la esfera celeste. Rotación de la Tierra	10

DEFINICIONES RELATIVAS A LA ESFERA CELESTE

8. Eje del mundo	11
9. Polos celestes	11
10. Ecuador celeste	12
11. Paralelos celestes	12
12. Círculos horarios o de declinación	12
13. Vertical de un lugar: cenit, nadir, planos verticales	12
14. Horizontes: distintas clases. Almicerántadas	13
15. Coordenadas esféricas	14
16. Altura	15
17. El meridiano, culminación de los astros	16
18. La meridiana: orientación. Sentido directo y sentido retrógrado	16
19. Propiedades del meridiano	17
20. Coordenadas geográficas. Longitud y latitud	18 X
21. Colatitud	19
22. Coordenadas horizontales: azimut y altura	19
23. Distancia cenital	20
24. Teodolito	20
25. Determinación del azimut y la distancia cenital	22
26. Corrección de la altura de un astro	22
27. Refracción atmosférica: diversos efectos	22
28. Altura del polo celeste y latitud geográfica	23
Advertencias	24

CAPÍTULO SEGUNDO

LEYES Y CONSECUENCIAS DEL MOVIMIENTO DIURNO

29. Día estelar o sidéreo. Su duración	25
30. Leyes del movimiento diurno	25
31. Variaciones diurna y anual del aspecto del Cielo en un mismo lugar de la Tierra	27

ASPECTO DEL CIELO SEGÚN LA LATITUD:

LAS TRES ESFERAS

32. Influencia de la latitud sobre el aspecto del Cielo	28
33. Estrellas circumpolares: culminaciones	28
34. Zonas celestes perpetuamente visibles e invisibles para la latitud ϕ . Declinación	28
35. El Cielo visto desde una latitud intermedia (esfera oblicua) ..	29
36. El Cielo visto desde el Ecuador (esfera recta)	31
37. El Cielo visto desde un polo de la Tierra (esfera paralela)	37
38. Determinación del meridiano: el gnomón	32
39. Determinación del meridiano: alturas correspondientes	33
40. Determinación de la distancia cenital del polo celeste: dirección del eje del mundo	33
41. Determinación de la latitud de un lugar	34
42. Distancia cenital de la intersección del meridiano del lugar con el Ecuador	34

CAPÍTULO TERCERO

COORDENADAS ECUATORIALES

43. Equinoccios: punto vernal	36
44. Primer sistema de coordenadas ecuatoriales: ángulo horario t y declinación δ	36
45. Distancia polar δ'	37
46. Tiempo sideral de un lugar. Origen del día sidéreo	38
47. Relación entre el tiempo sideral T_s y el ángulo horario θ del punto vernal	38
48. Ecuatorial	38
49. Determinación del ángulo horario t y la distancia polar δ' de un astro	39
50. Segundo sistema de coordenadas ecuatoriales: ascensión recta α y declinación δ	39
51. Relación entre la hora sideral de un lugar y la ascensión recta del astro que culmina	40
52. Medida de la declinación δ de un astro	41
53. Anteojo meridiano	42
54. Determinación meridiana de la ascensión recta α de un astro ..	43
55. Transformación de coordenadas ecuatoriales en horizontales y viceversa	43

CAPÍTULO CUARTO

DESCRIPCIÓN DEL CIELO ESTRELLADO

PRELIMINARES

56. Clasificación de las estrellas por su brillo aparente	45
57. Número de estrellas	49

	Página
58. Constelaciones	48
59. Orientación: su importancia para el conocimiento del Cielo ..	49
60. Fecha en que las estrellas primarias culminan a medianoche	49

DESCRIPCIÓN DE ESTRELLAS Y CONSTELACIONES

61. El Cielo visto desde los 35° de latitud austral	51
62. Estrellas y constelaciones que culminan a medianoche en enero, febrero y marzo, vistas desde los 35° S. de latitud	52
63. Estrellas y constelaciones que culminan a medianoche en abril, mayo y junio, vistas desde los 35° S. de latitud	54
64. Estrellas y constelaciones que culminan a medianoche en julio, agosto y setiembre, vistas desde los 35° S. de latitud	56
65. Estrellas y constelaciones que culminan a medianoche en octubre, noviembre y diciembre, vistas desde los 35° S. de latitud	58
66. Estrellas y constelaciones invisibles desde los 35° S. de latitud	61
67. Vía Láctea	67

LIBRO SEGUNDO

EL SOL

CAPÍTULO PRIMERO

EL DÍA Y LA NOCHE

INTRODUCCIÓN

68. El Sol: forma del disco; diámetro aparente; distancia a la Tierra: perigeo y apogeo	67
69. Arco diurno y arco nocturno: sus variaciones a lo largo del año	68
70. Movimiento del Sol en ascensión recta	68
71. Movimiento del Sol en declinación	69

MOVIMIENTO APARENTE ANUAL: LA ECLÍPTICA

72. La eclíptica	70
73. Equinoccios, solsticios, coluros	71
74. El zodíaco y sus doce constelaciones	71
75. Oblicuidad de la eclíptica	73
76. El Sol en su recorrido sobre la eclíptica: las estaciones	73
77. Hora del equinoccio vernal	74
78. Año trópico	75
79. Año sideral	75

COORDENADAS ECLÍPTICAS

80. Eje y polos eclípticos	75
81. Círculos de longitud	76
82. Círculos de latitud	76
83. Coordenadas eclípticas: longitud y latitud astral	76

CONSECUENCIAS DEL MOVIMIENTO ANUAL DEL SOL. DESIGUALDAD DE LOS DÍAS Y LAS NOCHES EN UN MISMO LUGAR

84. Paralelos celestes recorridos por el Sol a lo largo del año	77
85. Desplazamiento anual del paralelo diurno del Sol	78
86. El día y la noche en la latitud de Buenos Aires y La Plata (35° S.)	79
87. El día y la noche en latitudes especiales de la Tierra	80

	Página
88. Duración del día en la latitud φ para la declinación δ del Sol	82
89. Crepúsculos	82

CAPÍTULO SEGUNDO

LA ÓRBITA ANUAL DEL SOL: LEY DEL MOVIMIENTO

90. Determinación de la órbita del Sol	84
91. Forma y posición de la órbita solar: ápsides	85
92. Excentricidad de la órbita	85
93. Velocidad angular del Sol: su variación en el transcurso del año	86
94. Relación entre la velocidad angular del Sol y su distancia a la Tierra	87
95. Ley de las áreas	87
96. Las estaciones: su desigual duración	88

EL DÍA SOLAR MEDIO

97. Día solar verdadero: causas que modifican su duración . . .	90
98. El primer Sol ficticio. Longitud media del Sol. La ecuación del centro	91
99. El Sol medio. La reducción al Ecuador	92
100. Día solar medio	93

VARIACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA ECLÍPTICA

101. Precesión. Efectos.....	93
102. Causas de la precesión	96
103. La nutación: causa y efectos	96

CAPÍTULO TERCERO

MEDIDA DEL TIEMPO

PRELIMINARES

104. Unidad fundamental del tiempo: el día y sus fracciones	98
105. Tiempo de un astro	98
106. Unidades usuales: tiempos que se derivan	99
107. Tiempo sideral	99
108. Relación entre el tiempo sideral T_s , el tiempo de un astro T_a , y la ascensión recta α del mismo	99
109. Tiempo solar verdadero	100
110. Tiempo solar medio	101
111. Tiempo medio astronómico y tiempo medio civil. Tiempo universal	101
112. La ecuación de tiempo	101
113. Hora local y hora legal	102
114. Husos horarios	103

EL CALENDARIO Y SUS REFORMAS

115. Año trópico y año civil: el calendario. Período juliano	103
116. Reforma juliana	106
117. Reforma gregoriana	106

CAPÍTULO CUARTO

MEDIDAS RELATIVAS AL SOL. PARALAJE

118. Paralaje	108
---------------------	-----

	Página
119. Relación entre la paralaje horizontal P , la distancia d del astro a la Tierra y el radio r de ésta	109
120. Expresión de la paralaje horizontal, en función de una paralaje en altura	109
121. Determinación práctica de la paralaje horizontal	110
122. Paralaje solar. Oposiciones de Eros. Pasos de Venus	111
123. Distancia Sol - Tierra: error que se comete en la determinación	113
124. Dimensiones del Sol	114

CAPÍTULO QUINTO

FÍSICA DEL SOL

125. Luz y calor del Sol	116
126. Origen de la energía irradiada por el Sol	116

CONSTITUCIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL SOL. LAS CAPAS SOLARES Y LAS ATMÓSFERAS ENVOLVENTES

127. Estructura del Sol	117
-------------------------------	-----

a) FOTOESFERA

128. Fotosfera: manchas solares, periodicidad	118
129. Rotación del globo solar	122

b) CAPA DE INVERSIÓN

130. Capa de inversión: espectro del Sol	124
--	-----

c) CROMOESFERA

131. Cromoesfera: protuberancias; espectroheliogramas	126
---	-----

d) CORONA

132. Corona. Luz zodiacal	129
---------------------------------	-----

LIBRO TERCERO

LA TIERRA

CAPÍTULO PRIMERO

ESTRUCTURA, FORMA Y DIMENSIONES

133. La Tierra considerada como astro	135
---	-----

FORMA Y DIMENSIONES DE LA TIERRA

134. Pruebas relativas a la redondez de la Tierra	135
135. Determinación aproximada del radio de la Tierra por la depresión del horizonte	136
136. Determinación de la forma de la Tierra	137

NOCIONES DE GEODESIA

137. Medición de arcos de meridiano. Triangulación	139
138. Dimensiones de la Tierra. Elipsoide de Hayford	141
139. El péndulo y la forma de la Tierra	143
140. Forma verdadera de la Tierra: el geoide	144
141. Vertical y latitud geodésica	145
142. Superficie y volumen de la Tierra	145
143. Masa y densidad de la Tierra	145

CAPÍTULO SEGUNDO

MOVIMIENTOS DE LA TIERRA. ROTACIÓN

144. Interpretación del movimiento diurno: las dos hipótesis	147
145. Equivalencia cinemática de ambas hipótesis	147
146. El movimiento diurno de las estrellas es aparente	148
147. Rotación de la Tierra: pruebas experimentales	149

TRASLACIÓN DE LA TIERRA

148. Interpretación del movimiento anual del Sol: las dos hipótesis	153
149. Equivalencia cinemática de ambas hipótesis	153

PRUEBAS DE LA ROTACIÓN DE LA TIERRA

150. Paralaje anual de las estrellas	155
151. Aberración anual	156

CONSECUENCIAS DE LA TRASLACIÓN DE LA TIERRA

152. La órbita terrestre: características. Perihelio y afelio	158
153. Posiciones de la Tierra en las cuatro estaciones del año	158
154. Carácter astronómico de las zonas	160
155. Variación de temperatura en un lugar de la Tierra	160
156. Principales movimientos de la Tierra	162

CAPÍTULO TERCERO

DETERMINACIÓN DE LAS COORDENADAS
GEOGRÁFICAS

157. Determinación de la latitud	165
158. Determinación de la longitud	165

MAPAS GEOGRÁFICOS

159. Globos terrestres	166
160. Mapas geográficos	160
161. Confección de un mapa geográfico: caneavá	167
162. Proyección ortográfica	168
163. Propiedades de la proyección ortográfica	169
164. Proyección estereográfica	169
165. Propiedades de la proyección estereográfica	171

LIBRO CUARTO

LA LUNA

CAPÍTULO PRIMERO

MOVIMIENTOS DE LA LUNA

166. Generalidades	177
167. Movimiento de la Luna con respecto al Sol: mes lunar	177
168. Movimiento de la Luna entre las estrellas	178
169. Elongación: sicigias y cuadraturas	178
170. Forma del disco lunar: diámetro aparente	179

TRASLACIÓN

171. Plano de la órbita lunar: inclinación; nodos	179
---	-----

	Página
172. Forma real de la órbita lunar: perigeo y apogeo; excentricidad	180
173. Precesión y nutación de la Luna	181
174. Revolución sideral y revolución sinódica	182
175. Forma aproximada de la trayectoria lunar con relación al Sol	183

ROTACIÓN DE LA LUNA

176. Rotación	184
177. Libraciones	185

CONSECUENCIAS DE LA TRASLACIÓN DE LA LUNA

178. Las fases: preliminares	187
179. Explicación de las fases. Periodicidad	187
180. Fases terrestres vistas desde la Luna. Luz cenicienta	189
181. El número de oro o ciclo de Metón	189
182. Las mareas	189

CAPÍTULO SEGUNDO

MONOGRAFÍA DE LA LUNA

183. Paralaje lunar	192
184. Distancia de la Luna a la Tierra	192
185. Radio, superficie y volumen de la Luna	192

TOPOGRAFÍA LUNAR

187. Aspecto del disco lunar	194
188. Valles de la Luna	194
189. Cráteres lunares	196
190. Montañas lunares	196
191. Las ranuras	198
192. Constitución física de la Luna	198

CAPÍTULO TERCERO

ECLIPSES

193. Generalidades	199
--------------------	-----

ECLIPSES DE SOL

194. Longitud del cono de sombra proyectado por la Luna	200
195. Eclipse total de Sol	201
196. Penumbra: eclipses parciales de Sol	203
197. Eclipse anular de Sol	203

ECLIPSES DE LUNA

198. Posibilidad	205
199. Eclipse total de Luna	207
200. Eclipses parciales de Luna	208
201. Visibilidad de los eclipses de Sol y Luna	209
202. Influencia de la refracción atmosférica sobre los eclipses de Luna	209
203. Periodicidad de los eclipses: saros o período caldeo	210

LIBRO QUINTO

EL SISTEMA SOLAR

CAPÍTULO PRIMERO

LOS SISTEMAS ASTRONÓMICOS

204. Movimiento de los planetas entre las estrellas: estaciones y retrogradaciones	215
--	-----

SISTEMA GEOCÉNTRICO

205. Principios básicos del sistema de Tolomeo	216
206. Explicación de las estaciones y retrogradaciones planetarias en el sistema de Tolomeo: epiciclos	217

SISTEMA HELIOCÉNTRICO

207. Sistema de Copérnico	219
208. Principios básicos del sistema de Copérnico	220
209. Equivalencia cinemática entre los sistemas de Tolomeo y Copérnico	221
210. Explicación de los movimientos planetarios en el sistema de Copérnico	222
211. Sistema de Tycho - Brahe	224
212. Consolidación del sistema de Copérnico: Galileo	224

CAPÍTULO SEGUNDO

GRAVITACIÓN UNIVERSAL

213. Leyes de Kepler	226
214. Enunciado general de la ley de Newton	228
215. Masas de los astros. Perturbaciones	229
216. Determinación de la constante k de gravitación	229
217. Descubrimientos de Urano, Neptuno y Plutón	230
218. Teoría de la gravitación de Einstein	232

CAPÍTULO TERCERO

GENERALIDADES SOBRE EL SISTEMA SOLAR

219. Sistema solar	233
220. Distancias medias de los planetas al Sol: Ley numérica de Titius o Bode	233
221. Planetas inferiores y superiores. Elongación: conjunción, oposición y cuadraturas	235
222. Conjunción de planetas inferiores. Digresión	236
223. Conjunción, oposición y cuadraturas de planetas superiores ..	237
224. Fases de los planetas	237
225. Órbitas planetarias: perihelio y afelio; nodos; pasos de Mercurio y Venus	239
226. Revolución sinódica y sideral de los planetas	239
227. Radio, superficie y volumen de los planetas	240
228. Satélites de los planetas, eclipses y ocultaciones	241

CAPÍTULO CUARTO

MONOGRAFIA DE LOS PLANETAS

229. Mercurio	242
230. Venus	243

	Página
231. Marte	245
232. Satélites de Marte	247
233. Asteroides	248
234. Hipótesis relativas al origen de los asteroides	250
235. Júpiter	251
236. Satélites de Júpiter	254
237. Saturno	255
238. Anillos de Saturno	257
239. Satélites de Saturno	259
240. Urano	259
241. Satélites de Urano	261
242. Neptuno	261
243. Satélite de Neptuno	262
244. Plutón	262
245. Datos comparados de los cuerpos del Sistema Solar	263

CAPÍTULO QUINTO

COMETAS Y METEOROS CÓSMICOS
COMETAS

246. Aspecto y forma	266
247. Origen de los cometas	268
248. Órbitas cometarias: excentricidad; inclinación	268
249. Constitución de los cometas	270
250. Choques con la Tierra	270

MONOGRAFÍAS DE ALGUNOS COMETAS IMPORTANTES

251. Cometa Halley	271
252. Cometa Morehouse	272
253. Cometa Brooks	272
254. Cometa Encke	272
255. Cometa Biela	272
256. Otros cometas importantes	273

METEOROS CÓSMICOS

257. Estrellas fugaces	273
258. Origen de las estrellas fugaces	274
259. Puntos radiantes. Periodicidad de los enjambres meteóricos ..	276
260. Relaciones entre cometas y meteoros cósmicos	276
261. Estrellas fugaces esporádicas	277

BÓLIDOS Y URANOLITOS

262. Bólidlos	278
263. Constitución química de los uranolitos	280
264. Uranolitos argentinos	280

LIBRO SEXTO

ESTRELLAS Y NEBULOSAS

CAPÍTULO PRIMERO

INTRODUCCIÓN A LA ASTRONOMÍA ESTELAR

265. Generalidades	285
--------------------------	-----

INSTRUMENTOS DE OBSERVACIÓN

266. Anteojo astronómico. Refractores y reflectores	285
267. Aumento exigible	288
268. Campo	288
269. Astrográficos	289
270. Dimensiones de refractores y reflectores	289

ESPECTROGRAFÍA

271. Espectroscopía y espectrografía	290
272. Espectros de absorción	292
273. Espectro normal del Sol	293
274. Espectroheliógrafo	293

FOTOMETRÍA

275. Fotometría astronómica	295
-----------------------------------	-----

RADIACIÓN

276. Radiación térmica	297
277. Cuerpo negro. Leyes de Stefan y Wien	297
278. Pirheliómetro. Determinación de la constante solar	299
279. Temperatura efectiva del Sol	300
280. Bolómetro	301
281. Medida de la temperatura de las estrellas	302

CAPÍTULO SEGUNDO

ESTRELLAS

282. Catálogos estelares	303
283. Distancia a las estrellas. Año luz y Parsec	305
284. Determinación fotográfica de la paralaje	306
285. Magnitudes absolutas	306
286. Luminosidad	306

MOVIMIENTOS ESTELARES

287. Movimiento propio de las estrellas. Efecto Doppler	307
288. Corrientes estelares	309
289. Traslación del sistema solar	310

ESTRELLAS DOBLES

290. Estrellas dobles y múltiples	311
---	-----

ESTRELLAS VARIABLES

291. Generalidades	313
292. Clasificación de las estrellas variables	314
293. Variables a eclipse tipo Algol	314
294. Variables a eclipse tipo β de la Lira (líridas)	315
295. Variables regulares a corto período tipo δ de Cefeo (cefeidas)	315
296. Variables irregulares tipo α de Casiopea	316

	Página
297. Variables a grandes cambios de brillo tipo Mira Ceti	316
298. Variables temporarias (estrellas novas)	316
299. Las supernovas	318

CAPÍTULO TERCERO

CONSTITUCIÓN DE LAS ESTRELLAS

300. Color de las estrellas	319
301. Espectros estelares: clasificaciones de Secchi y Vogel	319
302. Clasificación espectral del Harvard College	322
303. Estrellas gigantes y enanas. Radios y volúmenes	324
304. Relación entre la magnitud absoluta y el tipo espectral de las estrellas: diagrama de Russell. Enanas blancas	325
305. Masa y densidad de las estrellas	326

EVOLUCIÓN DE LAS ESTRELLAS

306. Preliminares. Paradoja de Lane	327
307. Evolución de las estrellas: las dos hipótesis	327
308. Teorías evolutivas de Lockyer y Russell	329

CAPÍTULO CUARTO

CÚMULOS ESTELARES

309. Cúmulos o conglomerados estelares	332
310. Coordenadas galácticas	334
311. Cúmulos estelares abiertos	335
312. Cúmulos esféricos o globulares	335
313. Sistema local	337

NEBULOSAS

314. Clasificación de las nebulosas	337
---	-----

NEBULOSAS GALÁCTICAS

315. A. Nebulosas difusas	338
316. B. Nebulosas planetarias	342
317. Forma y dimensiones de la Galaxia	344
318. Rotación de la Galaxia	344

NEBULOSAS EXTRAGALÁCTICAS

319. Nebulosas extragalácticas: clasificación	345
320. Generalidades relativas a las nebulosas extragalácticas	345
321. Ley de Hubble	347
322. Los grupos nebulares extragalácticos	348
323. Galaxia y nebulosas espirales	349

CAPÍTULO QUINTO

COSMOGONÍA

324. Cosmogonía	350
325. El caos primitivo	350

HIPÓTESIS COSMOGÓNICAS

326. Hipótesis de Kant	351
327. Hipótesis de Laplace	351
328. Otras hipótesis cosmogónicas	353
329. Hipótesis de Jeans	354
330. Formación de los anillos de Saturno. Frontera de Roche	355
331. Comparación entre las hipótesis de Laplace y Jeans. La vida en el Universo	355

APÉNDICE

Triángulo de posición	359
-----------------------------	-----

ÍNDICE CRONOLÓGICO DE LOS PROGRESOS
DE LA ASTRONOMÍA

Antigüedad	363
Edad Media	364
Edad Moderna	364
Período contemporáneo	365

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

