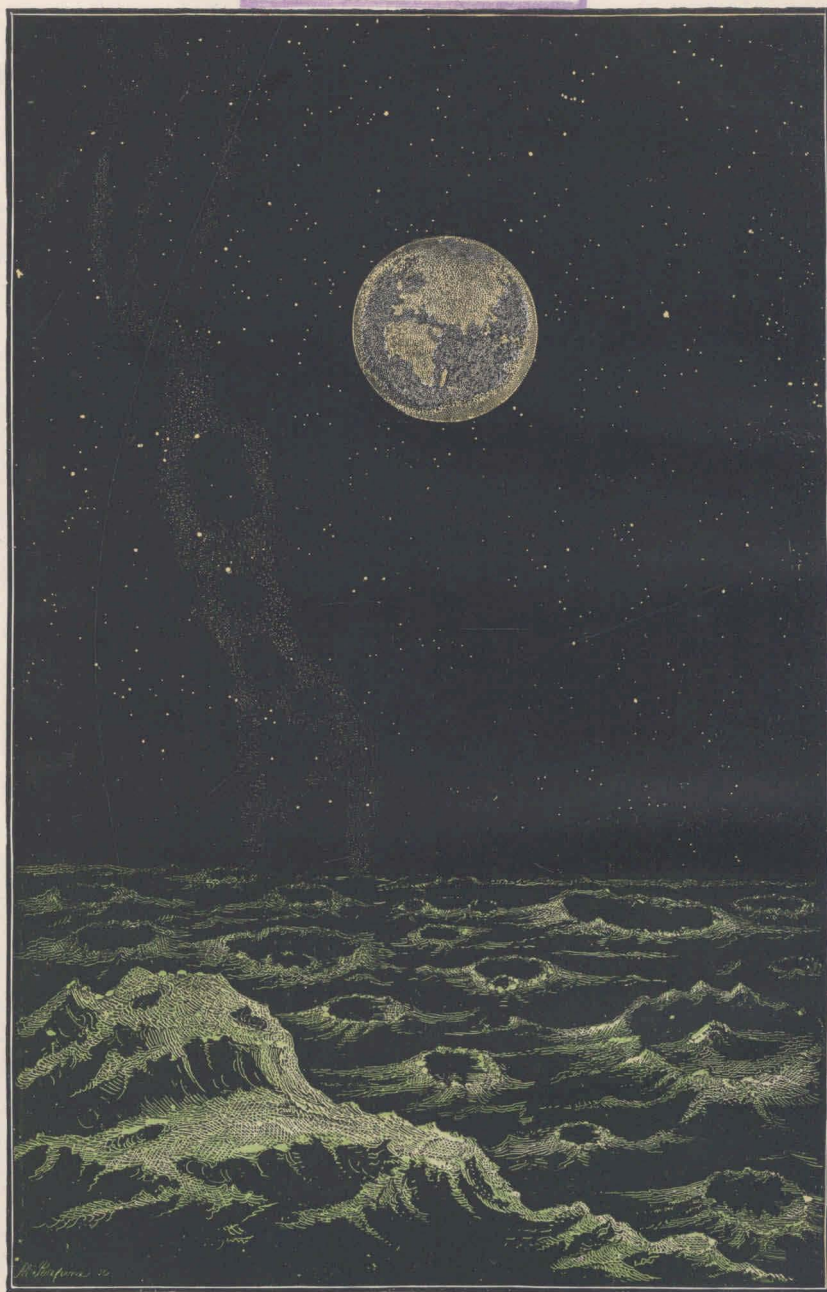


P. EDUARDO BRUGIER S.J. / ELEMENTOS DE COSMOGRAFÍA

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS



Aislamiento de la Tierra en el espacio.

(Se supone al observador colocado en la luna.)

ELEMENTOS DE COSMOGRAFÍA

PARA COLEGIOS DE SEGUNDA ENSEÑANZA

POR EL PADRE

EDUARDO BRUGIER S.J.

SÉPTIMA EDICIÓN

CON FRONTISPICIO, 143 GRABADOS Y UN MAPA
DE LA ZONA ECUATORIAL

TEXTO PARA LOS COLEGIOS NACIONALES DE LA REPÚBLICA ARGENTINA
APROBADO POR EL MINISTERIO DE INSTRUCCIÓN PÚBLICA

(DECRETO DE 28 DE FEBRERO DE 1898)

APROBADO PARA CHILE POR EL CONSEJO SUPERIOR
DE INSTRUCCIÓN EN 1905



ÁNGEL ESTRADA & CÍA.
EDITORES
BOLÍVAR 466 — BUENOS AIRES

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

155 X 234

Es propiedad de los editores, quienes la ponen bajo el amparo
de la Ley n° 7092.

PRÓLOGO A LA CUARTA EDICIÓN.

LA notable diferencia que ofrece la presente cuarta edición con respecto a la tercera, se justifica por el propósito de acomodar mejor estos elementos a un libro de texto para las clases y los estudiantes libres: a este fin se han suprimido las láminas y figuras que eran de adorno, y algunas materias innecesarias.

Por otra parte, puedo afirmar que la presente edición lleva notable ventaja didáctica sobre la anterior, siendo al mismo tiempo más conforme al programa oficial. Suprimiendo varios párrafos menos útiles, he podido agregar otros de mayor importancia, como son, por ejemplo, variedad de problemas instructivos y fáciles, medida de la paralaje del sol con auxilio de Eros, manchas solares, trayectoria de los planetas, cuadrante horizontal, velocidad de la luz, clasificación de las estrellas según su espectro, etc. Abrigo la confianza de que el texto en la presente forma dará a los alumnos mayor facilidad en el estudio de este ramo, sobre todo para preparar el examen cuando no hayan podido asistir a las clases.

Aprovecho la ocasión para manifestar mi agradecimiento por la benévola aprobación oficial con que el H. Consejo de Instrucción, tanto de la Argentina como de Chile, se ha dignado favorecer este modesto trabajo.

Santiago de Chile, Colegio de S. Ignacio, 1911.

El Autor.

**BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS**

ÍNDICE.

	Pág.
Prólogo	V
LIBRO PRIMERO.	
Elementos geométricos de la esfera celeste	I
Capítulo primero. Nociones preliminares (Aislamiento de la tierra, Diámetro aparente, Distancia angular, Clasificación)	I
Capítulo segundo. Planos y ángulos fundamentales (Horizontes, Altura, Refracción atmosférica, Meridiano, Eje del mundo)	11
Capítulo tercero. Movimiento de la esfera celeste	26
Capítulo cuarto. La paralaje y sus aplicaciones	29
Capítulo quinto. Coordenadas celestes	35
Capítulo sexto. Representación de la esfera celeste	42
Capítulo séptimo. Algunos instrumentos astronómicos	47
LIBRO SEGUNDO.	
Movimiento y constitución del sol	53
Capítulo primero. Movimiento aparente anual del sol (Ascensión recta, Declinación, Eclíptica, Definiciones, Coordenadas eclípticas)	53
Capítulo segundo. Forma de la órbita del sol	64
Capítulo tercero. Rotación del globo solar	67
Capítulo cuarto. Varias medidas relativas al sol	70
Capítulo quinto. Constitución del sol	74
LIBRO TERCERO.	
Generalidades sobre los planetas	81
Capítulo primero. Generalidades sobre su movimiento (Caracteres, Definiciones, Oposición, Conjunción)	81
Capítulo segundo. Sistemas de Tolomeo y de Copérnico	86
Capítulo tercero. Movimiento aparente de los planetas	89
Capítulo cuarto. Leyes generales (Képler, Bode y Newton)	92
LIBRO CUARTO.	
Elementos geométricos y movimientos de la tierra	97
Capítulo primero. Forma de la tierra en general	98
Capítulo segundo. Coordenadas geográficas	101
Capítulo tercero. El radio y la forma verdadera de la tierra (Aplanamiento, Dimensiones)	110
Capítulo cuarto. Mapas geográficos (Sistema ortográfico, estereográfico, de Mercátor)	117

	Pág.
Capítulo quinto. Rotación de la tierra	125
Capítulo sexto. Movimiento de traslación	133
Capítulo séptimo. Movimiento del eje de la tierra	138

LIBRO QUINTO.

**Fenómenos terrestres relacionados con el movimiento aparente
del sol**

Capítulo primero. Duración de los días	143
Capítulo segundo. Las estaciones	153
Capítulo tercero. El tiempo medio (Día solar y día sideral; el sol medio)	158
Capítulo cuarto. Cuadrantes solares	167
Capítulo quinto. El año trópico y el calendario (Corrección juliana y gregoriana)	170

LIBRO SEXTO.

La luna.

Capítulo primero. Movimiento propio de la luna	176
Capítulo segundo. Fases de la luna	182
Capítulo tercero. Rotación y libraciones de la luna	186
Capítulo cuarto. Elementos geométricos de la luna	191
Capítulo quinto. Constitución física de la luna (Ausencia de la atmósfera)	194

LIBRO SÉPTIMO.

Fenómenos debidos al movimiento de la luna

Capítulo primero. Eclipses en general y eclipses de luna	200
Capítulo segundo. Eclipses de sol	204
Capítulo tercero. Las mareas	209

LIBRO OCTAVO.

Particularidades sobre los planetas y cometas

Capítulo primero. Planetas (Mercurio, Venus, Marte, Asteroides, Eros, Júpiter [Velocidad de la luz], Saturno, Urano, Neptuno)	214
Capítulo segundo. Cometas (sus partes componentes, magnitud, trayec- torias; Cometas periódicos, Diferencias con los planetas	228
Capítulo tercero. Meteoros cósmicos (Luz zodiacal)	235

LIBRO NONO.

Estrellas y nebulosas

Capítulo primero. Estrellas y constelaciones (Constelaciones australes y boreales; distancias; estrellas dobles, periódicas, cambiantes)	241
Capítulo segundo. Las nebulosas (resolubles, irreducibles; la Vía Láctea; Hipótesis de Laplace)	263
Apéndice. Triángulo de posición. Segunda ley de Képler. Observatorios. Resumen de medidas	272

ÍNDICE DE GRABADOS.

(La impresión con letra *cursiva* indica grabados separados en color.)

Aislamiento de la tierra en el espacio. (Grabado-Frontispicio.)

Fig.	Pág.	Fig.	Pág.
1. Diámetro aparente	5	46. Eclipse total de sol	79
2. Diámetro aparente y distancia	6	47. <i>Algunas protuberancias del sol</i>	80
3. Horizontes	13	48. Conjunción y oposición de los planetas	83
4. Esquema del teodolito	14	49. Trayectoria de un planeta	85
5. Ecuatorial	15	50. Movimiento retrógrado de Venus	90
6. Altura	16	51. Movimiento de Júpiter	91
7. Refracción atmosférica	18	52. Trayectoria aparente de los planetas	92
8. Determinación del meridiano	22	53. Forma de la tierra	98
9. Método del gnomon	23	54. Depresión del horizonte	100
10. Eje del mundo	25	55. Radio terrestre	100
11. Esfera recta	28	56. Círculos terrestres	102
12. Esfera paralela	28	57. Coordenadas geográficas	103
13. Esfera oblicua	29	58. Latitud	106
14. La paralaje	30	59. Diferencia de latitudes	111
15. Paralaje horizontal y de altura	31	60. Triangulación	112
16. Altura geocéntrica	34	61. Proyecciones	118
17. Paralaje anual	34	62. Proyección ortográfica	118
18. Azimut	36	63. Proyección estereográfica	120
19. Ascensión recta	37	64. Los dos hemisferios terrestres	121
20. Declinación	39	65. Desarrollo cónico	122
21. Latitud y declinación	40	66. Aspecto plano del desarrollo cónico	122
22. Globo celeste	43	67. Sistema de Mercátor	123
23. Globo celeste	43	68. Rotación de la tierra	126
24. Carta celeste	45	69. Desvío de la vertical	128
25. Construcción de la elipse	46	70. Oscilación del péndulo en su plano	131
26. Anteojo astronómico	47	71. Experimento del péndulo	131
27. Reticulo	48	72. Movimiento de traslación	133
28. Anteojo meridiano	49	73. Ángulo de aberración	135
29. Comprobación del eje óptico	50	74. Aberración de la luz	136
30. El sextante	51	75. Elipses de aberración	137
31. Declinación del sol	55	76. Precesión de los equinoccios	139
32. La eclíptica	56	77. La nutación	141
33. Oblicuidad de la eclíptica	59	78. El día en el círculo polar	144
34. El gnomon	61	79. Duración de los días	145
35. El punto Aries	62	80. Zonas	149
36. Coordenadas eclípticas	63	81. El crepúsculo	151
37. Diámetro aparente	65	82. Duración del crepúsculo	152
38. Excéntrica de los antiguos	66	83. Las estaciones	154
39. Órbita del sol	67	84. Duración de las estaciones	157
40. Movimiento de las manchas	68	85. El día solar	159
41. Rotación del sol	69	86. Movimiento irregular del sol en lon- gitud	160
42. Órbita de Eros	71	87. Irregularidad en ascensión recta	161
43. Mancha aislada	75	88. El primer sol ficticio	162
44. Grupo de manchas	75	89. El sol medio	162
45. Forma de una mancha	76		

Fig.	Pág.	Fig.	Pág.
90. Cuadrante ecuatorial	167	118. Aspectos de Júpiter	220
91. Cuadrantes	168	119. Velocidad de la luz	222
92. Construcción	169	120. Saturno con los anillos	224
93. Cuadrante horizontal	169	121. Traslación de Saturno	225
94. Revolución sinódica	178	122. El anillo de Saturno visto de canto	225
95. Órbita de la luna	179	123. Aparición de un cometa	229
96. Movimiento de la luna	180	124. Cometa de 1744	230
97. Órbita del centro lunar	181	125. Varios aspectos del cometa de 1835	231
98. Retrogradación de los nodos	181	126. Trayectorias de los cometas	232
99. Explicación de las fases de la luna	183	127. Órbita del cometa de Halley	233
100. Rotación de la luna	186	128. Dirección de la cola	235
101. Libración en longitud	188	129. Órbita del enjambre de meteoritos	237
102. Libración en latitud	189	130. Luz zodiacal	239
103. Libración diurna	190	131. El hemisferio visible	246
104. Paralaje de la luna	191	132. Orión y estrellas vecinas	248
105. La luna	194	133. Orión y algunas constelaciones australes: el Navío, etc.	250
106. Un cráter de la luna	196	134. Constelaciones australes: Cruz — Centauro — Escorpión, etc.	251
107. Eclipse de luna	201	135. Osa mayor	254
108. Eclipse parcial de luna	202	136. Osa mayor, Osa menor y León	255
109. Eclipse total de luna	203	137. Aglomeración en Andrómeda	263
110. Sombra proyectada por la luna	204	138. Aglomeración en Berenice	264
111. Eclipses de sol	205	139. Racimo en Hércules	264
112. Eclipse anular	206	140. <i>La Vía Láctea</i>	266
113. Eclipse de sol	208	141. Nebulosa anular en la Lira	268
114. Alta y baja marea	209	142. Triángulo de posición	272
115. Mareas	211	143. Ley de las áreas	275
116. Marea en las sicigias	212		
117. Aspectos de Marte	218		

Mapa de la zona ecuatorial.

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

LIBRO PRIMERO.

ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LA ESFERA CELESTE.

CAPÍTULO PRIMERO.

NOCIONES PRELIMINARES.

§ 1. ORIENTACIÓN.

1. Si un observador, colocado en algún punto elevado o en una gran planicie, mira en derredor suyo, se le presenta la superficie terrestre como parte de una vasta llanura que se extiende en forma circular hacia todas las direcciones. Al cambiar el observador su posición, desaparecen para él ciertas regiones, y otras nuevas se ofrecen a su vista; pero siempre se formará en su mente la ilusión de estar en el centro de un círculo inmenso. Caminando más y más lejos, llegaría finalmente a las costas de algún océano: este hecho dió origen a la opinión de los antiguos, que consideraban la tierra como un disco flotante sobre las aguas. Elevando el observador su mirada hacia arriba, contemplará el grandioso firmamento, sembrado de puntos brillantes durante la noche, y ostentando el sol hermoso durante el día: es la bóveda celeste, o **el cielo**. Esta bóveda parece cortar, en distancia lejana, la superficie terrestre, limitando así la vista del observador; los puntos del mar o de la tierra que componen este límite, forman **el horizonte vulgar**.

2. Sabemos por experiencia que el sol sale cada mañana por el mismo lado (aunque no en el mismo punto) de una región fija del horizonte, que llamamos **Oriente** (del latín *oriri*, nacer), para recorrer una trayectoria curvilínea, hasta desaparecer por el lado opuesto, que llamamos **Occidente** o **Poniente**: fenómeno cuyo embeleso describe el Salmista con estas palabras sublimes: «*Exsultavit (sol) ut gigas ad currendam viam . . . et occursus eius usque ad summum eius; nec est qui se abscondat a calore eius.*» — Regocijose

el sol, al emprender cual gigante su carrera . . . y se remonta hasta la cumbre más alta del cielo, sin que región alguna pueda sustraerse al influjo de su calor.» Al ponerse el sol, desaparece la claridad del día, y la noche extiende gradualmente su negro manto sobre una mitad del globo terrestre; al mismo tiempo empiezan a aparecer en el cielo infinitos puntos brillantes, que son **las estrellas**; éstas, a semejanza del sol, salen de la misma región que el disco solar, suben a cierta altura en la bóveda celeste, para bajar en seguida, hasta desaparecer en la región opuesta.

Orientación es la determinación de los cuatro puntos cardinales con auxilio del Oriente. El 21 de marzo o el 22 de septiembre vemos salir el sol en un punto fijo de nuestro horizonte, que se llama el punto Este, y ponerse en un punto diametralmente opuesto, que es el Oeste. Con auxilio de árboles o edificios será fácil conocer la dirección de estos dos puntos y marcarla en el suelo con una raya.

Fijemos ahora en esta recta un palo en posición vertical: la sombra que proyecta el palo a medio día en la fecha indicada, es perpendicular a la raya trazada y lleva la dirección de la meridiana del lugar, como veremos. Volviendo, pues, la derecha al Este y mirando hacia la sombra, tendremos por delante el Norte, en sentido contrario el Sur y a la izquierda el Oeste. Estos cuatro puntos cardinales distan en la circunferencia del horizonte 90^0 entre sí, y con su auxilio es fácil determinar las direcciones intermedias.

Para orientarse en cualquier día, basta mirar hacia el Oriente, esto es, la región donde sale el sol o las estrellas: tendremos el Norte a la izquierda, el Sur a la derecha, el Poniente a las espaldas. Se comprende que así no obtenemos los puntos cardinales.

El método para orientarse con auxilio de la **brújula** por mar y tierra y en los subterráneos, etc., se explica en la Física.

(Conviene fijarse en que a menudo las palabras Este y Oeste se usan en vez de Oriente y Occidente.)

§ 2. AISLAMIENTO DE LA TIERRA EN EL ESPACIO.

Un observador colocado en el hemisferio boreal, volviendo la derecha hacia el Oriente y examinando con atención el firmamento que se presenta a su vista, descubre no solamente estrellas que salen y se ponen, sino también otras que permanecen siempre visibles durante toda la noche y no salen ni se ponen. Entre éstas se observa una que se mantiene inmóvil y en torno de la cual

parecen *girar* las otras: es la **estrella polar**, que determina el **Norte**; las estrellas que se hallan siempre encima del horizonte de un punto terrestre son **circumpolares**. En el hemisferio austral se observan igualmente estrellas circumpolares, entre las cuales sobresale la hermosa constelación que se llama la **Cruz del Sur**. (*Polo* del griego πολεῖν, *girar*, porque el cielo parece dar vuelta en torno de este punto inmóvil.)

Es muy natural y lógica la consecuencia de que todas las estrellas describen curvas cerradas en los dos hemisferios celestes, a semejanza de las circumpolares: esta conclusión se confirma por el hecho de que podemos observar las estrellas a pesar de la claridad del día, con el auxilio de poderosos telescopios o desde el fondo de pozos profundos. Agréguese otro hecho que se explicará más tarde, a saber, el de aumentar el número de las estrellas circumpolares a medida que el observador se acerca a uno de los polos terrestres. El fenómeno de parecer tocar el firmamento a la tierra formando su intersección un círculo máximo, no es más que una ilusión; ésta desaparece si subimos a una montaña o nos elevamos en un globo a cierta altura, porque entonces la orilla del firmamento retrocede a tanta mayor distancia, cuanto mayor es la altura a que nos encontramos. Finalmente, la bóveda celeste parece tocar las aguas del mar, cualquiera que sea el punto de observación; pero nunca los navegantes han podido encontrar tal línea de contacto ni algún apoyo del globo terrestre. De lo dicho dedúcese que la tierra está aislada en el espacio a semejanza del sol, de la luna y de los demás astros. (Véase el frontispicio.)

§ 3. EL CIELO PARECE UNA ESFERA LIGERAMENTE APLANADA.

La forma en que el cielo se presenta a nuestra vista, no es más que el efecto de una ilusión óptica, cuyas causas vamos a explicar.

La línea del horizonte parece circular, porque nuestra mirada penetra en cualquiera dirección a iguales distancias; de donde resulta que los puntos extremos todavía visibles parecen estar sobre una circunferencia del círculo cuyo centro es el ojo del observador.

Por otra parte, en cualquiera dirección y desde cualquier punto de la tierra que miremos al cielo, penetramos aparentemente a igual profundidad; en otras palabras, los rayos luminosos nos parecen venir de todos los lados y regiones del cielo desde distancias iguales, tanto más cuanto que faltan puntos de comparación. Ahora bien: nosotros combinamos las dos circunstancias que preceden,

formando así la ilusión de un vasto hemisferio celeste que descansa sobre el horizonte.

En el sentido cenital esa bóveda nos parece algo aplanada por la razón siguiente. Un rayo luminoso que viene del horizonte, debe atravesar una capa de aire 16 veces más espesa que un rayo que baja del cenit; como en el primer caso el rayo pasa por mayor número de capas inferiores, es claro que pierde más de su brillo, ya que un medio más denso absorbe mayor cantidad de luz; también han de tenerse en cuenta los vapores de agua que existen en las capas inferiores; finalmente, los rayos que vienen del cenit inciden normalmente, siendo así que los rayos que vienen del horizonte son oblicuos y pierden algo de su claridad por la reflexión parcial que sufren. A causa, pues, del mayor brillo que tienen las estrellas en la vecindad del cenit, la bóveda nos parece estar más cerca que en el horizonte que nos rodea en forma circular; de esta manera resulta la ilusión del aplanamiento: esta ilusión persiste aunque falten objetos intermedios de comparación, como sucede en alta mar.

§ 4. LA VISUAL. DIÁMETRO APARENTE.

Llamamos **visual** una *recta* tirada desde el centro del cristalino a un punto determinado que emite rayos luminosos por sí o por reflexión, por ejemplo una estrella. Se comprende que el camino que sigue un rayo luminoso en un medio homogéneo indica la dirección verdadera de una visual, la que también suele llamarse rayo visual y debe distinguirse del ángulo visual. Para dirigir con exactitud una visual se necesita un punto o una línea fija entre el objeto y el ojo del observador, ya que por algún movimiento de la cabeza puede falsearse el resultado, sobre todo al trazarse los lados de un ángulo por medio de dos visuales. En muchos casos basta fijar en el extremo de una regla horizontal una tablilla vertical provista de una abertura finísima en cuyo medio hay a menudo un hilo vertical (esta disposición se llama pínula); en el otro extremo de la regla basta colocar una aguja o una pínula perpendicular a la regla. En los anteojos astronómicos se consigue la exactitud de la visual por medio del *retículo* y el centro del objetivo.

El **ángulo visual** es el ángulo bajo el cual se ve una longitud determinada, por ejemplo la altura de una torre, el ancho de un edificio, la distancia entre dos objetos, a la cual un rayo visual es perpendicular. Este ángulo se forma por los dos ejes secundarios que se tiran desde el centro del cristalino hacia las extremidades

opuestas del objeto: se comprende que el ángulo será tanto mayor cuanto más **cerca** del observador esté el objeto.

Al tratarse de cuerpos redondos, por ejemplo del sol, de la luna o de algún planeta, el ángulo visual se llama **diámetro aparente**: se designa con este nombre, porque es el ángulo formado por dos visuales que se dirigen desde un mismo punto a los extremos opuestos del diámetro verdadero, que aparece pues bajo un ángulo de cierta graduación. En la fig. I el ángulo AOB es el diámetro aparente, pero tan sólo con aproximación y no con rigurosa exactitud. En efecto, tratándose de un globo, los rayos visuales deberían ser paralelos entre sí para ser tangentes en A y B , porque la tangente es perpendicular al radio en el punto de contacto: en realidad la tangencia se efectúa en los puntos C y D de una *cuerda*; pero esta cuerda difiere muy poco del diámetro cuando se trata de distancias tan grandes como son las del sol y de los planetas.

Con respecto al diámetro aparente hay dos leyes que tienen una aplicación importante en Astronomía.

1ª ley. Si dos cuerpos, S y P , se observan desde una *misma* distancia $SO = OP$ (fig. I), los diámetros aparentes son *próximamente* proporcionales a los verdaderos (decimos «próximamente», porque en rigor el ángulo se refiere a la cuerda). *Ejemplo:* Si AB es el duplo de EM , el ángulo AOB será el duplo de EOM . Recíprocamente, si desde la misma distancia el diámetro aparente AOB es dos veces mayor que EOM , podemos afirmar que el diámetro verdadero AB es próximamente otras tantas veces mayor que EM . Conociendo pues la magnitud de EM podemos calcular la de AB .

Este principio sirve para determinar los diámetros, y por tanto los radios, del sol, de la luna, de los planetas.

2ª ley. Para un mismo objeto que se observa desde *diferentes* distancias, los diámetros

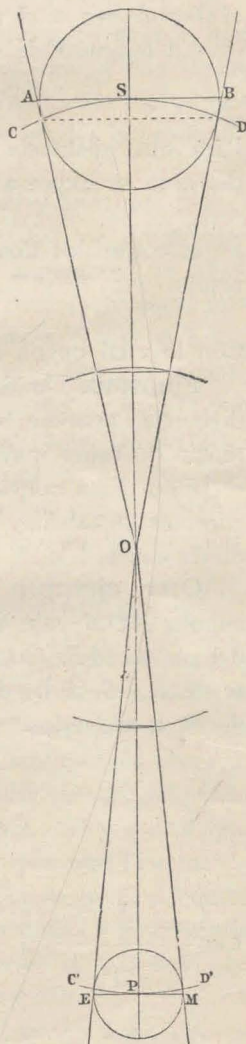


Fig. I.
Diámetro aparente.

aparentes están en razón inversa de las distancias. Si pues el diámetro aparente de un cuerpo se hace mayor, podemos afirmar que la distancia ha disminuído.

[He aquí la demostración de la segunda ley, fundándonos en el problema de la Geometría plana: determinar la longitud de un arco, conociendo su graduación.

Por ser el $\angle AOB$ pequeño, podemos admitir que la cuerda AB se confunde con el arco descrito desde O como centro y con el radio $AO = d$. Sea n el número de grados del arco a la distancia d .

La longitud de este arco será:

$$AB = \frac{\pi \cdot n \cdot d}{180}$$

Para otra distancia d' el diámetro aparente será n' y la longitud del arco se expresa:

$$AB = \frac{\pi \cdot n' \cdot d'}{180}$$

Síguese que los dos segundos miembros son iguales; simplificando resulta

$$n \cdot d = n' \cdot d'$$

$$n : n' = d' : d.$$

Con lo cual queda demostrada esta ley importante.]

Ejemplo. Un decímetro, colocado a la distancia de 343 *m* de distancia, aparece bajo un ángulo de un minuto; luego, a la distancia 60 veces mayor (unos 20 *km*) aparece bajo el ángulo de un segundo. Esta consideración manifiesta cómo astros, situados a tan enormes distancias, son apenas visibles, no obstante sus grandes dimensiones.

Otro ejemplo. Sea el triángulo AOB equilátero (fig. 2); el ángulo AOB vale 60° , que es en este caso el diámetro aparente del objeto AB ; suponiendo OD igual a 1 *km*, ¿bajo qué ángulo se verá AB a la distancia de 24 000 *km*? Los 60 grados se reducen a segundos.

$$n : n' = d' : d$$

$$x : 216\,000 = 1 : 24\,000; x = 9''.$$

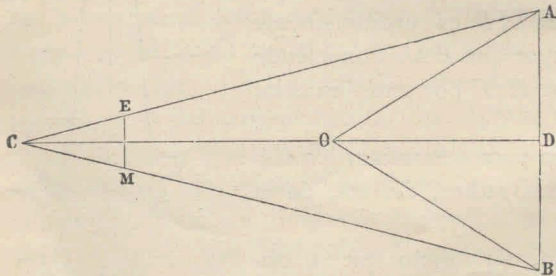


Fig. 2. Diámetro aparente y distancia.

Recíprocamente: si a la distancia de un kilómetro un objeto aparece bajo el ángulo de 60° , la distancia a la cual aparece bajo un ángulo de 10° será seis veces mayor,

esto es, seis kilómetros ($d: 1 \text{ km} = 60^0: 10^0$). Conforme a esta idea se miden las distancias en la guerra y en alta mar, aunque de una manera más complicada.

Deben hacerse varios ejercicios numéricos, aunque sencillos, sin lo cual no se entienden las leyes mencionadas, recordando que el diámetro aparente es un ángulo y no una línea recta.

§ 5. LA DISTANCIA ANGULAR.

Llamamos **distancia angular** de dos astros *el ángulo* que forman entre sí dos rayos visuales dirigidos cada uno a una de las dos estrellas, por ejemplo a Sirio y a Rígel. Para medirla bastan dos alidadas provistas de sus pínulas: el número de grados indicado en el limbo del arco es la distancia lineal.

Por medio de observaciones antiguas, hechas y anotadas por el astrónomo *Hiparco* de Rodas (año 150 a. de J. C.), se ha podido comprobar la *invariabilidad* de las distancias angulares que guardan las estrellas fijas (pero no la luna ni los planetas): estas medidas antiguas difieren muy poco de las modernas (véase el § 27, Globo de Hiparco). Por efecto de esta invariabilidad las constelaciones presentan siempre la misma forma; sin embargo, no debe creerse que la invariabilidad en la posición relativa de las estrellas sea absoluta; pero el cambio no se hará sensible a la vista sino después de muchos miles de años, en conformidad con la explicación que se dará al tratarse del movimiento propio de las estrellas.

§ 6. DISTANCIA LINEAL DE LAS ESTRELLAS.

Esta distancia es la longitud de la recta que va desde la tierra a una estrella, y es sin duda incomparablemente mayor que cualquiera entre dos puntos terrestres. Tomemos, por ejemplo, dos puntos *A* y *B*, muy distantes entre sí, pero situados de tal manera que los observadores se puedan ver uno al otro: si dirigimos una visual desde cada punto a una estrella *E* y medimos los ángulos *EAB* y *EB A* que la visual forma con la recta *AB*, resultará siempre que la suma de los valores $A + B$ no difiere de 180^0 , y que por lo tanto debemos considerar como paralelas entre sí las visuales dirigidas a una estrella desde diferentes puntos de observación, o mejor dicho, hay que admitir que estas visuales se confunden en una sola.

Además, cualquiera que sea el punto de la tierra en que se coloque el observador, siempre le parece que el eje del mundo pasa por el sitio en que se halla. Se deduce de lo que precede que

la tierra debe considerarse como un punto, formando el centro de la esfera celeste. En efecto, las dimensiones de nuestro globo son infinitamente pequeñas si las comparamos con las enormes distancias que separan las estrellas de la tierra: basta recordar que la luz de la estrella más cercana, que es α (alfa) del Centauro, necesita tres años para llegar hasta la tierra.

Debe observarse que la tierra no se considera como un punto cuando se trata del sol o de la luna; sin embargo, la gran distancia a que se hallan todos los astros, lo mismo que su volumen, es la causa de que en las figuras no se puedan guardar las debidas proporciones sin perjudicar la claridad del dibujo; por ejemplo: el radio solar debería tener una longitud 108 veces mayor que el radio terrestre si quisiéramos guardar proporcionalidad en las figuras respectivas. Citemos el ejemplo propuesto por Tissot con referencia a las distancias relativas del sol y de la luna; aplicándolo a los planetas se evidenciará aun más que es imposible guardar las proporciones.

Para formarse una idea de la escala del sistema, formado por la luna, la tierra y el sol, sirva la siguiente comparación. Supongamos la tierra representada por una bolita del grueso ordinario, v. gr. de 1 *cm* de radio; la luna sería entonces una bolita pequeña de 2,5 *mm* de radio, girando en torno de la tierra a una distancia de 60 *cm*; esta proporción guardada, sería el sol un globo enorme de 2 *m* de diámetro, debiendo ser colocado a una distancia de más de 230 *m*. Se deduce de ahí que es imposible representar el conjunto por medio de un aparato o en un dibujo con las debidas proporciones.

Por otra parte debe tenerse presente en las observaciones astronómicas que la mayor o menor distancia ejerce una influencia notable sobre **la percepción del movimiento** de los astros, esto es, de su velocidad angular, fenómeno que se relaciona con el diámetro aparente: de esta influencia se dará un caso notable en el § 162, donde se trata del movimiento propio de las estrellas.

§ 7. VELOCIDAD ANGULAR.

Supongamos que un niño tenga asido el extremo de una cuerda, atada en el centro de una circunferencia de círculo y mantenida tirante. Al caminar el niño con uniformidad, recorre en cada segundo un arco de la curva, de 40^0 por ejemplo: decimos que la velocidad angular del niño es de 40^0 por segundo, porque en virtud de la velocidad la cuerda (el radio vector) formará con su posición an-

terior un ángulo de 40^0 , y este ángulo será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad. La velocidad angular del sol en su movimiento *anual* aparente es de 1^0 por día; la de su movimiento *diurno* es de 15^0 por hora.

Radio vector del sol o de un planeta es la recta imaginaria que va del centro de la tierra al centro del sol o del planeta.

Todos los puntos de un radio vector (o de la cuerda mencionada) tienen la misma velocidad angular, recorriendo arcos de igual graduación en igual tiempo; pero no tienen la misma velocidad *lineal*, ya que los puntos distantes del centro recorren arcos de mayor longitud métrica que los puntos menos distantes. (Explíquese bien esta diferencia.)

[Agregamos aquí la importante relación que existe entre la velocidad angular de un astro que gira en torno de su centro de atracción y sus distancias a este centro, y es la siguiente:

Las velocidades angulares v y v' están en razón inversa del cuadrado de las distancias.

Ejemplo. Si un planeta tiene una distancia al sol 2, 3 o 4 veces mayor que otro, su velocidad angular es 4, 9 o 16 veces menor

$$(v : v' = d'^2 : d^2).]$$

§ 8. CLASIFICACIÓN DE LOS ASTROS. DEFINICIÓN DE LA COSMOGRAFÍA.

✓ **I. Clasificación.** Designamos con la palabra **astro** cualquier cuerpo o masa compacta, de un volumen más o menos considerable, que existe en los espacios del universo, tenga luz propia o no: así decimos que el sol es el astro del día, y que la luna es el astro que nos alumbra de noche. La mayor parte de los astros se hacen visibles porque brillan con luz propia; pero otros tan sólo son visibles cuando vuelven hacia la tierra la superficie iluminada por el sol, por ejemplo la luna o Venus, etc. (La palabra griega *ἄστρον* es primitiva y significa directamente estrella, y no esplendor; al contrario, de esta palabra se han derivado otras para designar objetos que brillan, v. g. *ἀστραπή*, el relámpago.)

1. Estrellas son los astros que guardan entre sí una distancia angular invariable y brillan con luz propia, según se ha comprobado por el análisis espectral; a causa de la gran distancia no se puede medir su diámetro aparente y por lo mismo *se consideran como puntos luminosos*. El brillo inquieto y oscilatorio que ofrecen, se designa con el nombre de **centelleo**.

2. **Las constelaciones** son grupos de estrellas que guardan entre sí una notable simetría, de suerte que nuestra imaginación las reúne por medio de líneas en un conjunto que ofrece a menudo una forma muy característica, como la ostentan la Osa Mayor, Casiopea, la Corona boreal, la Lira, la Cruz del Sur, Escorpión, y sobre todo Orión. (Las figuras humanas o de animales, etc., con que se representan en las cartas celestes, no existen en la bóveda celeste.)

La división y los pormenores sobre las estrellas y constelaciones se darán en el libro IX: fácil es intercalar aquí lo esencial, si el profesor lo juzga preferible.

3. **Astros no fijos**, en general, son aquellos cuyas distancias angulares, referidas a una estrella, son variables: reciben su luz del sol (planetas y cometas).

4. **Los planetas** son astros que giran alrededor del sol en órbitas elípticas, y por tanto son astros errantes, lo cual indica su nombre derivado del griego (πλανῶμαι, yo ando vagando); se presentan en el cielo con una luz recibida del sol; su brillo es tranquilo y no tiene el centelleo de las estrellas. He aquí los 8 planetas principales por el orden creciente de su distancia al sol: *Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno*.

Llamamos **satélites** (o lunas en general) aquellos astros que directamente giran alrededor de un planeta y por intermedio de éste en torno del sol.

Los espacios dentro de los cuales se hallan las órbitas de los planetas, llevan el nombre de **espacios planetarios**; su límite es, por lo tanto, en el estado actual de nuestros conocimientos, la órbita de Neptuno. Los espacios que están poblados por las estrellas, se llaman **siderales**.

5. **Los cometas** son también astros no fijos, pero de forma indeterminada: en el espacio que está al alcance de nuestra vista, se presentan ora como nebulosas, ora como cuerpos tanto más brillantes cuanto menor sea su distancia al sol. A menudo se componen de un núcleo muy luminoso y rodeado de una nebulosidad que se llama cabellera y se prolonga formando una cola más o menos larga.

6. Los pequeños cuerpos celestes que frecuentemente atraviesan la atmósfera terrestre, o caen cual estrellas del cielo sobre la tierra, se designan con los nombres de **estrellas fugaces, aerolitos y bólidos**.

II. Definición de la Cosmografía. La Cosmografía debe considerarse como formando parte de la astronomía, o mejor dicho,

como una introducción a esta ciencia: insiste, pues, más detenidamente en los principios fundamentales, usando métodos sencillos; resume, además, como en un compendio, los resultados que han obtenido los astrónomos por medio de investigaciones laboriosas y cálculos difíciles. La propiedad en que la cosmografía más particularmente se diferencia de la astronomía, es el estudio del globo terrestre considerado en su conjunto (geografía matemática), y la explicación de los fenómenos terrestres que se relacionan con los astros (geografía astronómica). Demos ahora las definiciones mismas:

1. **La Astronomía** (νόμοι, leyes) es la ciencia que enseña la posición relativa de los astros, las leyes que rigen sus movimientos complicados, y los detalles de su constitución física. Esta última parte forma hoy una ciencia nueva, llamada **Astrofísica**.

2. **La Cosmografía** (κόσμος, mundo; γραφή, descripción) es la ciencia que tiene por objeto el estudio *elemental* de los astros.

3. **La Uranografía** (οὐρανός, el cielo) se ocupa en la descripción y el estudio de las estrellas, con exclusión del globo terrestre; y lleva el nombre de **Uranometria** (medidas del cielo) cuando su objeto principal es determinar las coordenadas y la magnitud del brillo de las estrellas y deslindar las constelaciones, etc.

4. Antiguamente el estudio de los astros se designaba también con la palabra **Astrología** (λόγος, discurso), porque se observaban los movimientos y las posiciones de los planetas con el objeto supersticioso y ridículo de pronosticar buena suerte o desgracia a los hombres y en particular a los príncipes y grandes, por lo cual esta denominación, de por sí correcta, ya no se usa. El oficio de astrólogo, esto es, del hombre que pronosticaba por medio de sus cavilaciones sobre los astros, era considerado como uno de los más importantes de una corte.

CAPÍTULO SEGUNDO.

PLANOS Y ÁNGULOS FUNDAMENTALES.

La esfera celeste es una esfera hueca, de un radio inmenso, cuyo centro está en el ojo del observador, y en la cual nuestra imaginación supone colocadas las estrellas; pero no existe en realidad, sino que es efecto de una ilusión óptica. La recta ideal en cuyo torno parecen girar los astros, se designa con el nombre de **eje del mundo**; los puntos donde parece el eje penetrar en la esfera, se llaman **polos**: uno de ellos es el polo *Norte*, que tam-

bién se llama boreal o ártico; el otro es el polo *Sur* (austral o antártico). En las figuras se denotan estos puntos con las letras *P* y *P'*.

[**Observación.** La estrella más vecina al polo Norte es α (alfa) de la Osa Menor, de segunda magnitud y muy visible.

$$D = 88^{\circ} 43'; AR = 1^h 17^m.$$

Dista del polo $1^{\circ} 17'$.

En el hemisferio austral no existe ninguna estrella muy visible cerca del polo Sur; pero la estrella *B* de la constelación del *Octante* dista solamente $44'$ del polo, y σ (sigma) de la misma constelación $46'$.

Las coordenadas de *B* del Octante son:

$$D = 89^{\circ} 15' 44''; AR = 21^h 50^m 19^s.$$

Las coordenadas de σ son:

$$D = 89^{\circ} 14' 4''; AR = 19^h 19^m 42^s.$$

La primera es de sexta, la segunda de quinta magnitud, por lo tanto apenas visibles sin anteojos.]

En el presente capítulo se explican los planos y ángulos fundamentales que se refieren a la esfera celeste y son de suma importancia para todo el tratado; el alumno debe conseguir facilidad y exactitud en su inteligencia.

§ 9. ECUADOR. VERTICAL. HORIZONTES.

1. **El ecuador celeste** es el círculo máximo perpendicular al eje del mundo; se forma, pues, por la intersección de la esfera con un plano que pasa por su centro siendo perpendicular al eje del mundo; se denota con las letras *E* y *E'*. Este plano divide la esfera en dos hemisferios, uno boreal y otro austral. La traza del ecuador representa la intersección de éste con el meridiano, y es un *diámetro* perpendicular al eje del mundo.

2. **Los círculos paralelos** son círculos menores, paralelos al ecuador, y por lo mismo son perpendiculares al eje del mundo (fig. 12); sus trazas representan la intersección con el meridiano y son rectas paralelas al ecuador (fig. 12). Los paralelos más notables son los dos polares y los dos trópicos, de que se tratará en el § 36: estos cuatro círculos menores dividen la esfera celeste en cinco zonas; la zona media es la ecuatorial, comprendida entre los dos trópicos.

3. **Los círculos de declinación** son círculos máximos que pasan por el eje del mundo; son perpendiculares al ecuador y a los paralelos (fig. 20, *PCP'*). Se designan con este nombre porque sobre estos semicírculos se mide la declinación de una estrella. Cuando sirven para determinar el tiempo, también se llaman cír-

culos horarios. (Como en realidad la tierra gira sobre su eje, los horarios son propiamente los meridianos terrestres movibles, quedando fijos los círculos de declinación).

4. Se llama **vertical** de un lugar terrestre la prolongación del radio de la tierra que pasa por dicho punto, y se obtiene por medio de la plomada. El punto donde la vertical, prolongada hacia arriba, toca a la esfera celeste, se llama el **cenit**; el punto opuesto hacia abajo es el **nadir**.

5. Un **plano vertical** es todo plano que pasa por una recta vertical; para trazarlo en las figuras basta unir el cenit con el nadir por medio de una semi-circunferencia de un círculo máximo; o también, unir el cenit con un punto del horizonte por medio de un arco, y este punto con el pie de la vertical. El plano vertical de una estrella es aquel que se dirige hacia la estrella, por ejemplo con auxilio del círculo vertical del teodolito.

6. La **normal** de un punto de observación es la recta perpendicular a un plano que es tangente en este punto a la superficie terrestre. (Si la tierra fuese perfectamente esférica, la normal coincidiría con la vertical.)

7. Un **plano horizontal** es todo plano perpendicular a la dirección de la gravedad: se determina por medio de niveles, según se enseña en Física.

8. **Horizontes.** La palabra *horizonte* se deriva del griego $\delta\acute{o}\rho\iota\zeta\omega$ (yo limito), porque el horizonte vulgar limita para un observador la parte visible de la superficie terrestre. En realidad hemos de distinguir varios horizontes, y sus definiciones han de ser muy familiares al alumno. La fig. 3 sirve para la explicación.

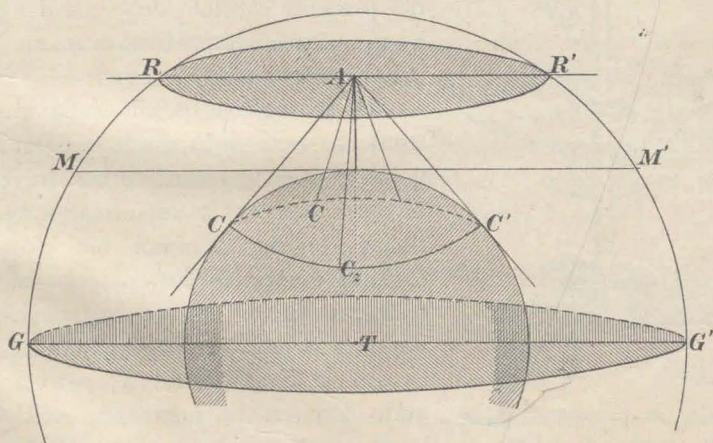


Fig. 3. Horizontes.

a) **Horizonte visible.** Al dar una vuelta completa un observador A , colocado en algún punto elevado, un rayo visual AC que sea tangente a la superficie terrestre, formará una superficie cónica; la curva CC' que une los puntos de contacto, se llama horizonte visible o aparente. Los astros que pueden verse, son aquellos que se hallan encima de este horizonte.

b) **El horizonte matemático** es un plano tangente a la superficie terrestre en el punto de observación; su traza MM' es perpendicular a la normal correspondiente.

c) **El horizonte racional** es un plano perpendicular a la vertical del lugar y que pasa por el ojo del observador: corta a la esfera celeste formando un círculo máximo que se llama horizonte verdadero; su traza es RR' , sensiblemente paralela al horizonte matemático.

Nota. Para los astrónomos los astros salen y se ponen en verdad cuando traspasan el horizonte verdadero; el horizonte aparente es incómodo para determinar esos momentos, porque varía con la altura en que se halla el observador. Síguese que la salida aparente de un astro precede a la verdadera, mientras que la puesta verdadera precede a la aparente. Un astro es visible al encontrarse entre el horizonte aparente y el verdadero, pero los astrónomos refieren sus observaciones a este último.

d) **El horizonte geocéntrico** ($\gamma\eta$, la tierra) es un plano paralelo al horizonte matemático y que pasa por el centro de la tierra ($G G'$).

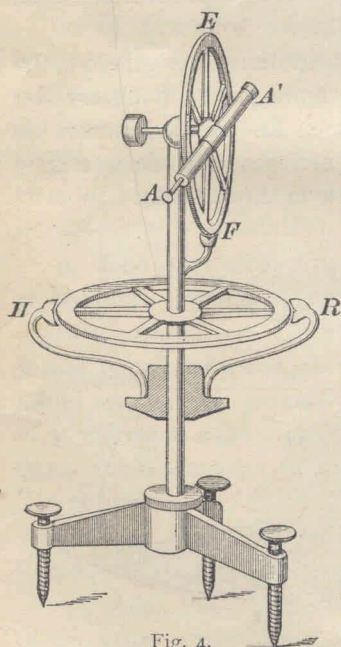


Fig. 4.
Esquema del teodolito.

§ 10. EL TEODOLITO Y EL ECUATORIAL.

Antes de proseguir en la materia del presente capítulo debemos dar unas breves explicaciones sobre estos dos instrumentos.

El **teodolito** es sin duda el instrumento más indispensable del astrónomo y del ingeniero; se construye en diversos tamaños y de formas muy variadas; la fig. 4 ofrece tan sólo los órganos esenciales. Se compone el instrumento de un eje vertical sostenido por una peana con tres pies: este eje es una columna metálica; pero a menudo hay en su lugar dos columnas laterales para sostener el antejo; el eje

atraviesa en el centro un círculo horizontal HR , que suele llamarse azimutal, graduado en 360° . En la parte superior del instrumento hay un círculo vertical EF , que está provisto, en dirección del diámetro, de un anteojo AA' , móvil en torno del eje que sostiene al círculo vertical; por lo tanto las divisiones que señala el limbo del círculo vertical indican el ángulo que forma el eje óptico del anteojo con la vertical señalada por el eje del teodolito. Varios niveles y tornillos sirven para obtener la posición horizontal del círculo inferior, al cual el eje del instrumento (por construcción) debe ser perfectamente perpendicular. El círculo horizontal lleva una aguja o *alidada* fija en el eje vertical; sigue, pues, los movimientos de éste e indica en el limbo el ángulo que se ha hecho girar, de derecha a izquierda o vice versa, el círculo vertical y el anteojo, midiendo de esta manera el ángulo diedro que forman entre sí dos planos verticales. Para servir como instrumento de precisión está provisto de órganos accesorios, de cuya explicación prescindimos.

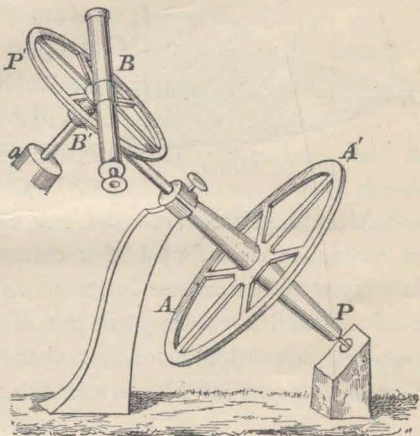


Fig. 5. Ecuatorial.

Nota. En cuanto al significado de la palabra teodolito hay divergencia de opiniones; la etimología más natural parece ser la siguiente derivación del griego: *θεά*, observación; *ὁδός*, camino (dirección); *λίθος*, piedra, porque el instrumento tenía una peana de piedra, o porque la dirección se indicaba por columnas de piedra (obelisco).

El **ecuatorial** o la máquina paraláctica (fig. 5) es un instrumento que puede considerarse como un gran teodolito cuyo eje, en lugar de ser vertical, sigue la dirección de la línea de los polos PP' . El círculo AA' perpendicular al eje representa el ecuador celeste en cuyo plano se halla; el círculo BB' es móvil en torno del eje del mundo PP' y representa un círculo horario¹.

§ 11. ALTURA Y DISTANCIA CENITAL DE UN ASTRO.

Para que un astro sea visible debe estar encima del horizonte, prescindiendo de la refracción atmosférica; la medida de esta ele-

¹ En los observatorios el ecuatorial tiene una forma muy distinta del esquema que presenta la fig. 5.

vación se llama altura. Diremos, pues, que **la altura de un astro es el ángulo que forma el rayo visual, dirigido a su centro, con su proyección sobre el plano del horizonte.**

Represente KHM (fig. 6) una parte del horizonte y ZH un arco del meridiano: el ángulo que la visual OC forma con el horizonte, es la altura de la estrella C ; pero este ángulo se mide por el ángulo que forma la recta OC con su proyección OH sobre el plano mencionado,

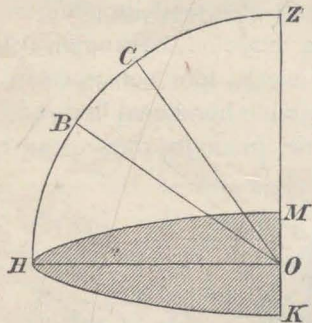


Fig. 6. Altura.

luego el ángulo COH es la altura y se mide por el arco CH que le corresponde. En la práctica se calcula este arco por medio de la distancia cenital. Cuando la tierra no puede considerarse como un punto, lo que sucede con la altura del sol, debe referirse la observación al horizonte geocéntrico con el auxilio de una corrección que veremos en el § 19.

Altura meridiana del sol es la altura que tiene el astro en el momento de su paso por el meridiano. Llámase **culminación** la mayor altura a que llega un astro en su movimiento diurno, la cual se realiza en el paso por el meridiano. Las estrellas circumpolares pasan dos veces por el meridiano: el paso superior corresponde a la mayor altura meridiana, y el inferior a la menor¹.

Las alturas se miden en grados, etc., y no deben confundirse con la distancia de los astros al observador, la que permanece constante en un día, siendo las alturas variables para un mismo astro.

[Los círculos de altura o **almicantárad**as son círculos menores y paralelos al horizonte; todos los puntos de un mismo círculo tienen la misma distancia cenital; los que están debajo del horizonte miden la depresión de las estrellas.]

La distancia cenital de un astro es el ángulo que forma la vertical del punto de observación con el rayo visual dirigido al centro del astro. Para medirla se pone el círculo vertical del teodolito en el plano que corresponde a la posición del astro y se le dirige la visual con el antejo: en el limbo del mismo círculo se lee el ángulo que forma la visual con el eje del instrumento, con lo cual se obtiene la distancia cenital. En cuanto a los astros que

¹ Este inciso debe entenderse bien; conviene explicarlo después de haberse visto las propiedades del meridiano. El cambio en la altura es insignificante en la vecindad del meridiano.

ofrecen un diámetro aparente apreciable (el sol, la luna, etc.), se miden las distancias cenitales de las orillas superior e inferior, y la semisuma dará la distancia cenital del centro. Se cuentan los grados empezando desde el cenit hasta 180^0 : si el número es mayor que 90^0 , el astro está debajo del horizonte.

Ejercicios numéricos. Siendo la distancia cenital $11^0 40'$, ¿cuál es la altura del sol?

$$a = 90^0 - 11^0 40' = 89^0 60' - 11^0 40'.$$

Si la altura de un astro es 60^0 , ¿cuál es su distancia cenital?

$$z = 90^0 - 60^0.$$

Deben hacerse estos ejercicios sencillos, para que el alumno tenga facilidad en ellos y claridad en estas dos nociones.

Si en virtud de un cálculo cualquiera resultase que la distancia cenital fuese de 95^0 , por ejemplo, esto significaría que el astro está 5^0 bajo el horizonte: sería, pues, invisible en este caso.

Corolario. *La altura del astro se calcula restando de 90^0 la distancia cenital observada con auxilio del teodolito o del círculo mural.* (Los dos ángulos son complementarios; el eje del teodolito bien nivelado señala directamente la vertical.)

Habitualmente se emplea este método para medir la altura, por ser difícil la determinación exacta del horizonte.

En alta mar se determina directamente la altura del sol para calcular su distancia cenital, empleando a este fin un instrumento que se llama el *sextante*.

§ 12. REFRACCIÓN ATMOSFÉRICA. SUS EFECTOS.

Proposición. *Por la refracción atmosférica los astros no aparecen en su verdadera posición: por lo tanto debe hacerse la debida corrección en la altura y la distancia cenital observada.*

Siempre que un rayo luminoso pasa oblicuamente de un medio a otro, sufre un desvío de su dirección primitiva en conformidad con las leyes que se demuestran en Física. El rayo se acercará a la normal trazada en el punto de incidencia, cuando el segundo medio es más refringente que el primero; en el caso contrario se apartará de ella. Sábese que el aire es tanto más refringente, en general, cuanto mayor sea su densidad. Con razón podemos considerar nuestra atmósfera como compuesta de un gran número de capas concéntricas de aire cuyas densidades van creciendo desde el límite superior de la atmósfera hasta la superficie terrestre. Consideremos ahora en la fig. 7 la marcha de un solo rayo luminoso

que, viniendo de una estrella E , penetra en nuestra atmósfera, y para mayor sencillez supongámosla dividida tan sólo en dos capas de diferente densidad. Un rayo luminoso que viene del astro E llega del vacío cósmico oblicuamente al punto m de la atmósfera; al penetrar en la primera capa se acerca a la normal Tm siguiendo la dirección mc ; en el punto c penetra en otra capa más refringente, se refracta y se acerca a la normal Tc tomando la dirección hacia O . El ojo del observador colocado en O lo recibe para proyectar la visual en esta última dirección Oc , y resulta que el astro parece estar en B y no en su verdadera posición E . En realidad el rayo luminoso sufre un número tan crecido de refracciones sucesivas, que su trayectoria no solamente es una línea quebrada, sino que se acerca más bien a una línea curva: dirigimos la visual en

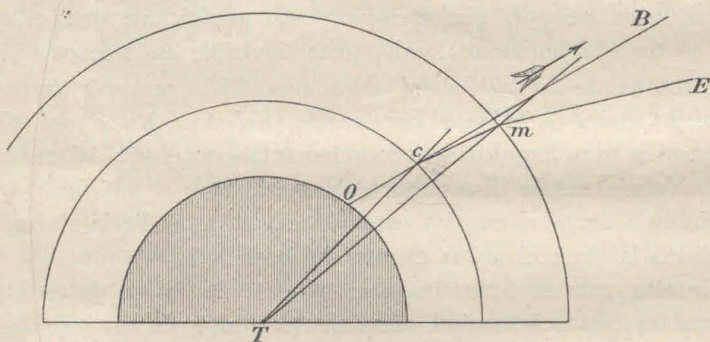


Fig. 7. Refracción atmosférica.

forma de una tangente de esta curva. Consideremos ahora algunos fenómenos relacionados con la refracción atmosférica.

I. Corrección de la altura de un astro. Por la explicación dada se comprende que en virtud de la refracción los rayos luminosos *se elevan en su plano vertical*, de donde resulta que la altura observada es mayor que la verdadera: por lo tanto debe hacerse la conveniente corrección. El error será tanto mayor cuanto más oblicuos sean los rayos incidentes y cuanto más espesa sea la capa atravesada; el desvío de la verdadera posición, producido por las dos causas, será máximo en el horizonte y nulo cerca del cenit; también resulta que los astros sufren un cambio desigual en sus distancias angulares. *Laplace* ha construido tablas en que se indica el desvío medio para todas las alturas aparentes: por ejemplo, cerca del horizonte el desvío es de $33'$; pero a 26° de altura es tan sólo de $2'$, por lo cual los astros no suelen observarse en la vecindad del horizonte. Para obtener, pues, la altura

verdadera a , la refracción A debe *restarse* de la altura observada a' , y tenemos que

$$a = a' - A.$$

$$\text{Ejemplo: } a = 20^0 - 2' = 19^0 58'.$$

Tratándose de la *distancia cenital*, la refracción A debe *sumarse* con la observada:

$$z = z' + A.$$

La manera de referir la altura al centro de la tierra se explicará en otro párrafo.

II. Otros efectos de la refracción atmosférica.

1. Por la refracción un astro cambia de lugar, pero no sale fuera de su plano vertical, y por lo tanto tampoco se alteran ni su azimut ni la hora de su paso por el meridiano ni su ascensión recta. En cambio deben corregirse, además de la altura, *la declinación* y la distancia polar del astro, ya que sus medidas dependen de la altura meridiana.

2. La **deformación** que presenta el disco del sol y el de la luna al hallarse cerca del horizonte, es efecto de la refracción: en su virtud la orilla inferior resulta más elevada que la superior, y el diámetro vertical sufre una disminución quedando inalterado el horizontal; de esta manera el disco ofrece una forma ovalada.

3. *Los astros* que tienen un diámetro aparente sensible, *nos parecen más grandes en el horizonte* que en cierta altura; este fenómeno es debido a una ilusión óptica y no a la refracción atmosférica. Estando el sol en horizonte nos parece situado a mayor distancia y por lo mismo de mayor tamaño que al hallarse cerca del cenit, a causa de los objetos intermedios que sirven de puntos de comparación. La ilusión desaparece si observamos él astro a través de un tubo o de un agujero practicado en una tarjeta, porque de esta manera los objetos intermedios no son visibles.

4. **Salida y puesta del sol.** Cuando la orilla inferior del sol parece tocar al horizonte, el astro en realidad está todavía debajo del horizonte, tocando este plano *la orilla superior*. Como el diámetro aparente del sol tiene unos $33'$, se comprende que todos los puntos del disco *se elevan* unos $33'$ de arco, que es precisamente el valor de la refracción atmosférica en el horizonte, y se hará completamente visible al observador, aunque su orilla superior no más toque al horizonte. Lo mismo sucede en orden invertido por la tarde a la puesta del sol. Por esta causa el día se alarga unos 5^m , que es precisamente el tiempo que tarda el sol en recorrer $33'$ de

arco al salir y otros tantos al ponerse: de esta manera se prolonga algo la claridad del día.—En virtud de la refracción un eclipse puede ser visible aun después de ponerse el sol.

En cuanto al **crepúsculo**, este fenómeno no es debido a la refracción atmosférica, sino a la iluminación directa de las capas superiores del aire, al hallarse el sol a pocos grados debajo del horizonte. Este fenómeno se explicará en el libro V.

5. **Centelleo.** Es un hecho conocido que las estrellas fijas parecen estar en una especie de movimiento oscilatorio continuo y sujetas a una agitación rápida, de suerte que un observador nunca las ve fijas en un mismo punto, sino que recibe la impresión de que aparecen y desaparecen con rápida alternación. Es de notar que este fenómeno del centelleo se verifica de una manera más marcada al hallarse las estrellas en la vecindad del horizonte y al estar el aire agitado. No existe una teoría del todo satisfactoria; según la opinión más probable, este fenómeno es debido a la desigual refracción que sufre la luz en las diferentes capas atmosféricas, que en virtud de la rotación terrestre pasan con gran rapidez por el espacio que hay entre la estrella y el observador. Los planetas no centellean, porque se nos presentan con un diámetro aparente suficiente para que puedan neutralizarse los efectos provenientes de los diferentes puntos de su superficie. (El distinguido astrónomo *Arago* explica el centelleo como efecto de la interferencia.)

§ 13. EL MERIDIANO CELESTE.

La palabra *meridiano* se deriva del latín *meridies*, que significa mediodía, y se ha adoptado este nombre porque es mediodía verdadero cuando el centro solar está en este plano.

Definición. *El meridiano es un plano vertical que pasa por el eje del mundo.*

Propiedades. En virtud de la definición, este plano astronómico, que es sin duda el más importante de todos, tiene las propiedades siguientes:

1. Es perpendicular al ecuador y al mismo tiempo al horizonte del lugar, porque pasa por el eje del mundo y la vertical, respectivamente perpendiculares a esos dos planos.
2. Su intersección con la esfera celeste forma una circunferencia de círculo máximo, por ser el eje del mundo un diámetro: se representa sobre el papel por un círculo en cuya circunferencia se denotan los polos y el cenit.

3. El meridiano divide en dos arcos iguales las órbitas que describen los astros en su movimiento general diurno, porque es un círculo máximo perpendicular al ecuador, y las órbitas son paralelas al ecuador.

4. Este plano lleva la dirección Norte-Sur.

5. Para un mismo punto de observación es fijo e invariable (por serlo la vertical); pero los meridianos de diferentes puntos forman entre sí ángulos diedros cuya arista es el eje del mundo.

6. No deben confundirse los meridianos con los círculos de declinación; éstos, en 24 horas, pasan todos sucesivamente por un mismo meridiano.

7. En la vecindad del meridiano la altura de un astro es casi invariable por ser la trayectoria sensiblemente paralela al horizonte.

La meridiana es la traza, o sea la línea de intersección que forma el meridiano con el horizonte; la dirección que lleva hacia el polo boreal, se llama Norte; la opuesta es el Sur. Cuando el observador mira el 21 de marzo o 22 de septiembre hacia el punto por donde sale el sol, tiene el Norte a su izquierda. Un muro está *orientado* si es perpendicular a la meridiana, porque sigue con exactitud la dirección de Este a Oeste.

Veamos ahora dos métodos fáciles que se emplean para determinar la posición del meridiano en un punto de observación. (En muchos casos la propiedad 7ª arriba mencionada ayuda para conocer la dirección del meridiano.)

1. **Método de las alturas correspondientes.** La operación se efectúa con el teodolito, disponiendo el instrumento de suerte que su eje esté bien vertical, lo que se consigue haciendo coincidir el círculo inferior con el horizonte por medio de los niveles. En la descripción que sigue, nos referimos a la fig. 8, en qué el arco AZA' pertenece a un paralelo celeste *cualquiera*. (En este caso la letra Z no significa cenit.)

Dirigida la visual a una estrella A en el Oriente, el plano del círculo vertical R pasa por la estrella, y su intersección con el horizonte será indicada por la alidada del círculo horizontal, donde marcará cierta graduación, v. g. 30^0 , siendo la recta Oa su traza. Para conservar la dirección de la visual se fija el anteojo por medio de un tornillo de presión. Entre tanto se levantará el astro a cierta altura para descender, *después de su culminación*, hacia el Poniente. Hagamos girar el anteojo y el círculo vertical juntamente con el eje de la columna vertical hasta que la visual vuelva a encontrarse con la misma estrella, en A' ; en este momento el astro se halla

a la misma altura que antes, pero en el Occidente, y la traza del plano marcada por la alidada sea Od' ; supongamos que la alidada señale 150° .

Tenemos ahora un ángulo diedro $AOZA'$ formado por dos planos verticales de alturas correspondientes; este diedro se mide por su rectilíneo aOd' . Para obtener la bisectriz OM en grados,

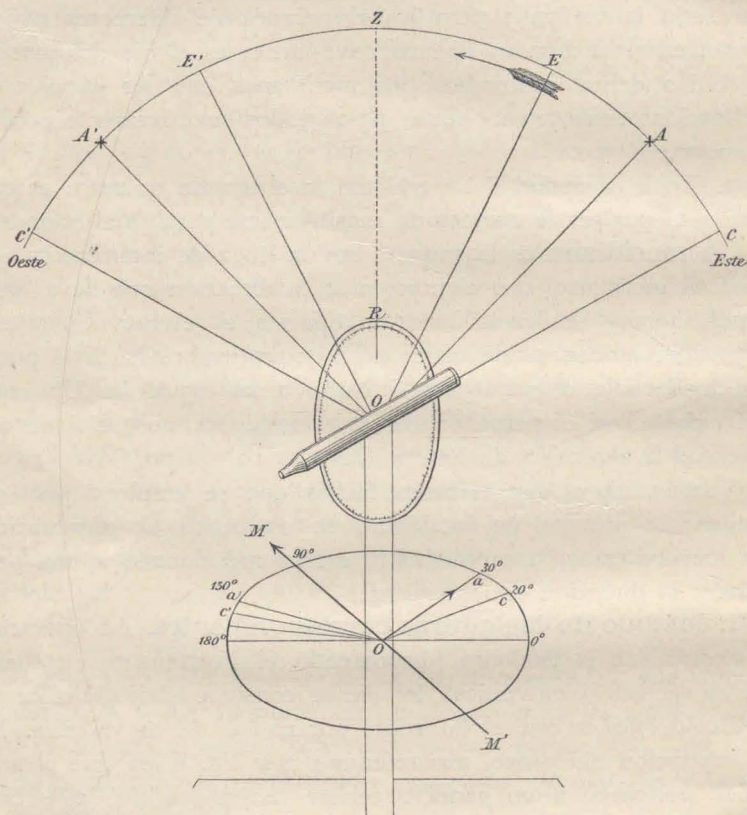


Fig. 8. Determinación del meridiano.

divido la suma $30 + 150$ por 2, lo que da 90° , que equidista de a y a' en 60° : esta bisectriz es la *meridiana* del lugar. Basta colocar el círculo vertical del teodolito en la dirección de esta bisectriz para obtener el meridiano. En la práctica se repite esta operación con referencia a otras estrellas y se obtienen así varios ángulos que tienen una misma bisectriz OM , lo que da mayor exactitud a la operación.

Las operaciones no deben hacerse cuando la estrella se encuentra cerca del horizonte, por ser considerable la refracción

atmosférica en esta región, tanto más cuanto que habitualmente la neblina es más densa en las horas de la mañana que en las de la tarde.

*[*Debemos demostrar que el plano vertical que pasa por la bisectriz OM , pasa también por el eje del mundo.*

1. Este plano es bisector del diedro $AOZA'$ de las alturas correspondientes, por ser el rectilíneo $aOM = a'OM$: luego $AZ = A'Z$.

2. A su vez este plano bisector forma, en su prolongación, un círculo de culminación, de suerte que Z equidista del horizonte: porque $AH = A'H'$ (por definición); sumándolo con $AZ = A'Z$ resulta que $HZ = H'Z$; luego Z es el punto de culminación. (Denotamos por H y H' los puntos donde el arco AA' toca al horizonte.)

3. Siendo este plano un círculo de culminación, divide al paralelo en dos arcos iguales, y por lo tanto contiene su centro, el cual

está sobre el eje del mundo, como sabemos; y como círculo vertical pasa por el centro de la esfera celeste.

Resulta que el plano vertical que pasa por la bisectriz OM , contiene dos puntos situados sobre el eje del mundo, y por consiguiente pasa por esta recta y satisface a la definición del meridiano: se evidencia de esta manera que la bisectriz OM es la meridiana del punto de observación.]

2. **Método del gnomon.** Aunque este método no ofrece la misma exactitud que el anterior, por variar algo la declinación del sol, es sin embargo para muchos casos prácticos suficiente, además de ser más sencillo; el principio en que se funda es el mismo que el anterior: se reduce a determinar por medio de la sombra las alturas correspondientes del sol (fig. 9).

Sobre un tablero o una plancha de mármol se trazan varias circunferencias concéntricas y en su centro común fíjase un estilo

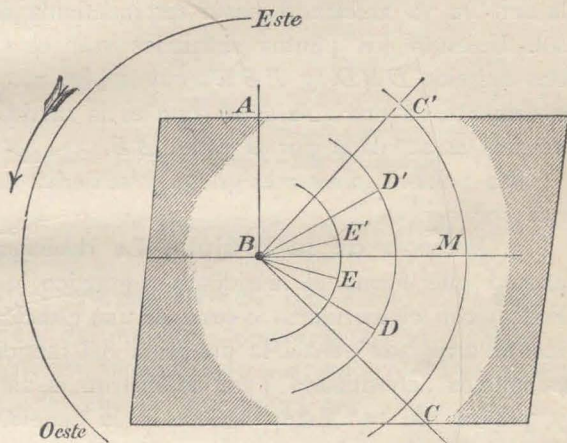


Fig. 9. Método del gnomon.

AB (una aguja de tejer), poniéndolo bien perpendicular al plano del tablero. Éste se coloca en posición exactamente horizontal sobre un pilar en un sitio despejado y accesible al sol. Sea el arco indicado por la flecha el diurno que describe el sol de Este a Oeste. Al salir el astro en el Este, la sombra BC proyectada por el estilo es indefinida, dirigiéndose hacia el Occidente; más tarde la extremidad de la sombra caerá sucesivamente sobre un punto de las circunferencias y va disminuyendo en la mañana; marquemos dos, D y E . Por la tarde habrá momentos en que la extremidad de la sombra volverá a caer a las mismas circunferencias, en los puntos correspondientes E' y D' hacia el Este; la sombra va creciendo hasta ser indefinida BC' a la puesta del sol. Uniendo los puntos señalados con el centro B obtenemos dos ángulos DBD' y EBE' , cuyas bisectrices se confunden sensiblemente en una sola BM , que es la meridiana del lugar, cuya vertical es señalada por el estilo AB .

(La palabra *gnomon* es griega y se deriva de un verbo que significa conocer.)

3. **Método de la brújula.** La declinación magnética es el ángulo que forma el meridiano magnético (de que se trata en la Física) con el meridiano celeste de una estación; la brújula debidamente arreglada señala la dirección del meridiano magnético. Supongamos determinado para un distrito el valor de la declinación y que sea de 15° Este: síguese de la definición que la meridiana está 15° hacia el Poniente de la dirección señalada por la brújula. (Este valor se publica en el observatorio del país respectivo.)

§ 14. EL EJE DEL MUNDO. DISTANCIA CENITAL Y ALTURA DEL POLO. ✕

La definición del meridiano manifiesta que el eje del mundo se halla en este plano, lo cual nos proporciona un medio para determinar la **dirección del eje del mundo**. A este efecto se coloca el círculo vertical del teodolito en el meridiano fijándolo en esta posición con un tornillo. Debemos ahora determinar la recta que indica en este plano la dirección del eje del mundo, recordando que las estrellas en su movimiento diurno describen círculos cuyos centros están en el eje. En la fig. 10 sea el círculo un meridiano y la circunferencia su traza en la bóveda celeste; el círculo interior representa el vertical del teodolito. Observemos sucesivamente el paso superior OC y el inferior OC' de una estrella circumpolar por el meridiano midiendo en el limbo el ángulo COC' ,

y repetamos la operación sobre varias estrellas circumpolares. Los ángulos COC' , DOD' , etc. obtenidos tienen una bisectriz OP común, la cual indica la dirección que lleva el eje del mundo.

La distancia cenital del polo es el ángulo que

forma la vertical del punto de observación con el eje del mundo. En la fig. 10 lo es el ángulo ZOP o su arco ZP .

Por ser invisible el punto P , el ángulo ZOP se mide fundándose en el siguiente teorema: *La distancia cenital del polo es igual a la semisuma de las distancias cenitales de una estrella circumpolar en sus pasos superior e inferior por el meridiano.*

Para la demostración debemos recordar que $CP = C'P$.

(Por definición el eje del mundo es perpendicular al ecuador y por lo mismo a los círculos menores que son paralelos al ecuador; luego también lo es a las cuerdas que pasan por su pie: siendo, pues, este eje un diámetro perpendicular a la cuerda, divide al arco CC' en dos partes iguales.)

$$ZP = ZC + CP$$

Por otra parte

$$ZP = ZC' - CP$$

$$\text{Sumando resulta que } ZP = \frac{ZC + ZC'}{2},$$

que es la semisuma mencionada.

La medida de las distancias cenitales ZC y ZC' se efectúa con el teodolito y la suma de los ángulos se divide por 2: esta cantidad es invariable para un lugar determinado.

La altura del polo es el ángulo que forma el eje del mundo con su proyección sobre el horizonte de una estación y se obtiene restando de 90° la distancia cenital del polo. Veremos que es igual a la latitud geográfica del lugar. Debe tenerse presente que la altura del polo PH es siempre igual a la distancia cenital del ecuador EZ , porque los dos ángulos tienen el mismo complemento ZP .

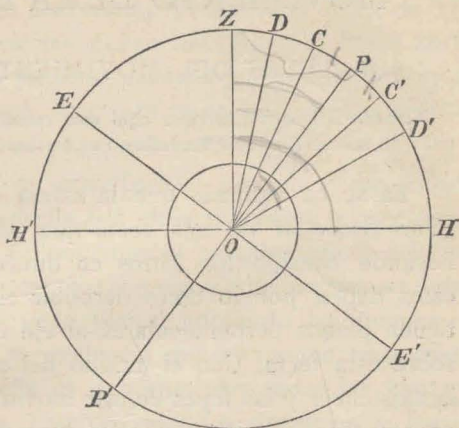


Fig. 10. Eje del mundo.

CAPÍTULO TERCERO.

MOVIMIENTO DE LA ESFERA CELESTE.

§ 15. LEYES DEL MOVIMIENTO GENERAL DIURNO.

Nota. Debemos intercalar aquí esta cuestión porque la medida de la ascensión recta de las estrellas está fundada en el movimiento de la esfera celeste.

Ya se ha indicado que la esfera celeste en su conjunto *parece* girar alrededor de una recta que pasa por el ojo del observador llevando consigo los astros en dirección del Oriente al Poniente; éstos deben por lo tanto describir circunferencias de círculos que tienen planos perpendiculares al eje del mundo y centros situados sobre esta recta. Con el auxilio del ecuatorial podemos comprobar la existencia y las leyes de este movimiento, del cual demostraremos en otro libro que es tan sólo aparente y que las leyes afectan la rotación de la tierra.

1ª ley. El movimiento general diurno de los astros es circular. Para comprobarlo se coloca el eje del ecuatorial en la dirección de la línea de los polos; se da vuelta al círculo superior y al anteojo para dirigir la visual a una estrella circumpolar; y se fija la posición del círculo de manera que el anteojo conserve esta dirección. Para seguir el curso de la estrella, basta ahora hacer girar el eje del instrumento; el rayo visual describirá un cono circular en torno del eje del mundo. Como la distancia de la estrella no cambia, deducimos que el astro describe una circunferencia de círculo cuyo centro está en la línea de los polos y cuyo plano es perpendicular a la misma por serlo el círculo inferior del instrumento.

2ª ley. La velocidad angular de movimiento diurno es uniforme, esto es, en tiempos iguales todas las estrellas recorren el mismo número de grados en la circunferencia que es su trayectoria aparente. Para comprobarlo con el ecuatorial se pone en juego un mecanismo del instrumento; por el círculo inferior entra en comunicación con un reloj que le imprime un movimiento uniforme. Primero se dirige la visual a una estrella fijando el anteojo en esta posición, y en seguida se establece la comunicación del círculo inferior con el reloj, de suerte que el aparato gira sobre su eje: entonces se verificará que la alidada, moviéndose juntamente con el anteojo que sigue a la estrella, señala arcos iguales en tiempos iguales; luego el movimiento es uniforme.

3ª ley. La velocidad lineal, esto es, la longitud métrica que las estrellas *parecen* recorrer en la unidad de tiempo, **no es la misma para todas las estrellas**; porque los arcos de 15^0 de los diferentes paralelos celestes tienen una longitud lineal tanto mayor cuanto más cercanos estén al ecuador y deben no obstante recorrerse en el mismo tiempo: por esta causa las estrellas vecinas al polo nos parecen andar tan despacio.

4ª ley. El día sideral es constante. Llamamos día sideral el tiempo que emplea una estrella fija entre dos pasos consecutivos por el meridiano del lugar. Coloquemos el círculo vertical del teodolito en el meridiano y observemos durante varias noches seguidas el paso de las estrellas por este plano, anotando los momentos que señale el reloj sideral: se evidencia que el tiempo transcurrido entre dos pasos de una estrella es el mismo para todas las demás y que este tiempo es invariable. Este día sideral se divide en 24 partes iguales, que son las horas, y comienza con la culminación de una estrella determinada, contándose las horas sin interrupción de 0 a 24. En otro tratado veremos que el día solar es más largo que el sideral.

Podemos ahora dar una definición exacta del movimiento general diurno, diciendo que es el movimiento de la esfera celeste que gira en un día sideral alrededor de un eje inmóvil en forma circular y de una manera uniforme.

En el libro V se darán más detalles sobre el día sideral.

§ 16. ASPECTO DEL CIELO A DIFERENTE LATITUD.

Si un viajero se dirige desde Londres o Nueva York hacia el Cabo de Hornos, observará durante el trayecto notables cambios en el aspecto que presenta el cielo: algunas estrellas que en los primeros días estaban elevadas sobre el horizonte, desaparecen poco a poco por completo a causa de la forma esférica de la tierra; pero en compensación descubre constelaciones australes que antes eran invisibles. Para dar alguna explicación de este fenómeno distingamos tres estaciones de diferente latitud en donde nos imaginamos colocados. Las palabras «esfera recta, paralela y oblicua», con que se designan los tres casos, se refieren a la posición que tienen los círculos paralelos con respecto al horizonte del observador.

1. **Esfera recta** (fig. 11): el observador se halla sobre el ecuador. En los países ecuatoriales el observador O tiene por horizonte un plano PP' que pasa por el eje del mundo y es perpendicular al

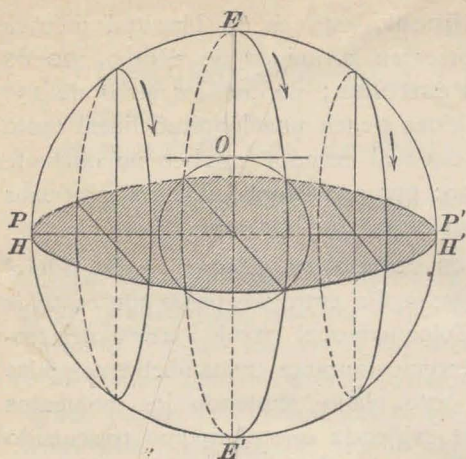


Fig. 11. Esfera recta.

2. **Esfera paralela** (fig. 12): el observador está colocado en el polo. En este caso el cenit del observador O se halla en el polo celeste P , que es inmóvil, y el plano de su horizonte coincide con el ecuador celeste: por consiguiente la vista no puede descubrir estrellas del hemisferio Sur (prescindiendo de la refracción); pero en cambio las estrellas del hemisferio boreal tienen sus órbitas encima del horizonte y por consiguiente no salen ni se ponen nunca. Una estrella que está en la vecindad del ecuador, describe un círculo máximo en 24 horas recorriendo el horizonte, mientras que en el mismo tiempo la estrella polar, que dista $1^{\circ} 8'$ del polo, describe un círculo mínimo.

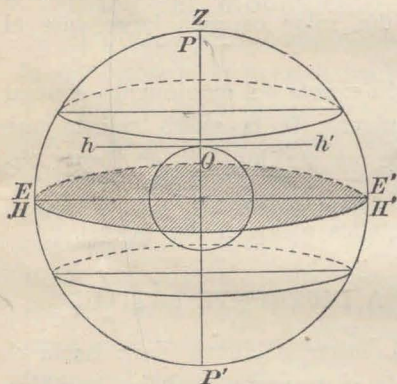


Fig. 12. Esfera paralela.

3. **Esfera oblicua** (fig. 13). Consideremos finalmente la posición del observador entre el círculo polar y el ecuador, por ejemplo en el punto O , de unos 48° latitud boreal (París): por lo tanto el cenit estará en el paralelo celeste que tiene 48° ; desde este paralelo hasta el horizonte hay 90° en todas las direcciones, y por lo tanto la mirada alcanza hasta 42° al Sur del ecuador celeste. Los planos del ecuador y de los paralelos forman con el horizonte sendos ángulos de 42° . Para conocer la extensión de las órbitas visibles que alcanza el observador en esa latitud, basta examinar

ecuador celeste EE' , que toca al cenit en E y al nadir en E' . Todas las estrellas describen sobre el horizonte la mitad de paralelos en el cielo, los que serán de tanta mayor extensión cuanto más cercanos sean al ecuador, y *tienen sus planos perpendiculares al horizonte*: la vista abarca la mitad del hemisferio boreal y la mitad del austral; no hay estrellas circumpolares; la estrella polar toca sensiblemente al horizonte.

Una estrella que está en la vecindad del ecuador, describe un círculo máximo en 24 horas

las trazas marcadas en la fig. 13; del ecuador se ve la mitad, porque el horizonte lo divide en dos partes iguales; en dirección del ecuador hacia el Norte aumenta la parte visible de las órbitas; las estrellas del paralelo 42° no se ponen sino que tocan el horizonte para volver a elevarse; desde el paralelo 43° las estrellas describen círculos completos en torno del polo. Por otra parte las estrellas del paralelo 42° Sur tocan en un punto el horizonte para volver

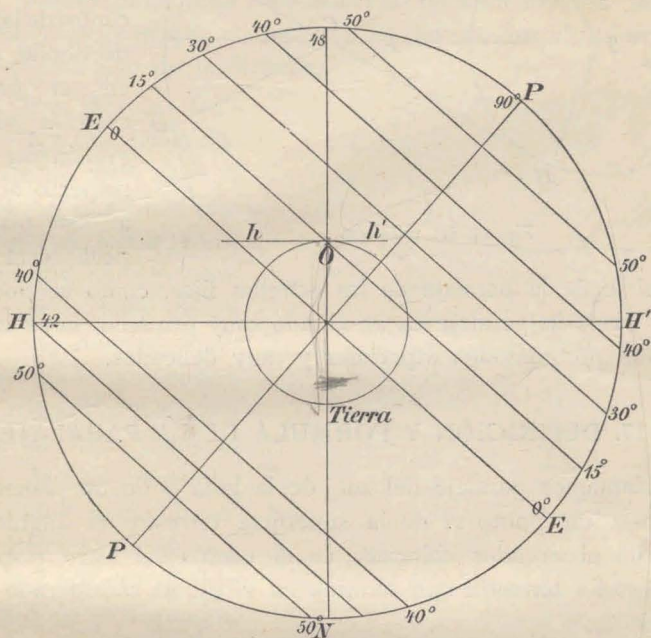


Fig. 13. Esfera oblicua.

a ponerse; desde el paralelo 43° todas las estrellas situadas al Sur del ecuador celeste son invisibles.

Movimiento directo y retrógrado, véase § 57.

CAPÍTULO CUARTO.

LA PARALAJE Y SUS APLICACIONES.

La palabra «paralaje» se deriva del griego y es compuesta de παρά (a un lado) y ἀλλαξίς (cambio): significa, pues, cualquier cambio aparente de un punto que se origina por el cambio de la posición real del observador. En la fig. 14 sean *A* y *B* dos observadores; *C* el centro de la luna. El observador *A* proyectará el punto *C* sobre la bóveda celeste en dirección *CD*, y el observador *B* en

la dirección CE . El arco ED mide el ángulo m , y éste es igual al ángulo p , que es la paralaje o sea el ángulo bajo el cual se

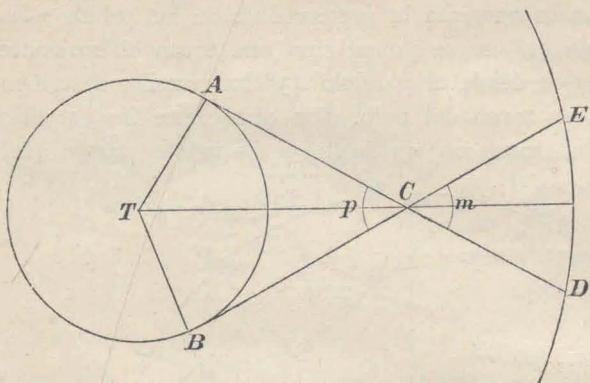


Fig. 14. La paralaje.

observan A y B desde el centro C .

En astronomía las observaciones suelen referirse al centro de la tierra, de donde resulta en el presente caso la *paralaje geocéntrica* con respecto al sol y a los planetas; pero ésta debe

distinguirse de la paralaje de las estrellas fijas, como veremos: en los dos casos la paralaje es un ángulo muy pequeño, cuya medida se efectúa por métodos especiales y muy delicados.

§ 17. DEFINICIÓN Y FÓRMULA DE LA PARALAJE.

1. Llamamos paralaje del sol, de la luna o de un planeta con respecto a un punto A de la superficie terrestre el ángulo bajo el cual un observador colocado en el centro del astro respectivo vería el radio terrestre que termina en el punto considerado de la superficie.

Ejemplo. Al decir que la paralaje del sol es $8'',80$, significamos que un observador colocado en el centro solar vería el radio terrestre bajo un ángulo de $8'',80$. Distinguimos la paralaje horizontal (estando el astro en el horizonte del observador), y la paralaje de altura.

2. **Paralaje horizontal:** $p = \frac{R'}{d}$. **Demostración ele-**

mental. Sea S (fig. 15) el centro del sol, C el de la tierra, A el punto de observación. El plano determinado por estos tres puntos corta la tierra considerada esférica según el círculo máximo de la figura; en este caso el ángulo $ASC = p$ es la *paralaje horizontal* si el sol está en el horizonte de A .

Denotemos la distancia entre el centro de la tierra y el del sol con $d = CS$, y con $R' = AC$ el radio terrestre. Con un radio SN igual a la unidad trazo el arco MN que puede considerarse

como una recta paralela a AC , ya que es muy pequeño. Tenemos el triángulo ACS semejante al MNS ; luego

$$\frac{MN}{SN} = \frac{AC}{SC} \text{ o } \frac{p}{1} = \frac{R'}{d}.$$

La paralaje horizontal $p = \frac{R'}{d}$; luego $d = \frac{R'}{p}$.

La fórmula manifiesta tan sólo la relación inversa entre la distancia y la paralaje, conforme a la ley de los diámetros aparentes. (Véase uso de la fórmula.)

3. Uso de la fórmula.

Para calcular la distancia de un astro debe el cociente $R' : p$ multiplicarse por el factor constante 206 265, que representamos con la letra griega ρ (ro); este número significa que desde la distancia de 206 265 radios terrestres aparece el radio bajo el ángulo de un segundo.

Suponiendo conocida la paralaje, diremos: ¿desde qué distancia d aparece R' bajo el ángulo de p segundos,

si a la distancia de ρ radios terrestres aparece bajo el ángulo de un segundo? Resulta la proporción inversa $d : \rho = 1'' : p''$; luego

$$d = \frac{\rho}{p} \cdot R'.$$

[**Explicación.** Toda circunferencia de la longitud $2\pi r$ tiene 1.296 000 arcos de $1''$ (esto es $360 \times 60 \times 60$). Poniendo en $2\pi r$ el radio $= 1$, el arco de $1'' = \frac{2\pi}{1.296\,000} = \frac{1}{206\,265}$; en palabras:

el arco de un segundo es en longitud la 206 265ª parte del radio. Si, pues, el observador está a la distancia de un radio, la 206 265ª parte del radio se le presenta bajo el ángulo de un segundo; luego, *para ver todo el radio bajo el ángulo de un segundo*, el observador debe colocarse a una distancia 206 265 veces mayor; si la distancia fuese la mitad de este número, el radio se vería bajo el ángulo de $2''$, si 8 veces menor, el ángulo sería de $8''$.

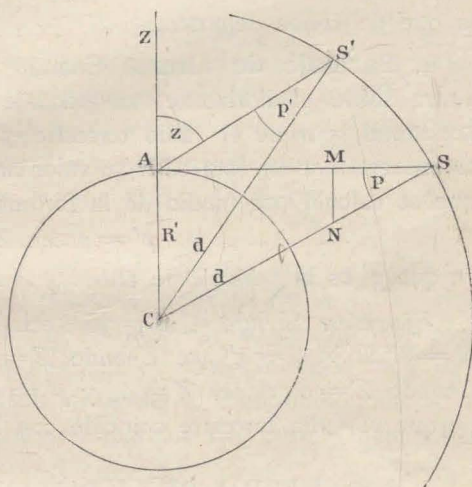


Fig. 15. Paralaje horizontal y de altura.

Podemos, pues, aplicar la segunda ley de los diámetros aparentes:

$$n : n' = d' : d. \quad (1)$$

En nuestro caso $n' = 1''$; $n = p$; $d' = 206\,265 = \rho$; $d =$ la distancia del centro de la tierra al del astro.

Substituyendo en (1) resulta $p : 1 = \rho : d$, de donde

$$1^\circ \quad p = \frac{1}{d} \times \rho,$$

$$2^\circ \quad d = \frac{1}{p} \times \rho,$$

lo que debíamos demostrar.]

4. Paralaje de altura. Cuando un astro se halla a cierta altura sobre el horizonte, su paralaje es menor que la paralaje horizontal, porque el radio terrestre ya no se presenta de frente al observador; en este caso su valor no se mide directamente, sino que se calcula por medio de la fórmula

$$p' = p \text{ sen } Z,$$

en que p' es la paralaje de altura y Z la distancia cenital del astro.

Ejemplos. Siendo $\angle Z = 30^\circ$, $\text{sen } 30^\circ = 0,5$; para el sol será $p' = 8'',80 \times \frac{1}{2} = 4'',40$. Cuando $Z = 90^\circ$, $\text{sen } Z = 1$ y $p' = p$. Cuando $Z = 0$, el $\text{sen } Z = 0$, y $p' = 0$, esto es, no hay paralaje, porque el radio terrestre coincide con la visual.

§ 18. MEDIDA DE LA DISTANCIA Y DEL RADIO DE UN ASTRO PLANETARIO.

La paralaje se determina por métodos astronómicos difíciles, pero independientes de la distancia del astro: por su medio podemos calcular con gran facilidad tanto la distancia como las dimensiones del sol, de la luna y de los planetas, lo que forma el objeto de este párrafo importante.

1. La distancia de un astro se calcula dividiendo el número 206265 por el valor de su paralaje expresada en segundos de arco.

La demostración de esta tesis se ha dado en la parte tercera del párrafo precedente; la paralaje debe expresarse en segundos de arco, porque el dividendo se deriva del arco de un segundo.

Ejemplo 1º Para el sol

$$d = \frac{R'}{p} \times \rho = \frac{R'}{8,80} \times 206\,265 = 23\,400 R', \text{ en número redondo.}$$

Ejemplo 2º Distancia de la luna:

$$d = \frac{R'}{60'} \times \rho = \frac{R'}{3600} \times 206265 = 57 R'.$$

En este caso los $60'$ de arco de la paralaje forman $3600''$.

El resultado son radios terrestres, porque este radio forma la unidad en el numerador de fórmula.

II. Medida de los radios. Para determinar las dimensiones del sol y de los planetas se debe conocer el radio, puesto que se ha comprobado que estos cuerpos tienen la forma esférica.

Teorema. Se obtiene el radio verdadero de un astro dividiendo su semidiámetro aparente por la paralaje: el resultado son radios terrestres. El radio terrestre se toma por unidad de medida.

La demostración se funda en la primera ley de los diámetros aparentes del § 4: Los diámetros verdaderos de dos astros, observados desde la misma distancia, son proporcionales a sus diámetros aparentes.

El diámetro aparente del sol y de los planetas se mide con auxilio del círculo mural; el diámetro aparente de la tierra, vista desde el centro del sol, etc., es el duplo de la paralaje; se comprende que los diámetros aparentes se observan desde la misma distancia, que es la del astro a la tierra. Denotando con R' el radio terrestre, con n el diámetro aparente del astro, tenemos que

$$2 R : 2 R' = n : 2 p. \quad (1)$$

Dividiendo por 2 y denotando $\frac{n}{2}$ con la letra s (semidiámetro o radio aparente del sol, etc.) resulta

$$R : R' = s : p$$

$$R = \frac{s}{p} \cdot R'.$$

Ejemplo. El diámetro aparente del sol es de $32'$; luego el semidiámetro es de $16' = 960''$; será su radio

$$R = \frac{s}{p} = \frac{960}{8,80} = 109 \text{ radios terrestres.}$$

Con auxilio del radio se calcula el ecuador $2 \pi R$, la superficie $4 \pi R^2$ y el volumen $\frac{4}{3} \pi R^3$.

El **volumen** de un astro se calcula más fácilmente tomando el volumen de la tierra V' por unidad de medida y aplicando el teorema de la Geometría

$$V : V' = R^3 : R'^3$$

en que R' es la unidad; luego $V = R^3$ veces el globo terrestre.

§ 20. LA PARALAJE ANUAL.

La paralaje, referida al radio terrestre, resulta muy pequeña para el sol, como se ha visto; se comprende, pues, que debe reducirse a cero con respecto a las enormes distancias de las estrellas fijas. Para remediar este inconveniente, se refiere la paralaje de las estrellas al radio de la órbita que la tierra describe alrededor del sol en un año; su *definición* es la siguiente: la paralaje anual de una estrella es el ángulo TES (fig. 17), bajo el cual un observador vería, desde la estrella E , uno de los radios de la órbita terrestre, trazado perpendicularmente a la recta ES que va desde la estrella al centro del sol. (Este radio TS es unas 23 000 veces mayor que el radio de la tierra.) Para determinarla se mide el ángulo ETS ; seis meses después se mide el ERS , y se calcula el valor de RET ; su mitad es el valor de la paralaje; por medio de ésta se calcula la distancia ES .

CAPÍTULO QUINTO.

COORDENADAS CELESTES.

Designamos con el nombre de coordenadas en general ciertos elementos matemáticos que sirven para determinar la posición de un punto en el espacio. Coordenadas celestes son unos ángulos o arcos por cuyo medio se determina la posición de un astro en la esfera celeste. En cada uno de los tres sistemas que se usan, se toma por plano fundamental un círculo máximo al cual se refiere la posición del astro, a saber: el horizonte, el ecuador y la eclíptica; a cada uno de ellos corresponde otro círculo máximo que le es perpendicular. (De las coordenadas eclípticas se tratará en el libro II.)

§ 21. AZIMUT Y ALTURA, O LAS COORDENADAS HORIZONTALES.

Llamamos azimut de una estrella el ángulo diedro que forma el plano vertical del astro con el meridiano del observador; a este ángulo corresponde el arco del horizonte comprendido entre los dos planos mencionados. (Esta palabra árabe significa *dirección*.)

El azimut se cuenta de 0 a 360 grados, empezando por la parte del meridiano que mira al Sur, pasando por el Oeste hacia el Norte, hasta encontrar el círculo vertical del astro.

En la fig. 18 el observador se supone colocado en C ; la parte superior del meridiano sea SZN ; el círculo $SONE$ es el horizonte;

N el Norte, E el Este, O el Oeste. La estrella a tiene por plano vertical el cuadrante ZMC que forma una cara del diedro; la otra

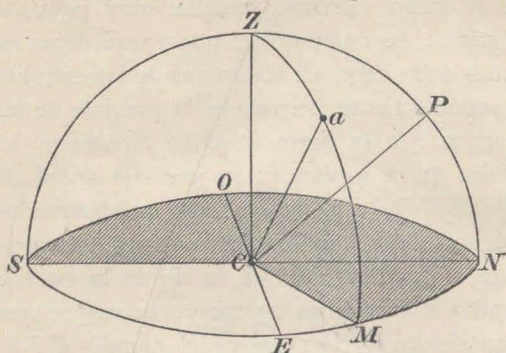


Fig. 18. Azimut.

cara es la parte SZC del meridiano, y ZC es la arista; el acimut de la estrella a es el diedro exterior $SZCM$, cuyo arco es $SONM$. Para medirlo se pone el círculo vertical del teodolito en la dirección Sur del meridiano, lo mismo que la alidada del círculo horizontal que señale cero, por ejemplo. Hago girar el vertical y el antejo, pasando por el Oeste al Norte hasta que la estrella a entre en la visual y esté en el plano vertical: el arco $SONM$ mide el acimut.

También se mide el acimut de 0° a 180° desde el Sur hacia el Oeste o el Este; la estrella a tiene entonces por acimut *Este* el diedro interior $SZCM = \text{arco } SEM$. Téngase presente que las coordenadas horizontales dan la posición de un astro con respecto a una misma estación, porque el horizonte y el meridiano varían de dirección con el cambio del punto de observación.

La altura se ha explicado en el § 11.

Ejemplo. Sean 160° y 80° las alturas correspondientes: la alidada del plano vertical del astro señale 200° . ¿Cuál es su acimut?

El meridiano se coloca en la semisuma 120° . El acimut será $200 - 120 = 80^{\circ}$ Oeste. Si la alidada señalase 75° para el vertical del astro, el acimut sería $120 - 75 = 45^{\circ}$ Este.

§ 22. COORDENADAS ECUATORIALES.

Este sistema, que es el más importante, lo forman la ascensión recta y la declinación.

Ascensión recta de un astro es el ángulo diedro que forma su círculo horario con otro círculo horario que se toma por origen.

El ángulo rectilíneo correspondiente se mide por el arco interceptado por los dos círculos sobre el ecuador celeste contando los grados desde 0 hasta 360, del Occidente al Oriente, en sentido opuesto al movimiento diurno.

La declinación de un astro es el ángulo que forma el rayo visual dirigido a él, con el plano del ecuador; es boreal o austral en conformidad con el hemisferio en que el astro se halla. Este ángulo se mide por el arco del círculo de declinación interceptado entre el astro y el ecuador.

La fig. 19 representa un meridiano celeste; el diedro $DPOC$ es la ascensión recta de la estrella a con respecto al origen PDP' ; el arco DC es su medida. El ángulo aOC es la declinación de la estrella a y el arco aC su medida, siendo OC la proyección de la recta Oa sobre el plano del ecuador.

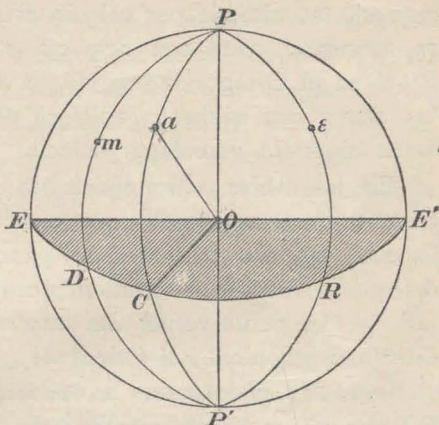


Fig. 19. Ascensión recta.

Los valores de estas coordenadas no son constantes a causa de la precesión y nutación: sus valores se publican para cada año en las efemérides de París. La declinación se denota con la letra D o también con δ (delta) griega; AR o α es la ascensión recta.

§ 23. MEDIDA DE LA ASCENSIÓN RECTA.

Tomemos por origen el punto D y sea $EPE'P'$ la traza del meridiano de la estación. Se coloca el círculo vertical del teodolito (o el anteojo meridiano), con exactitud, en el meridiano y se observa el momento en que la estrella m pasa por él: entonces PDP' coincide con el meridiano y el punto D con E . Supongámos que el péndulo sidereal marque $0^h 0^m 0^s$ en este momento. La estrella cuyo círculo horario es el origen de la medida, sea m . Ahora el observador espera el momento en que la estrella a pasa por el meridiano, contando el tiempo transcurrido desde el paso de m , y sea por ejemplo $3^h 4^m 4^s$; este tiempo multiplicado por 15 nos dará la ascensión recta en grados, minutos y segundos; el arco DC mide $46^\circ 1'$. He aquí la razón: Cada punto del ecuador recorre 360° en 24 horas con movimiento uniforme; luego en una hora 15° , y en un minuto de tiempo $15'$ de arco, y en un segundo $15''$. (Por lo tanto un grado se recorre en 4 minutos, y un minuto de arco en 4 segundos de tiempo.) Conociendo, pues, el tiempo transcurrido basta multiplicarlo por 15 para obtener la ascensión recta

de un astro con respecto al origen adoptado. Este origen es el punto vernal que determina el equinoccio de primavera; como es invisible, se obtiene por cálculo astronómico determinando primero su ascensión recta con respecto a una estrella, por ejemplo, de Rígel en el Orión; en seguida se miden las ascensiones rectas de los astros con respecto a Rígel por observación directa y se refieren al punto vernal por cálculo.

En las tablas astronómicas se expresa la ascensión recta en tiempo, y no en grados; se dice que es de $3^h 4^m$, por ejemplo, lo cual significa que el astro pasa 3 horas y 4 minutos *después* del punto Aries por el meridiano del lugar, y que dista 46° al Oriente del punto vernal. La ascensión recta se cuenta en sentido directo del Poniente al Oriente.

Nota. El punto Aries sirve también como origen del día sidereal; este punto no es visible; pero la estrella α de Andrómeda pasa 3^m más tarde por el meridiano. Se arregla, pues, el péndulo sidereal de suerte que marque 3^m en el instante en que la estrella pasa por el meridiano; al pasar más tarde el punto de equinoccio de otoño el péndulo debe marcar las 12 horas siderales.

El ángulo horario de un astro es el ángulo diedro que forma el círculo horario del astro con el meridiiano de un lugar; su ángulo rectilíneo correspondiente se mide por el arco respectivo del ecuador. El ángulo horario del punto Aries se obtiene multiplicando por 15 la hora sidereal en el momento dado. Recíprocamente se obtiene la hora sidereal dividiendo por 15 el ángulo horario del punto Aries.

Ejemplo. En la fig. 19 sea PCP' el meridiano del observador; D el punto Aries y PR el círculo horario de Sirio, cuya ascensión recta es $6^h 40^m$, o 100° (arco DR). Supongamos ser las dos horas tiempo sidereal, o 30° (arco DC). El arco CR del ángulo horario de Sirio mide:

$$CR = DR - DC = 100 - 30 = 70^\circ \text{ Este.}$$

Regla práctica: Multiplíco la hora sidereal por 15° (arco CD) y resto del producto la ascensión recta; el resultado negativo significa Este, el positivo Oeste.

Con el ecuatorial se puede medir directamente el arco del ángulo horario poniendo el cero en el meridiano.

§ 24. MEDIDA DE LA DECLINACIÓN.

La declinación de un astro, esto es, el arco del círculo horario que une el centro del astro con el ecuador, no puede medirse directamente por ser invisible el plano del ecuador: se determina

más bien con auxilio de la fórmula $D = \varphi \pm Z$; en ella representa Z la distancia angular que tiene el astro al cenit del observador, en su paso superior por el meridiano; la letra griega φ (fi) representa el valor angular de la latitud geográfica del punto de observación, y es el arco ZE^* (fig. 20), esto es, el arco que va del cenit al ecuador: esta latitud puede determinarse sin conocer D , como veremos en otra parte. (Por ser el arco $ZE = PH$, que es la altura del polo, ya que tienen el mismo complemento ZP , la fórmula de la declinación se

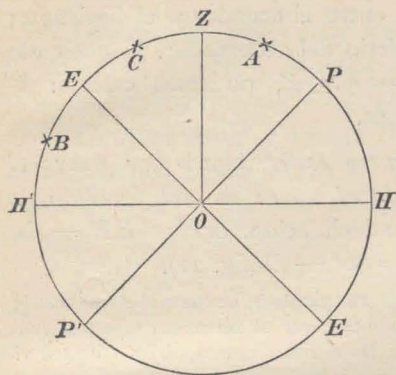


Fig. 20. Declinación.

escribe también $D = H \pm Z$.) Para la demostración debemos distinguir tres posiciones del astro con respecto al cenit del punto de observación:

1º El astro A está entre el cenit del observador y el polo; por lo tanto se ve al Sur del cenit en el hemisferio austral, al Norte en el boreal.

$$D = \text{arco } AE = EZ + ZA = \varphi + Z. \quad (1)$$

2º El astro C está entre el cenit y el ecuador; por lo tanto se ve hacia el Norte desde el hemisferio austral, hacia el-Sur en el boreal.

$$D = \text{arco } EC = ZE - ZC = \varphi - Z. \quad (2)$$

3º El astro B está entre el ecuador y el horizonte; se ve como en el caso anterior.

$$D = \text{arco } EB = ZB - ZE = Z - \varphi = -(\varphi - Z). \quad (3)$$

En el segundo y tercer caso no sea puede siempre saber con exactitud la posición de la estrella con respecto al ecuador, que es invisible; en los dos casos la estrella se ve hacia el otro hemisferio apartada del cenit: en la práctica basta medir en este caso su distancia cenital y aplicar la 2ª fórmula $D = \varphi - Z$. Si $\varphi > Z$, el resultado es positivo, lo que prueba que el astro está en el mismo hemisferio que el observador; pero si $\varphi < Z$, el resultado es negativo, lo que indica que la estrella está en el hemisferio opuesto, entre el ecuador y el horizonte: síguese que los tres casos se reducen a la fórmula $D = \varphi \pm Z$.

Nota. Como las efemérides astronómicas se publican en París, las declinaciones australes llevan el signo negativo.

Ejemplo. Una estrella vista al Norte del cenit de Buenos Aires, tiene $Z = 50^{\circ} 17'$, su declinación $= \varphi - Z = 34^{\circ} - 50^{\circ} 17' = -16^{\circ} 17'$ (Aldebarán); está, pues, entre el ecuador y el horizonte; la declinación es contraria al hemisferio del observador. Conociendo dos cantidades en la fórmula $D = \varphi \pm Z$, podemos calcular la tercera, fijándonos bien en los signos.

La distancia polar de un astro es el ángulo que forma el eje del mundo con la visual dirigida al astro: es complemento de la declinación. $mP' = EP' - Em = 90^{\circ} - D$ (fig. 21).

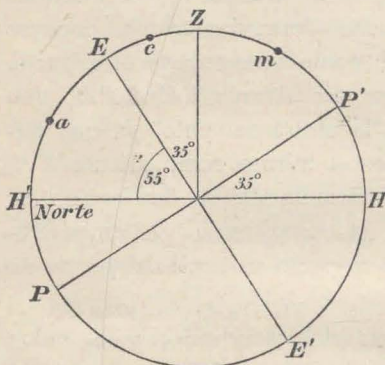


Fig. 21. Latitud y declinación.

El paralelo circumpolar es un círculo tangente al horizonte: separa la zona de las estrellas circumpolares (siempre visibles o invisibles en una latitud dada) de la zona en que salen y se ponen las estrellas. Tiene por traza una recta que une el punto H de la meridiana con un punto m del meridiano, que dista del polo (hacia el cenit) tanto cuanto sea la altura del polo; en otras palabras, su distancia polar es igual a la latitud del punto; por lo tanto la declinación de su circunferencia es

$$= 90^{\circ} - \varphi.$$

§ 25. TRES REGLAS PRÁCTICAS.

Téngase presente que la latitud de un punto denomínase *declinación del cenit* (arco EZ), y la altura del ecuador es lo mismo que la *declinación del horizonte* arco EH' (fig. 21).

Regla I. Si una estrella está en el cenit de un punto terrestre, su declinación es igual a la latitud de este punto, y recíprocamente.

Regla II. Desde un punto terrestre aquellas estrellas del hemisferio opuesto son siempre *invisibles* cuya declinación es mayor que la declinación del horizonte que pertenece al punto dado; en el caso contrario son visibles. Desde un polo son invisibles todas las estrellas del hemisferio opuesto (fig. 11 12 13).

Regla III. Para una latitud dada aquellas estrellas son *circumpolares* cuya distancia polar ($90^{\circ} - D$) es igual o menor que esta latitud, o también, cuya declinación es mayor que la del horizonte que corresponde a dicha latitud: síguese que desde el polo las estrellas del mismo hemisferio son todas circumpolares y que para el ecuador ninguna lo es (fig. 11 12 13).

§ 26. IMPORTANTES EJERCICIOS NUMÉRICOS RELATIVOS A LAS ESTRELLAS.

Suponemos al observador colocado en el hemisferio *austral* y en la latitud $\varphi = 35^0$; es evidente que el alumno debe cambiar el valor de los ángulos en la fig. 21 con respecto a su propia latitud.

I. Declinación: Fórmula $D = \varphi \pm Z$. Como en la práctica la elección del signo *más* o *menos* (\pm) ofrece a veces dudas, basta trazar la fig. 21 para salir del apuro, dando el debido valor a la latitud y los demás ángulos.

1. ¿Cuál es la declinación de una estrella a que (hacia el Norte) tiene la altura de 15^0 ($Z = 75^0$)? $D = aE = Z - \varphi = 75^0 - 35^0 = 40^0$ boreal.

2. Una estrella se ve al Norte del cenit en una altura de 50^0 ; calcular su declinación. ($Z = 40^0$.)

$$D = \varphi - Z = 35^0 - 40^0 = -5^0.$$

La estrella está en el hemisferio boreal, opuesto al del observador.

3. ¿Cuál es la declinación de una estrella que se ve hacia el Sur a una altura de 50^0 ? ($Z = 40^0$.) $D = mE = \varphi + Z$.

4. Determinése la declinación de una estrella que desde la latitud supuesta se ve en el horizonte boreal.

$$D = 90^0 - 35^0 = 55^0 \text{ Norte.}$$

5. ¿Por qué desde la latitud indicada es invisible una estrella cuya declinación boreal es de 60^0 ?

6. La declinación Sur de una estrella es de 60^0 : se pregunta si es circumpolar con respecto a la latitud 34^0 Sur.

II. Altura. Midiendo con el teodolito la distancia cenital del astro en su paso por el meridiano, basta restarla de 90^0 para obtener la altura, según se ha dicho en el § 11; pero aquí se trata de calcularla sin medirla directamente. Conociendo la declinación y la latitud, basta despejar con discreción la distancia cenital en la fórmula $D = \varphi \pm Z$ y restar el valor obtenido de 90^0 ; pero es más sencillo calcularla con auxilio de la declinación del horizonte, distinguiendo tres casos. (Altura del sol, véase § 38; la de la luna, § 116.)

1. La estrella a está al Norte del ecuador, esto es, D es boreal. Aldebarán, $D = +16^0$. Su altura $H'a = H'E - Ea = 57^0 - 16^0 = 41^0$. En Santiago pasa a la altura de 41^0 por el meridiano.

2. La estrella c está al Norte del cenit, pero al Sur del ecuador ($\varphi > D$); $H'c = H'E + Ec$. Sirio, $D = 16^0$ Sur, pasa a la altura de $56^0 + 16^0$ por el meridiano de Buenos Aires.

3. La estrella m está al Sur del cenit ($D > \varphi$). En este caso se considera el cuadrante austral del meridiano: basta sumar la altura $P'H$ del polo con la distancia polar $90^\circ - D$ de la estrella. $Hm = HP' + (90 - D) = 33 + 38 = 71^\circ$ para Canopo, cuya declinación es 52° Sur; pero en el cabo de Hornos, $\varphi = 55^\circ$, Canopo tiene la altura meridiana $55 + 38 = 93^\circ$, esto es, su paso se efectúa al Norte del cenit, porque $\varphi > D$.

Si la estrella es circumpolar, el paso inferior es igual a $\varphi - (90^\circ - D)$.

III. Visibilidad (véase la segunda regla del párrafo precedente).

Ejemplos. 1. Una estrella está en el cenit de San Petersburgo, $\varphi = 59^\circ$ Norte: su declinación $D = \varphi = 59^\circ$: será, pues, siempre invisible desde la latitud de 33° , pero visible desde $\varphi = 30^\circ$.

2. ¿Por qué es visible Sirio desde Madrid, $\varphi = 40^\circ$?

3. ¿Desde qué latitud boreal Sirio aparece en el horizonte? Según el problema $\varphi + D = 90^\circ$, luego $\varphi = 90 - 16 = 74^\circ$ Norte.

4. ¿Desde qué latitud Sur es visible *toda* la Osa mayor?

$$(D = 53^\circ.)$$

Fácil será al profesor variar los ejercicios con respecto a las estrellas primarias cuya declinación se halla en el libro IX, § 156; las latitudes de varias ciudades están en el libro IV.

CAPÍTULO SEXTO.

REPRESENTACIÓN DE LA ESFERA CELESTE.

Las estrellas que se han podido observar, están inscritas en libros que se llaman catálogos de las estrellas. Algunas de éstas llevan un nombre propio, pero la mayor parte se denotan por letras griegas y latinas en cada una de las constelaciones a que pertenecen; si las letras no bastan, suelen usarse números; las estrellas más brillantes, o llevan nombre propio o se designan con las primeras letras griegas. Al lado del nombre se pone en el catálogo la ascensión recta y la declinación. Hiparco de Rodas, que vivía por los años 150 a. de J. C., tiene el gran mérito de haber sido el primero en componer un catálogo y aun en construir un globo celeste, determinando la posición de las estrellas por medio de sus distancias angulares. Vamos a dar una explicación breve sobre los globos modernos y las cartas celestes.

§ 27. GLOBOS CELESTES.

Represente la fig. 22 un globo material, cuya forma es conocida, y veamos en un ejemplo concreto cómo se denota en el globo la posición de una estrella M , cuya ascensión recta sea 80^0 y la declinación boreal 60^0 .

Tomo un punto arbitrario P sobre el globo, y desde él describo un círculo máximo con una abertura de compás igual a la cuerda que corresponde a un cuadrante; si P representa el polo Norte, el círculo es el ecuador celeste, y será fácil la determinación del polo Sur P' . En el ecuador tomo un punto O para origen de las ascensiones rectas, y aplico un arco OA igual a 80^0 ; trazo en seguida el círculo de declinación PAP' , aplicando después un arco AM de 60^0 : de esta manera hemos señalado con exactitud la posición de la estrella M .

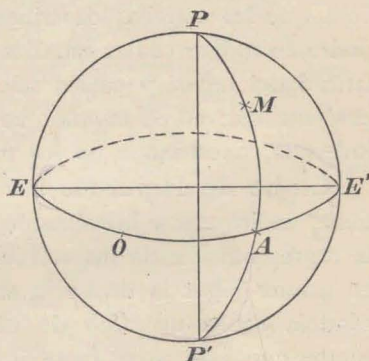


Fig. 22. Globo celeste.

A menudo se procede de la siguiente manera: primero se trazan los círculos paralelos al ecuador y los de declinación en el globo, de 10 en 10 grados, o también de grado en grado, si el tamaño del globo lo permite; fácil es ahora apuntar las estrellas en conformidad con las coordenadas ecuatoriales. Este método no ofrece la misma exactitud que el precedente; sin embargo da una aproximación suficiente, y es más cómodo.

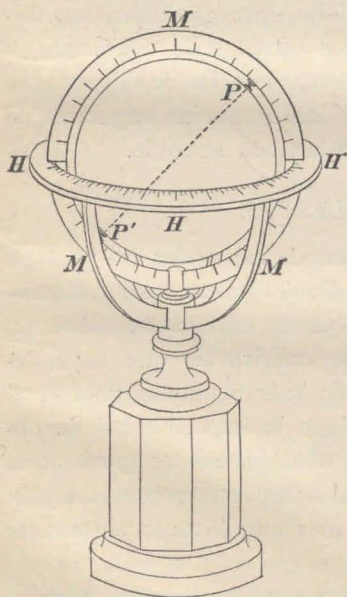


Fig. 23. Globo celeste.

Supongamos ahora las estrellas apuntadas en la esfera. En la realidad el eje del mundo PP' es una varilla metálica, cuyas extremidades penetran en un círculo vertical de latón MM (fig. 23), que a su vez descansa en un pie. Con esta disposición es fácil representar el movimiento diurno; basta poner el círculo vertical en el meridiano, y darle con respecto a otro

círculo HH , que representa el horizonte del observador, una inclinación hasta que la línea de los polos PP' forme un ángulo igual a la latitud del lugar¹. Por ser móvil el globo en torno de la varilla, le podemos dar vuelta alrededor del eje, y el observador verá que las estrellas describen paralelos perpendiculares al eje, y podrá examinar cuáles estrellas sean circumpolares con respecto a la latitud del lugar, y cuáles salen y se ponen, según está dicho. Es evidente que el observador ve los grupos de estrellas en posición invertida, puesto que no los mira desde el centro del globo.

Globo de Hiparco. Por el interés histórico y científico que tiene, indicaremos brevemente el método seguido por Hiparco en la representación de las estrellas sobre un globo. Este sabio midió en primer lugar la distancia angular de dos estrellas, A y B , aplicándola sobre un arco de círculo máximo cualquiera, pero de suerte que este arco fuese igual a la distancia angular obtenida. Después midió la distancia angular de la estrella A con respecto a una tercera estrella C , y con una abertura de compás igual a la cuerda subtendida por esta distancia angular, trazó sobre el globo un arco desde A como polo. En seguida hizo una operación análoga referida a la estrella B con respecto a C : el punto de intersección de los dos arcos trazados desde A y desde B señalaba la posición relativa de la estrella C . Siguiendo este método, pudo Hiparco colocar gran número de estrellas en el globo, que guardaban sus distancias angulares con respecto a las dos estrellas de referencia.

Comparando las observaciones modernas con las de Hiparco, se ha podido verificar que en 2000 años las distancias angulares de las estrellas no se han alterado de una manera sensible.

§ 28. CARTAS CELESTES.

Teniendo los globos el inconveniente de no poder trasportarse con facilidad, se han reemplazado por dibujos planos que se llaman **cartas celestes**. Es sabido que no puede extenderse sobre un plano ninguna porción de la superficie esférica sin que haya deformación: ciertas dimensiones resultarán más pequeñas y otras al contrario más grandes, de donde se sigue la imposibilidad de obtener la representación exacta de la relación en las posiciones. Vamos a dar alguna indicación general sobre esta representación: en el libro IV se darán las nociones más amplificadas al tratarse de los mapas geográficos.

¹ Esta operación se llama *rectificar* el globo.

1. **Carta de la esfera celeste.** Sábese que esta esfera se divide por el ecuador en dos hemisferios, uno boreal y otro austral, que se representan en forma circular cada uno con sus constelaciones respectivas.

La fig. 24 nos da la proyección llamada polar de un hemisferio con los elementos siguientes: la circunferencia exterior es la línea del ecuador, en cuyo contorno se marcan las ascensiones rectas desde 0 hasta 360° (o las 24 horas en cifras romanas); las circunferencias concéntricas pertenecen a la proyección de los paralelos, cuyas declinaciones se marcan en uno de los radios desde 0 a 90° ; los radios o diámetros son las proyecciones de los semicírculos horarios o meridianos celestes; el centro es a la vez la proyección del polo y del semieje del mundo.

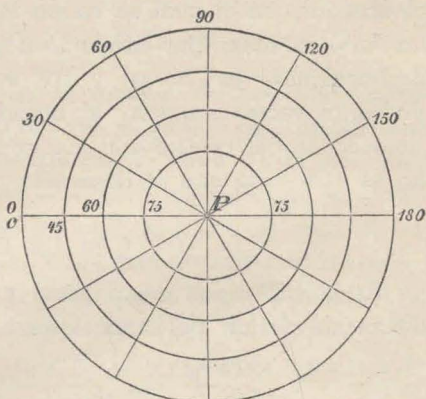


Fig. 24. Carta celeste.

La base de estas cartas es la proyección ortográfica, que se explicará en el § 76; por lo mismo es conveniente amplificar la noción de esta carta después de haber visto aquel párrafo.

La carta de una zona polar ofrece el mismo aspecto y las mismas líneas; pero el plano de proyección no es el ecuador, sino el círculo polar de 66° — 67° , y los paralelos empiezan con esta declinación.

Esta proyección se llama *polar*, porque el polo coincide con el centro del ecuador, que es la proyección de la línea de los polos, en la cual están los centros de los paralelos; pero más propiamente se llama así porque el observador se supone colocado a gran distancia encima del polo, mirando en sentido perpendicular los paralelos.

2. **Zona ecuatorial** entre dos paralelos de 30° al Norte y al Sur del ecuador. En este caso se deforma la superficie aumentando las dimensiones de los paralelos extremos, que resultan ser dos círculos iguales al ecuador, siendo así que en realidad son menores.

Abramos la zona según un círculo horario, y supongámosla extendida sobre el plano del papel. El ecuador y los paralelos serán de igual longitud; los arcos de los círculos horarios, comprendidos

entre los dos paralelos extremos, serán rectas perpendiculares a ellos: el conjunto formará, pues, un rectángulo en cuyo medio está el ecuador, en el cual se trazan las ascensiones rectas, tomándose un lado extremo por origen: en este mismo lado se aplican las declinaciones, 30^0 boreal y 30^0 austral, trazando por los puntos divisorios rectas paralelas al ecuador. Al fin de este libro está la zona ecuatorial celeste con sus constelaciones. Esta representación no es otra cosa que el desarrollo cilíndrico.

§ 29. LA ELIPSE.

Es la elipse una curva plana y cerrada en que la suma de las distancias de un punto cualquiera C a dos puntos fijos F y F'

(situados en su plano y llamados focos) es la misma para todos sus puntos (fig. 25).

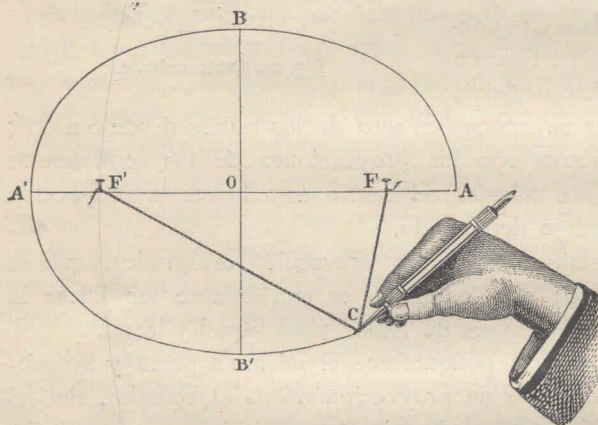


Fig. 25. Construcción de la elipse.

Para trazar la elipse fijamos en dos puntos las dos extremidades de un hilo, cuya longitud será el eje mayor; manteniendo el hilo tirante y doblado

damos la vuelta y señalamos con un lápiz los puntos que se describen: resulta que la suma de las distancias a los focos es invariable e igual a la longitud del hilo.

Definiciones. **Focos** son los dos puntos fijos que equidistan del centro. $OF = OF'$.

Radio vector es toda recta que va del foco a un punto de la elipse.

Eje mayor es la recta AA' , que pasando por los focos termina en dos puntos de la curva: el semieje se representa por la letra a ; luego $FC + F'C = 2a$.

Eje menor es la recta perpendicular al eje mayor en su punto medio: se representa con la letra b el semieje menor. El punto donde los dos ejes se cortan es el *centro* de la elipse.

CAPÍTULO SÉPTIMO.

ALGUNOS INSTRUMENTOS ASTRONÓMICOS.

§ 30. EL ANTEOJO ASTRONÓMICO.

La observación de los astros, la medida de sus dimensiones y de su posición relativa se efectúa con el auxilio de instrumentos que se llaman **anteojos astronómicos**. Constan de un tubo más o menos largo y ancho, de latón resistente para que no se doble por el peso de sus extremidades; en una de las cuales está el objetivo y en otra el ocular; además están provistos de partes accesorias para obtener medidas exactas y facilitar el manejo del aparato. El **ocular** es una lente convergente donde se aplica el ojo del observador, y hace las veces de un microscopio simple con respecto

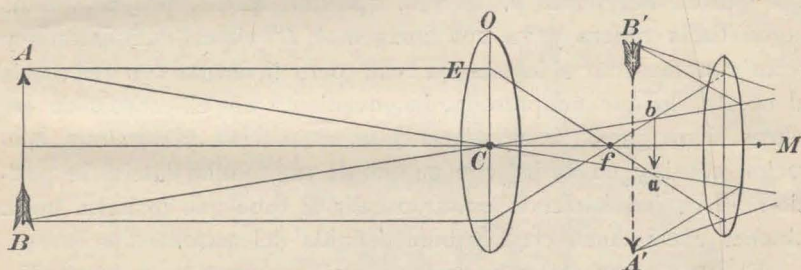


Fig. 26. Anteojo astronómico.

a la imagen real. («Ocular» viene del latín *oculus*, el ojo.) El **objetivo** es una lente convergente a donde van directamente los rayos luminosos que vienen de la estrella que es objeto de la observación. Tiene un diámetro notablemente mayor que el ocular a fin de recoger la mayor cantidad posible de luz que viene de tan grandes distancias; al mismo tiempo se le da un gran radio de curvatura para disminuir la aberración esférica. La precisión de la imagen depende de la pureza y homogeneidad del cristal y de la perfección de las curvaturas.

Marcha de los rayos en el anteojo. Como esta teoría pertenece al programa de Física, daremos aquí tan sólo un brevísimo resumen de ella. Por ser el objeto un astro que se encuentra tan distante, los rayos luminosos inciden paralelos, y al salir del objetivo convergen sensiblemente hacia el foco principal, formando una imagen real, invertida y muy pequeña del astro. Suponiendo conocido el tratado sobre la refracción y las lentes, que pertenece a la Física, consideremos un objeto luminoso cualquiera \$AB\$ (fig. 26), colocado a mayor distancia que la doble focal (en la figura no se

guarda la debida proporción). Consideremos dos rayos que salen del punto A : Trazo un rayo AE , paralelo al eje principal, que pasando por el objetivo se refracta y se dirige al foco f . Otro rayo, que sigue la dirección del eje óptico AC , no se refracta, y su intersección con el rayo anterior formará en el punto a el foco de A . De la misma manera se formará en b el foco del punto B , y por consiguiente tenemos una imagen ab real, invertida y menor que el objeto AB . Es de notar que la distancia entre el objetivo y el ocular está calculada de suerte que la imagen real se forma entre el foco del ocular y este mismo ocular, posición que corresponde al microscopio simple. Ahora bien: después de cruzarse los rayos en el punto a pasan divergentes al ocular, del cual salen convergiendo hacia el eje principal; lo mismo sucede con los rayos que parten del punto b . El ojo, aplicado en M , proyecta estos rayos hacia afuera y ve una imagen $A'B'$ virtual, ampliada y recta con respecto a la imagen real, pero invertida con referencia al objeto, lo que no presenta inconveniente en el estudio de los astros. Para que la imagen sea clara, es preciso *afocar*: esta operación consiste en variar con auxilio de un tornillo lateral la posición del ocular, haciendo entrar o salir el tubo que lo lleva, hasta obtener una imagen clara y bien definida del astro.

El buscador es un pequeño anteojo que se adapta en sentido paralelo y cerca del ocular al tubo del aparato; con su auxilio se hace entrar el astro fácilmente en el campo del instrumento.

El retículo. Cualquier anteojo puede sufrir pequeños desplazamientos durante la observación, sin que el astro salga de su campo; pero este movimiento puede causar errores en la medida de los ángulos. Para conseguir medidas exactas debe tener el anteojo un punto de referencia invariable; éste se consigue por **el retículo**, que consiste en un diafragma, en cuyos bordes se fijan dos hilos finísimos de tela araña, uno vertical y otro horizontal, y que se coloca delante del ocular en el punto donde se forma la imagen real. El punto de cruce de los hilos es el punto de referencia, y la recta que lo une con el centro óptico del objetivo constituye *el eje óptico* del instrumento, que pasa a ser la *línea de mira*. En general, se le hace coincidir con el eje geométrico del tubo. Una bujía colocada lateralmente debe iluminar el retículo en las observaciones que se hacen durante la noche.

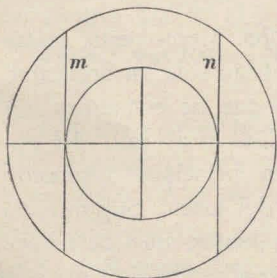


Fig. 27. Retículo.

El micrómetro. Para medir el diámetro aparente de un astro, se emplea un retículo especial, llamado micrómetro; en este caso hay a lo menos dos hilos verticales, m y n (fig. 27), que se pueden separar el uno del otro a voluntad, por medio de un tornillo fino. Los dos hilos están atravesados por un tercero que les es perpendicular. Al pasar el astro delante del objetivo, el observador aparta los dos hilos paralelos hasta que sean tangentes al disco del astro: en el limbo del tornillo micrométrico se mide el apartamiento, con lo cual se obtiene el diámetro aparente del astro.

§ 31. EL ANTEOJO MERIDIANO.

Aviso previo. Para que el alumno entienda la razón por qué se hacen las tres comprobaciones, debe tener presente las propiedades del meridiano celeste contenidas en la definición (§ 13). La inteligencia de la segunda operación, que es algo difícil, se facilita recordando la manera cómo, en Geometría se procede, si el ángulo de una escuadra es recto: se hace girar la escuadra en torno de un cateto; formándose un ángulo con la dirección anterior, se traza su bisectriz, que formará ángulos rectos.

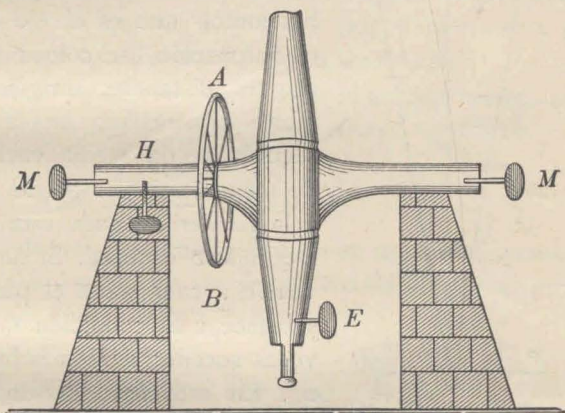


Fig. 28. Anteojo meridiano.

El anteojo meridiano es uno de los instrumentos astronómicos más importantes, y sirve para observar el paso de un astro por el meridiano con el fin de determinar la ascensión recta. Es un gran telescopio refractor, que puede girar libremente en torno de un eje horizontal; este eje termina en dos goznes, que descansan en dos cojinetes sólidamente establecidos sobre pilares, y se coloca en la dirección Este-Oeste. El cuerpo del anteojo debe construirse de manera que no pueda doblarse por el peso de sus extremidades; sin esta condición podría resultar que el eje óptico no sea una línea recta. Siempre es acompañado de un reloj sideral y de un cronógrafo, que es un instrumento de precisión destinado a marcar

segundos y fracciones de segundo por un mecanismo eléctrico. Para que las observaciones sean exactas, el instrumento (fig. 28) debe satisfacer a tres condiciones indispensables.

1. **El eje de rotación debe ser horizontal.** Para comprobarlo se aplica un nivel de aire, algo largo y muy sensible, colocándolo sobre el eje horizontal por medio de dos horquillas de que el nivel está provisto. Mediante un tornillo vertical H , que se halla *debajo* de uno de los cojinetes, se levanta o se hace bajar esta extremidad del eje hasta que la posición sea exactamente horizontal.

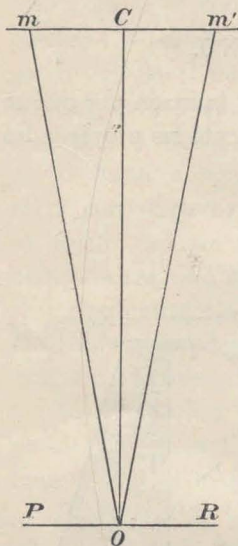


Fig. 29. Comprobación del eje óptico.

2. **El eje óptico debe ser perpendicular al eje de rotación.** Sabemos que el eje óptico es la línea de mira: para poder coincidir con el meridiano, ha de moverse en un plano vertical, esto es, perpendicular a la horizontal, que es el eje de rotación. Para la comprobación, se coloca una mira horizontal, a gran distancia, dirigiendo la visual a un punto m señalado en la mira (fig. 29). En seguida se da media vuelta al eje horizontal, de manera que el gozne de la derecha vaya a la izquierda; para esta operación existe un mecanismo especial. Si ahora la línea de mira vuelve a caer sobre el punto m , el eje óptico satisface a la condición indicada, lo que pocas veces sucede; dará más bien sobre otro punto m' . En este caso las dos direcciones del eje óptico formarán ángulos iguales con OC , que es perpendicular al eje de rotación PR . Este punto C se marca en la mira, y se dirige a él la visual; con el auxilio del tornillo E , que se halla cerca del ocular, se cambia en sentido transversal la posición del retículo, hasta que su centro y el punto C se encuentren en el eje óptico.

3. **El plano vertical descrito por el eje óptico debe coincidir con el meridiano.** Realizadas las dos condiciones que preceden, el eje óptico describe un plano vertical; trátase ahora de hacerlo coincidir con el meridiano, cuya dirección se determina previamente con el teodolito. A este efecto, mediante el reloj sidereal, se fija el tiempo transcurrido entre el paso superior y el inferior de una estrella circumpolar por el plano vertical del eje óptico; este tiempo debe ser igual a 12 horas; en el caso de ser mayor o menor que 12, el eje óptico no está en el meridiano. La coincidencia se

establece moviendo en sentido horizontal el cojinete con el auxilio de un tornillo M , aplicado en la extremidad del eje horizontal, hasta que la diferencia de tiempo sea de 12 horas.

El **círculo mural** sirve para medir la distancia cenital de un astro, y por su medio la declinación; es un círculo o limbo graduado, de bastante tamaño, que se coloca en el meridiano y se fija a lo largo de un muro sólido para evitar cualquiera dislocación. El círculo está provisto de un anteojo móvil alrededor de un eje que es perpendicular a su plano; el eje óptico debe moverse en el meridiano, lo que se consigue con el auxilio del anteojo meridiano, en cuya vecindad se establece siempre el círculo mural. El limbo está graduado de 0^0 a 180^0 desde el punto más alto, que corresponde a la vertical trazada desde el centro; la graduación va tanto a la derecha como a la izquierda. Se mide la distancia cenital en el momento en que el astro pasa por el meridiano, y por lo mismo se obtiene igualmente su altura meridiana.

Hoy día este círculo se ajusta directamente al anteojo meridiano mismo, como lo indica la fig. 28, y se llama *círculo meridiano*.

§ 32. EL SEXTANTE.

Este instrumento de reflexión, tan necesario en la marina, consta de un bastidor metálico en forma de sector circular (fig. 30), provisto de un pequeño anteojo, de dos espejos y de un arco graduado, que es la *sexta* parte de una circunferencia del mismo radio, por lo cual lleva el nombre de sextante. El espejo M recibe directamente los rayos del sol y es móvil con auxilio de la alidada AM : el rayo reflejado va al espejito E , que lo refleja al ojo O del observador; pero una parte del espejito es transparente, de suerte que el observador puede proyectar la imagen hacia el horizonte del mar: el $\angle SOH$ es la altura del sol y su valor puede leerse directamente en el limbo del arco BB_1 .

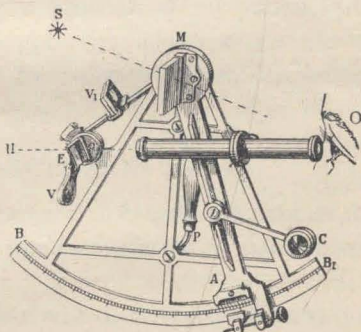


Fig. 30. El sextante.

Uso del sextante. Puede servir para medir la distancia angular de dos estrellas o la altura de un astro; pero sirve principalmente para medir la altura meridiana del sol en alta mar, con

el fin de obtener la distancia cenital, que es necesaria en la determinación de la latitud geográfica. A este efecto se hace la observación, estableciendo algunos minutos antes de mediodía el contacto entre la imagen del sol y el horizonte y se conserva este contacto con ayuda de pequeños movimientos del tornillo. Acercándose el sol al meridiano, la imagen tiende a elevarse, y llegará un momento en que parece estacionaria: se detiene el tornillo y se hace la lectura de la graduación, que es la altura meridiana. (Si el ojo del observador se halla a una altura apreciable, conviene hacer la corrección restando la correspondiente depresión del horizonte.)

LIBRO SEGUNDO.

MOVIMIENTO Y CONSTITUCIÓN DEL SOL.

CAPÍTULO PRIMERO.

MOVIMIENTO APARENTE ANUAL DEL SOL.

Con la palabra *movimiento aparente* del sol queremos significar el movimiento en que el astro durante el año se presenta a la observación sin la cooperación de los cálculos y raciocinios científicos. Debemos recordar que el sol participa del movimiento diurno como cualquier otra estrella; pero en este capítulo estudiamos las circunstancias que nos revelan otra clase de movimiento aparente del sol, reservando para más tarde los argumentos que deshacen la ilusión de la apariencia y prueban el movimiento de traslación de la tierra en torno del sol. Explicaremos las observaciones sencillas que manifiestan el movimiento del sol en ascensión recta y en declinación.

§ 33. MOVIMIENTO EN ASCENSIÓN RECTA.

Consiste este movimiento en alejarse el sol cada día más de un punto fijo, hacia el Este, recorriendo una circunferencia, para volver en un año al mismo punto.

Si fijamos nuestra atención a principios de mayo durante varios días en la salida del sol, observaremos que la constelación *Tauro* precede un poco la salida del sol y que la diferencia va aumentando hasta que al fin del mes la salida de *Géminis* precede un poco la del sol; después precede *Cáncer*, y así sucesivamente las doce constelaciones del zodiaco. Las estrellas mismas que componen éstos grupos respectivos, guardan entre sí y con las demás constelaciones una distancia angular invariable. De esta observación se sigue que el sol retrocede aparentemente, alejándose cada día de

un punto fijo, en sentido opuesto al movimiento diurno, del Oeste hacia el Este, y por lo tanto tiene un movimiento propio en ascensión recta.

Para medir esta ascensión recta se observa la orilla occidental del sol en su paso por el meridiano, y después la oriental, anotando la hora sideral de cada contacto con el hilo vertical del retículo: la semisuma da el paso del centro por el meridiano; este tiempo se convierte en grados tomando por origen el punto vernal. El paso del sol *se retrasa* unos cuatro minutos por día, con referencia a una misma estrella; luego aumenta la ascensión recta un grado por día, valor medio, porque el aumento no es constante, y por lo tanto el movimiento en ascensión recta no es uniforme.

§ 34. MOVIMIENTO EN DECLINACIÓN.

I. Determinada una vez la declinación de una estrella, permanece invariable durante el año, porque el astro pasa a la misma distancia cenital, y por lo tanto a la misma altura, por el meridiano. El sol, por el contrario, tiene movimiento en declinación durante un año, porque su distancia angular al ecuador celeste aumenta y disminuye periódicamente. Fácilmente se observa que el sol está más cerca del cenit, a mediodía, en *verano* que en el invierno: varía, pues, su altura, y por lo mismo también su distancia cenital. En la fórmula $D = \varphi \pm Z$ el valor de φ es constante para un mismo lugar; variando, pues, el valor de Z , es evidente que el valor de D varía, aumentando o disminuyendo. Las variaciones mencionadas se conocen observando durante el año la sombra proyectada por un edificio: cuando la sombra se alarga a *mediodía*, es señal de que la altura del sol decrece, y por lo mismo, aumenta su distancia cenital: variando, pues, esta distancia (lo cual se comprueba por simple vista), debe variar la declinación, ya que en la fórmula $D = \varphi \pm Z$ el valor de la latitud φ es invariable. (Téngase presente que este movimiento del sol es aparente: es debido a la revolución de la tierra en torno del sol y a otra causa que se verá al tratarse de las estaciones.)

II. *La amplitud del sol* es el arco que va desde el punto Este al punto del horizonte donde sale el sol: desde el 21 de marzo al 21 de septiembre es boreal. Sus valores angulares tienen el mismo máximo y mínimo que la declinación.

III. *Variación periódica de la declinación del sol.*

En la fig. 31, la parte superior al horizonte se refiere al hemisferio austral: el observador se supone colocado en O mirando al

punto Este. (En la figura no está la segunda mitad de los arcos diurnos y nocturnos.) El 21 de diciembre sale el sol en *A* y culmina en *C*; el 21 de marzo sale en el punto Este y culmina en *E*; el 21 de junio sale en *R* y culmina en *B*; después los puntos de salida se retiran hacia el Sur y el 21 de septiembre el sol vuelve a salir en el punto Este para culminar en *E*, pasando después al Sur hasta el 21 de diciembre.

Tenemos, pues, cuatro variaciones principales durante un año:

dos boreales y dos australes, por tres meses acercándose al ecuador y por tres meses alejándose de él; en el meridiano el sol parece recorrer el arco *CB* de ida y venida y en el horizonte el arco *AR* de ida y venida durante un año.

IV. **Valores numéricos de la declinación.** Varía la declinación del sol oscilando entre los puntos *B* y *C*, donde es máxima, siendo cero en *E*, que está sobre el ecuador; en *C* su valor es $-23^{\circ} 27'$ (austral) y en *B* es $+23^{\circ} 27'$ (boreal). El período completo entre dos valores consecutivos del mismo signo tiene la misma duración que la vuelta entera en ascensión recta, a saber: 365 días y 6 horas.

Variación diurna. Como cada tres meses hay variación de $23^{\circ} 27'$, el valor medio de la variación diurna sería próximamente $15' 30''$. (Se divide $4 \times 23^{\circ} 27'$ por 4×91 días, reduciendo los grados a minutos.) Este valor no es exacto, ya que el movimiento no es uniforme: en los equinoccios es mayor y en los solsticios es menor que $15'$, como veremos.

V. **Mídese la declinación** con el círculo mural. Cuando el sol pasa por el meridiano, se mide la distancia cenital de la orilla superior y después la de la orilla inferior, y la semisuma expresa la distancia cenital del centro: esta cantidad y la altura del polo, o sea latitud de la estación, permiten calcular el valor de la declinación.

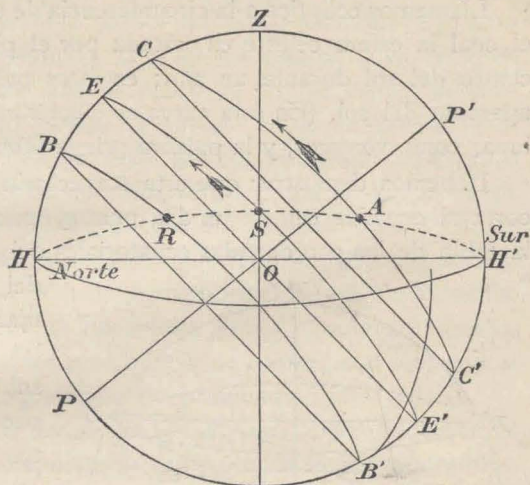


Fig. 31. Declinación del sol.

§ 35. LA ECLÍPTICA.

Llamamos eclíptica a la circunferencia de un círculo máximo según el cual la esfera celeste es cortada por el plano en que se mueve el centro del sol durante un año; en otras palabras: es la trayectoria aparente del sol. (En esta curva se efectúan los eclipses de sol y de luna, como veremos, y la palabra griega *ἑκλειψις* significa componer.)

Debemos demostrar que esta trayectoria es una curva plana que corta al ecuador celeste en dos puntos opuestos. Es fácil componer la tabla de las coordenadas ecuatoriales del sol para todos los días

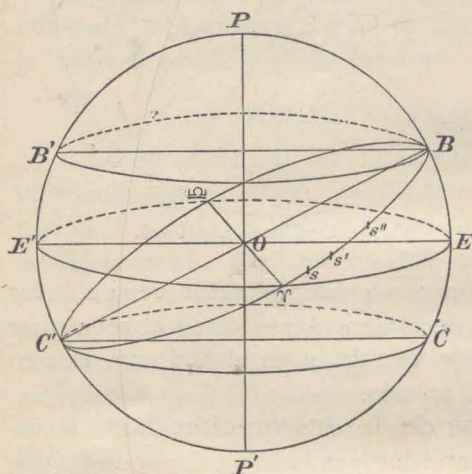


Fig. 32. La eclíptica.

del año y por su medio fijar sobre un globo celeste las posiciones s , s' , s'' del sol (fig. 32) en los días respectivos; se unen los puntos marcados por un trazo continuo. Después de unos 365 días se observará que el sol vuelve a ocupar los mismos puntos que antes, obteniéndose el camino BC' que el sol describe en la bóveda celeste y que es la eclíptica. Si hacemos pasar una circunferencia de círculo máximo por dos cuales-

quiera de los puntos, resulta que la circunferencia contiene todos los demás puntos, lo que prueba que la trayectoria es plana. Lo mismo se evidencia por medio del ángulo BOE , que es invariable durante el año. Esta curva corta al ecuador en los dos puntos donde la declinación es cero.

Nota 1. No es lícito deducir de esta observación que la curva trazada sea la verdadera forma de la trayectoria. Nosotros dirigimos los rayos visuales al sol sin preocuparnos de la distancia; los proyectamos sobre la bóveda celeste obteniendo así tan sólo las direcciones. Veremos que la verdadera forma de la eclíptica es una elipse que en realidad es recorrida por la tierra, estando el sol fijo en uno de sus focos.

Nota 2. El valor de la inclinación de la eclíptica no es invariable, como veremos al tratar de los movimientos de la tierra.

§ 36. DEFINICIONES RELATIVAS AL MOVIMIENTO DEL SOL.

1. **Los equinoccios.** Es evidente que la eclíptica no coincide con el plano del ecuador, porque el sol tiene movimiento propio en

declinación; por otra parte tiene dos puntos en que su declinación es cero; estos puntos en que la eclíptica corta al ecuador, se llaman *equinoccios*, porque al hallarse el sol en ellos, describe un arco diurno que es igual al nocturno. Uno de los puntos lleva *el signo* Υ y se llama *punto Aries*, que se refiere al 21 de marzo, cuando el sol pasa del hemisferio austral al boreal; como en este día empieza la primavera para el hemisferio boreal, se designa este punto con el nombre de equinoccio de primavera o *punto vernal* (del latín *ver*, la primavera); con respecto al hemisferio austral es el equinoccio de otoño. El segundo punto lleva *el signo* ♎ y se llama equinoccio de *Libra* (balanza), cuando el 21 de septiembre el sol vuelve al hemisferio austral. Con respecto al hemisferio boreal empieza el otoño, por lo cual se llama también equinoccio de otoño; con respecto al hemisferio austral es el equinoccio de primavera.

Se comprende que las denominaciones *punto Aries* o equinoccio de marzo, *punto Libra* o equinoccio de septiembre son preferibles, porque no dan lugar a equivocaciones.

2. **Los solsticios** son dos puntos C' y B (fig. 32), en que la declinación alcanza su máximo austral y boreal de $-23^{\circ} 27'$ y $+23^{\circ} 27'$, valor absoluto; se les designa con este nombre porque el sol *parece* en ellos detenerse durante unos diez días, siendo entonces muy pequeña la variación del sol en declinación (la palabra deriva del latín *sol sistit*, el sol se detiene); uno es el solsticio de verano, que tiene lugar el 21 de junio; el otro es el de invierno, el 21 de diciembre: estas denominaciones se refieren al hemisferio boreal. Son preferibles las denominaciones universales: *solsticio de Cáncer*, el 21 de junio, y *solsticio de Capricornio*, el 21 de diciembre, porque el sol recorre dichos paralelos en estos días.

3. **Los trópicos** son dos círculos menores, paralelos al ecuador, que pasan por los solsticios; uno es boreal y se llama trópico de Cáncer, el otro es austral, llamado de Capricornio; distan $23^{\circ} 27'$ del ecuador cada uno. (La palabra *trópico* viene del griego τροπή, vuelta.)

4. **Los círculos polares** son también dos círculos menores y paralelos al ecuador, pero que pasan por los polos de la eclíptica: distan, pues, $23^{\circ} 27'$ de los polos ecuatoriales. (El eje de la eclíptica es una recta que es perpendicular en el centro a su plano; los dos puntos donde penetra en la esfera celeste, son los polos de la eclíptica.)

5. **Perigeo y apogeo.** Siendo la verdadera forma de la trayectoria del sol una elipse en que la tierra ocupa uno de los focos,

el eje mayor, que es la línea de los ápsides, corta esta curva en dos puntos. El punto más cercano a la tierra se llama perigeo, y el más lejano es el apogeo. Estas denominaciones corresponden al movimiento aparente del sol; en el sistema de Copérnico esos puntos se llaman perihelio y afelio y denotan los puntos en que la tierra tiene su menor y su mayor distancia al sol.

6. **Línea de los solsticios.** Llámase así la recta que une los dos solsticios en la elipse y es perpendicular a la línea de los equinoccios. Veremos que la línea de los ápsides antes mencionada no coincide con la línea de los solsticios, sino que forma con ella un ángulo de 10^0 , porque el sol llega al perigeo unos diez días después de haber pasado por el solsticio de invierno.

7. **El zodiaco** (ζῳδιον, animalito) es la serie de constelaciones que ocupan en la esfera celeste a uno y otro lado de la eclíptica una zona de 20^0 próximamente. Los siguientes hexámetros, que se atribuyen a Ausonio (siglo IV), expresan sus nombres en latín y el orden en que el sol las recorre:

Sunt aries, taurus, gemini, cancer, leo, virgo,

Libraque, scorpius, arcitenens, caper, amphora, pisces.

A las palabras que se usan en castellano, agregamos las figuras con que los signos suelen denotarse en los globos y mapas celestes:

1. Aries Υ

2. Tauro \mathcal{T}

3. Géminis Π

4. Cáncer \mathcal{C}

5. Leo \mathcal{L}

6. Virgo \mathcal{M}

7. Libra \mathcal{L}

8. Escorpio \mathcal{M}

9. Sagitario \mathcal{S}

10. Capricornio \mathcal{C}

11. Acuario \mathcal{A}

12. Piscis \mathcal{P}

En la zona del zodiaco están las órbitas de todos los planetas.

Los antiguos habían dividido esta zona en 12 partes iguales de 30^0 cada una, llamándolas *signos* del zodiaco. Cada signo era señalado en conformidad con la constelación que le daba el nombre. Hace unos 2200 años los *signos* coincidían con las constelaciones; pero Hiparco, en el año 150 antes de nuestra era, pudo observar un cambio de los cuatro puntos cardinales, del Este hacia el Oeste. Actualmente los signos se hallan unos 30^0 al Oeste de las constelaciones respectivas; así el punto vernal, cuyo signo es *Aries*, se halla en Piscis; el equinoccio de otoño, cuyo *signo* es Libra, se halla en Virgo; los signos de los solsticios, en Géminis y Sagitario. Este cambio se debe al fenómeno de la precesión de los equinoccios. Sin embargo se ha conservado el uso de denotar

los equinoccios con los signos de Aries y Libra y los solsticios con los signos de Cáncer y Capricornio; pero no han de confundirse los signos con las constelaciones del mismo nombre.

8. **Estaciones:** sobre su definición y duración véase libro V, cap. 2.

§ 37. OBLICUIDAD DE LA ECLÍPTICA.

Ya se ha indicado que la eclíptica forma con el plano del ecuador un ángulo: vamos ahora a demostrar que la oblicuidad de la eclíptica es igual a la semi-diferencia que dan las alturas meridianas del sol en los solsticios de verano y de invierno.

Entiéndese por oblicuidad de la eclíptica el ángulo que forma el plano de esta curva con el plano del ecuador; este ángulo se mide por su rectilíneo BOE y por lo tanto por el arco EB . En la fig. 33 el círculo es un meridiano, las dos rectas BB' y CC'

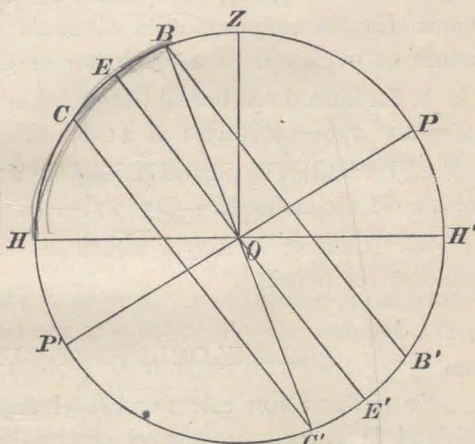


Fig. 33. Oblicuidad de la eclíptica.

son las trazas de los dos trópicos, HH' es la meridiana. En el solsticio de verano el sol describe el trópico de Cáncer BB' y su altura meridiana es BH ; en el solsticio de invierno esta altura será CH : sabemos que $EB = EC$ (§ 34). Tenemos que el ángulo $EOB = \text{arco } EB = \frac{BC}{2} = \frac{BH - CH}{2} = 23^{\circ} 27'$.

La recta BC' es la traza del plano de la eclíptica sobre el meridiano.

§ 38. ALTURA MERIDIANA DEL SOL.

Conocida la latitud terrestre y la declinación del sol es fácil calcular su altura o distancia cenital que tiene a mediodía.

I. **Zona templada.** Denotamos con la letra A esta altura y con HE la altura del ecuador o sea la declinación del horizonte, que es $90^{\circ} - \varphi$. $A = HE + D$ si el sol está en el mismo hemisferio que el observador; $A = HE - D$ en el caso contrario.

Ejemplo: la mayor y menor altura del sol, estando el observador en la latitud $\varphi = 33^0$ Sur ($HE = 57^0$). El 21 de diciembre $A = 57^0 + 23^0 27'$; el 21 de junio $A = 57^0 - 23^0 27'$. En los equinoccios la altura del sol es la del ecuador. (Formar ejemplos para otras latitudes.)

II. Para los puntos *de la zona tórrida* es más fácil calcular la distancia cenital del sol y restarla de 90 grados para obtener la altura. En estos puntos el sol pasa dos veces al año por el cenit: se halla, pues, unas veces al norte y otras veces al sur del cenit. En los equinoccios la distancia cenital es igual a la latitud, como es evidente. Para los solsticios debemos distinguir:

1. La latitud sea boreal (Bogotá, Caracas, Panamá). El 21 de junio $Z = 23^0 27' - \varphi$ Norte; el 21 de diciembre $Z = 23^0 27' + \varphi$ Sur.

2. La latitud es austral (Lima). El 21 de junio $Z = 23^0 27' + \varphi$; el 21 de diciembre $Z = 23^0 27' - \varphi$.

III. ¿Cuál es la mayor altura del sol para un observador colocado en el polo?

§ 39. VELOCIDAD ANGULAR DEL SOL.

Se designa con este nombre el ángulo que describe *en un día sideral* la recta que une el centro de la tierra con el centro del sol (*radio vector* se llama esta recta). Si esta velocidad fuese constante, sería fácil calcularla; porque si el radio vector describe 360^0 en 366,247 días siderales (entre dos pasos consecutivos por el punto vernal), en un día sideral recorre 366,247 veces menos, esto es, $59' 10''$ de arco. En realidad esa velocidad varía: tiene su máximo de $1^0 1' 10''$ a fines de diciembre, su mínimo de $57' 11''$ a fines de junio; suponiendo el movimiento uniforme, se toma el valor de $59' 10''$ como *velocidad media*.

§ 40. EL GNOMON.

En el § 13 (pág. 23) hemos visto cómo, por medio de un estilete vertical, puede determinarse la meridiana de un lugar; una vez hecha esta operación, se sabrá que el sol pasa por el meridiano cuando la sombra del estilete coincide con esta meridiana. Marcando a mediodía la extremidad de la sombra en los diferentes días del año, se pueden determinar los equinoccios y los solsticios, lo mismo que la oblicuidad de la eclíptica y la altura del polo sobre el horizonte del punto de observación.

En la fig. 34 sea el estilete la recta OM , que en la antigüedad tenía a veces una altura considerable; MH es la meridiana: estas dos rectas fijan la posición del meridiano. Cuando la sombra MC es mínima en el *hemisferio Sur*, se verifica el solsticio de invierno, el 21 de diciembre, por ser máxima la altura del sol; la sombra MB es máxima el 21 de junio, en el solsticio de verano. Si trazamos la bisectriz OE del ángulo COB , obtenemos el punto E , que marca la sombra en los equinoccios; al coincidir, pues, la extremi-

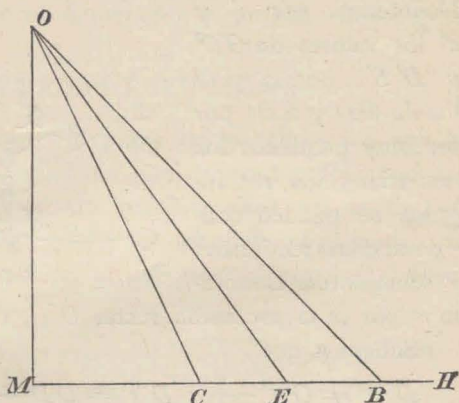


Fig. 34. El gnomon.

dad de la sombra sobre este punto, se sabe que el sol está en uno de los equinoccios. Esta determinación del punto de los equinoccios es exacta, porque la longitud de la sombra varía rápidamente en esta época por variar con rapidez la declinación: pero la determinación del de los solsticios es poco exacta.

El plano que se lleva perpendicularmente por OE sobre el meridiano, es el ecuador; el ángulo OEM es la inclinación del ecuador sobre el horizonte, su complemento MOE es la altura del polo o la latitud, por ser ésta igual a la distancia cenital del ecuador, que es el complemento de la inclinación del ecuador sobre el horizonte: el ángulo BOE es la oblicuidad de la eclíptica.

(En la fig. 33 se manifiestan mejor los ángulos que se han mencionado.)

*§ 41. DETERMINACIÓN DEL PUNTO ARIES.

Este punto no puede determinarse con exactitud por medio del antejo meridiano, porque no pasa exactamente a mediodía por el meridiano ni está señalado por una estrella. Por otra parte debe ser exacta la determinación de su posición, puesto que es el origen del día sidereal y de las ascensiones rectas. Veamos cómo se obtiene este punto por cálculo. En la fig. 35 sea EE' un arco del ecuador y BC uno de la eclíptica cerca del punto vernal; sea O un origen arbitrario de las ascensiones rectas, v. g. el pie del círculo horario de Rígel.

Supongamos que a mediodía del 20 de marzo la declinación del sol sea austral $D'S'$ y el 21 sea boreal SD a la misma hora. Denotemos por a' y d' los valores de OD' y $D'S'$, por a y d los de OD y SD ; por ser muy pequeños los dos triángulos rectángulos se pueden considerar como rectilíneos y semejantes. Denotemos por x la ascensión recta, $O\gamma$, del punto vernal.

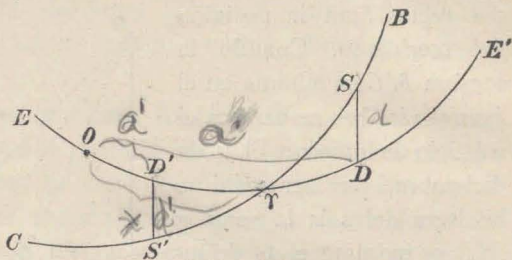


Fig. 35. El punto Aries.

Sabemos que

$$D'\gamma = O\gamma - a'; \quad D\gamma = OD - x; \quad \text{luego} \quad \frac{D'\gamma}{D\gamma} = \frac{D'S'}{DS};$$

substituyendo resulta $\frac{x - a'}{a - x} = \frac{d'}{d}$. Despejando la incógnita ten-

$$\text{dremos: } x = \frac{ad' + ad}{d + d'}.$$

Por medio de esta fórmula se calcula la ascensión recta x con relación a un punto fijo y visible.

§ 42. HORA DEL EQUINOCCIO.

El instante en que el centro del sol toca el plano del ecuador al pasar del hemisferio Sur al boreal, debe determinarse con suma exactitud por razones ya explicadas. Para facilitar la inteligencia del método que se sigue, daremos un ejemplo concreto y sencillo con números redondos.

Supongamos que el 20 de marzo a mediodía la declinación austral del centro solar $D'S'$ es de $10'$; el día siguiente, a la misma hora, la declinación boreal SD es de $20'$ (valor exagerado): en el punto Aries la declinación era cero. Por ser el arco SS' muy pequeño podemos admitir que el movimiento del sol era uniforme al recorrer este arco; obtenemos, pues, la proporción: si en 24 horas la declinación variaba en $10' + 20' = 30'$, ¿en cuántas horas se efectuaba la variación de $10'$ para llegar a cero?

$$\frac{10}{30} = \frac{x}{24}; \quad \text{luego } x = 8^h.$$

El equinoccio se verificó el 20 de marzo a las 8^h de la tarde. Supongamos que el 20 de marzo sea $D = 14'$ Sur y el 21 sea $D' = 7'$ Norte: Tenemos que $(14 + 7): 14 = 24 : x$. Resulta $x = 16$

horas. El equinoccio se verificará el 21 de marzo a las 4 de la mañana. Si en el resultado hay fracción de horas, se reduce a minutos multiplicando por 60 el numerador y simplificando.

§ 43. COORDENADAS ECLÍPTICAS.

Estas coordenadas se refieren al plano de la eclíptica y son la *longitud* y la *latitud astrales*, que no han de confundirse con las coordenadas geográficas del mismo nombre. Sea en la fig. 36 $E'E$ una mitad del ecuador, $C'B$ la eclíptica, O el centro de la esfera celeste. Llámase eje de la eclíptica la recta QQ' perpendicular en el centro al plano de esta curva; sus polos son los puntos de contacto del eje con la esfera celeste. Sea M un astro cualquiera, y veamos las definiciones.

Latitud de un astro

M es la distancia angular del astro a la eclíptica, contada sobre la circunferencia del círculo máximo QMQ' , que pasa por el astro y los polos de la eclíptica: puede ser austral y boreal.

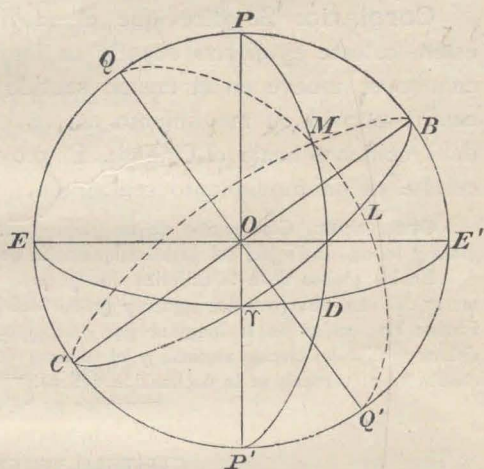


Fig. 36. Coordenadas eclípticas.

Longitud astral es el arco de la eclíptica comprendido entre el punto que se toma por origen, y el punto en que el círculo máximo que pasa por los polos de la eclíptica y el astro, corta a ésta. Los grados se cuentan del Oeste al Este, desde 0° a 360° .

En la fig. 36 el arco QL es la longitud de la estrella M , el arco ML su latitud, QD su ascensión recta, MD su declinación.

En los fenómenos que se relacionan con el movimiento diurno, se usan las coordenadas ecuatoriales, puesto que tanto el movimiento aparente de la esfera celeste como la rotación de la tierra se ejecutan en derredor del eje ecuatorial (eje del mundo); pero en los fenómenos que son independientes de la rotación, se prefieren las coordenadas eclípticas. Para medir éstas directamente no existen instrumentos de precisión: se determinan por cálculo trigonométrico, o también marcando la ascensión recta y la decli-

nación del astro M sobre un globo celeste, lo que da la posición del astro, y entonces se puede medir la longitud y latitud por los arcos $\cap L$ y ML .

En cuanto al sol, se comprende que su latitud es siempre *cero*, porque el sol se mueve sobre la eclíptica; pero su longitud aumenta constantemente; cuatro veces al año las ascensiones rectas y las longitudes del sol son iguales entre sí: en los puntos de los equinoccios y de los solsticios.

La longitud del sol, en cualquier día, es igual a tantas veces un grado, cuantos días han transcurrido desde el 21 de marzo hasta la fecha en cuestión. (Pónganse ejemplos.)

Corolario. Se dice que el movimiento de un astro en la esfera celeste es *directo* cuando su longitud va creciendo, esto es, cuando se mueve en el mismo sentido aparente que el sol; en el caso contrario su movimiento es *retrógrado*: el primero se dirige del Occidente hacia el Oriente. El movimiento diurno de la esfera celeste es un movimiento retrógrado.

Observación. Con auxilio de un globo bien construido podemos hallar la *longitud* y la *declinación* del sol para cualquier día del año.

En los globos lleva la eclíptica dos géneros de divisiones: una para los días y meses del año, otra para los signos y grados del zodíaco: en esta última división se buscan los grados de la longitud que corresponde al día señalado; este punto se coloca debajo del círculo vertical, y el número de grados que hay hasta el ecuador (leídos en el vertical) es la *declinación* del sol.

CAPÍTULO SEGUNDO.

FORMA DE LA ÓRBITA DEL SOL.

§ 44. DIÁMETRO APARENTE. EXCENTRICIDAD.

Llámase diámetro aparente del sol el *ángulo* formado por dos rayos visuales, que se dirigen tangentes desde el ojo del observador a las orillas diametralmente opuestas del disco de aquél; por ejemplo, del disco solar (fig. 37) lo es el ángulo AOB . Se denomina así porque a causa de la gran distancia del sol la recta AB que une los puntos de contacto, se confunde *sensiblemente*¹ con el diámetro: el ángulo formado por las tangentes es el ángulo bajo el cual un observador ve el disco solar; si este ángulo es constante durante el año, podemos deducir que también la distancia OS debe ser

¹ Las visuales son en rigor tangentes en CD (fig. 1), esto es, las extremidades de una cuerda poco distante del diámetro.

constante; pero si su magnitud cambia, resulta que también la distancia ha variado.

Para medir el diámetro aparente vertical del sol, se mide, con auxilio del círculo mural, la distancia cenital de la orilla inferior en el momento del paso por el meridiano, y después la de la orilla superior: la diferencia $d - d'$ nos dará el diámetro aparente vertical. Para medir el diámetro aparente horizontal se emplea el anteojo meridiano. A este efecto observamos en el péndulo sidereal el instante en que el disco solar tiene su contacto occidental con el hilo vertical del retículo y después el oriental. Por la diferencia del tiempo observado se obtiene el tiempo que emplea el diámetro aparente horizontal para pasar por el meridiano; los minutos y segundos de tiempo se multiplican por 15, con lo cual se obtiene el ángulo buscado en minutos y segundos de arco.

Las observaciones hechas en un mismo día prueban que el diámetro horizontal y el vertical son iguales, de donde se deduce que el disco solar es circular

El valor del diámetro aparente del sol es diferente en las diversas épocas del año; llega a su máximo de $32' 36''$ a fines de diciembre, y a su mínimo de $31' 32''$ a fines de junio; dividiendo la suma por 2 se obtiene $32' 4''$, que es el valor medio; veremos cómo estas variaciones sirven para determinar la forma de la órbita que en apariencia describe el sol en su movimiento anual.

Teorema. Las distancias de la tierra al sol están en razón inversa de los diámetros aparentes que ofrece el disco solar durante el año. (Esta ley, que se ha demostrado en el § 4, es el fundamento de la presente investigación.)

La excentricidad. Por variar las distancias de la tierra al sol se comprende que la órbita no puede ser una circunferencia circular en cuyo centro está la tierra. Para resolver, pues, las

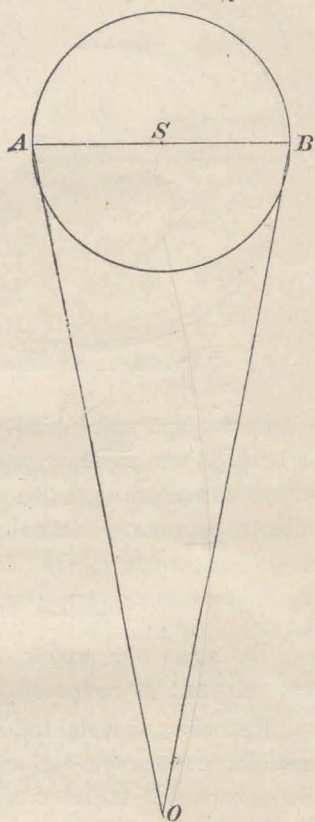


Fig. 37. Diámetro aparente.

dificultades suponían los antiguos que el sol describe con movimiento uniforme una excéntrica, esto es, una circunferencia circular cuyo centro se halla *fuera* del centro de la tierra. Llámase **excentricidad** la distancia del centro terrestre al centro de aquel

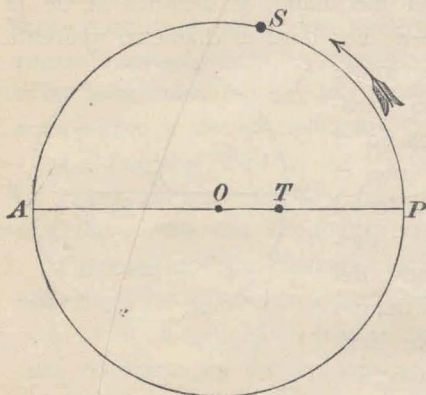


Fig. 38. Excéntrica de los antiguos.

círculo, o mejor dicho, la relación de la cantidad OT (fig. 38) con el radio OP . El movimiento en torno del punto O sería uniforme (es el movimiento medio) y en torno del punto T variado; pero veremos que en realidad el movimiento del sol no es uniforme. Según la hipótesis antigua, la distancia del sol a la tierra sufre sobre esa excéntrica una variación igual a la trigésima parte de su valor medio; pero la medida de los

diámetros aparentes hizo ver que la variación real no es más que la sexagésima parte, y por lo tanto la primera excentricidad es dos veces demasiado grande. Por este motivo Képler renunció al movimiento circular, y descubrió el movimiento elíptico.

§ 45. LA ÓRBITA ES UNA ELIPSE.

*La curva que parece describir el sol en su movimiento anual, es una **elipse**; la tierra ocupa uno de sus focos.*

Recordemos ante todo que la longitud astral del sol se puede calcular conociendo la ascensión recta y la declinación del astro. Se construyen tablas con cuatro columnas que contienen la fecha de la observación, el diámetro aparente, las longitudes y las diferencias sucesivas de éstas. La distancia del sol a la tierra se calcula por medio de la paralaje, como veremos.

Demos por conocida la distancia TP (fig. 39), la que corresponde al perigeo; por su medio y los diámetros aparentes puede calcularse la distancia que corresponde a otro punto S , según la proporción $ST:TP = n:n'$, tomando TP por unidad y denotando por n el diámetro aparente que corresponde al perigeo. Veamos ahora cómo se encuentra que la curva es una elipse.

Supongamos formadas las tablas mencionadas. Tracemos sobre el papel una circunferencia de círculo con un radio arbitrario TH ,

la que representa la eclíptica o sea el círculo máximo celeste sobre el cual nosotros *proyectamos* siempre el sol; el punto T marca el centro terrestre. Tome-
mos como origen de la
operación el 31 de diciem-
bre, cuando la velocidad
angular del sol lo mismo
que su diámetro aparente
alcanzan su máximo:
para este día se marca
arbitrariamente la posi-
ción del sol en P y se
prolonga el radio vector
hasta H . Desde H se mar-
can en la circunferencia
de círculos arcos HB ,
 BC , etc.; iguales al au-
mento diurno en longitud

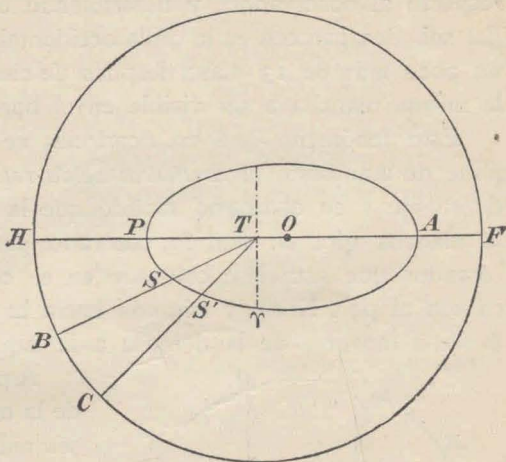


Fig. 39. Órbita del sol.

(en la figura no se guarda proporción), y se trazan los radios TB , TC , etc.; sobre estos radios se toman magnitudes desde T , que sean proporcionales a las distancias correspondientes, a saber TS , TS' , etc., y haciendo pasar un trazo continuo por los puntos S , S' , etc., tendremos la trayectoria del sol. Képler demostró que la curva así obtenida es una elipse y que la tierra ocupa uno de sus focos: el eje mayor AP es la línea de los ápsides (del griego ἄψις, bóveda)¹.

Nota. Si O es el centro de la elipse, la excentricidad es $OT:OP$, siendo OP el semieje mayor de la elipse; el cálculo manifiesta que el valor de esta excentricidad es la sexagésima parte de la longitud que tiene el semieje mayor, de donde se deduce que la órbita aparente del sol difiere poco de la forma circular.

CAPÍTULO TERCERO.

ROTACIÓN DEL GLOBO SOLAR.

§ 46. MOVIMIENTO PROPIO DE LAS MANCHAS.

En el disco solar se han observado manchas que guardan durante varias semanas, y hasta por algunos meses, cierta invariabilidad en la forma, la magnitud y en su posición relativa: por

¹ En el caso de ignorar el alumno las propiedades esenciales de la elipse, debe estudiarlas: se da una breve explicación de ella en el § 29.

esta circunstancia se llaman *fixas*, lo que no quiere decir que son inmóviles. Aparecen a veces en la orilla oriental del disco (con respecto al observador), y describiendo un arco paralelo al ecuador del sol, desaparecen en la orilla occidental gastando en este trayecto un poco más de 13 días; después de cierto número de días vuelve la misma mancha a ser visible en el borde oriental.

Este fenómeno que en ocasiones se repite hasta ocho veces, pone de manifiesto la *existencia de la rotación*: el sol gira en torno de su eje y en el mismo sentido que la tierra, del Oeste al Este: la mancha gira en sentido contrario para nosotros, pero un observador que estuviese colocado en el centro del sol, dirigida la cabeza al polo Norte y mirando hacia la mancha (frente a la tierra), la vería moverse de la derecha a la izquierda, del Oeste al Este.

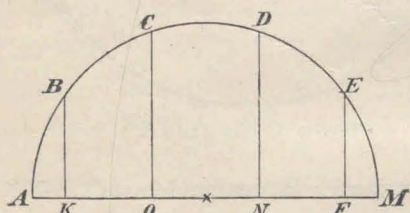


Fig. 40. Movimiento de las manchas.

A primera vista el movimiento de la mancha parece variado, por ser más lento en la vecindad de las orillas que no en el centro; pero esto no es otra cosa que un efecto de la perspectiva. Supongamos el arco de la fig. 40 dividido en cinco partes iguales; la

mancha, aunque recorra las partes del paralelo en tiempos iguales, parece en su perspectiva recorrer las proyecciones en tiempos desiguales por ser esas desiguales entre sí: $AK < KO$, etc., y por lo tanto la mancha camina más despacio en los trayectos más cortos. Se deduce de ahí que el movimiento de rotación es uniforme.

El ecuador del sol forma con la eclíptica un ángulo de $7^{\circ} 15'$; estará, pues, la tierra unas veces al Norte y otras veces al Sur de este ecuador, de donde se explica por qué las trayectorias de las manchas tienen formas variadas, aunque siempre describan círculos paralelos.

§ 47. TIEMPO DE UNA ROTACIÓN DEL GLOBO SOLAR.

Para calcular este tiempo es necesario distinguir el tiempo de una rotación verdadera del tiempo de la rotación aparente. En la fig. 41 sea T la posición de la tierra, por ejemplo, el 1^o de junio; el círculo OE sea el ecuador solar, suponiendo, para mayor facilidad, que su plano coincida con el de la eclíptica. Una mancha M , situada sobre el ecuador, se proyecta en el centro S estando el observador en T . Después de 27 días y 10 horas esta mancha, habiendo cumplido una vuelta, se proyecta de nuevo en el centro,

pero no en la dirección AS , sino en otro punto situado más al Este solar, por ejemplo en C : *esta es la rotación aparente. La rotación verdadera*

es el tiempo que gasta la mancha para describir 360° : sea t' este tiempo. La rotación aparente consta de 360° más el arco MC , que es igual en graduación a TR , y su tiempo, que denotamos por t , es de $27^d 10^h$. Al dar el sol una vuelta sobre su eje y al recorrer la mancha con él 360° , la tierra se ha trasladado desde T hasta R cambiando de posición con respecto al punto M . El radio vector ST describe en un día $58' 58''$, luego en $27^d 10^h$ unos 27 grados. Como la rotación es uniforme, los tiempos son proporcionales a los espacios:

$$t' : t = 360 : 360 + MC \text{ (aquí } MC = 27^\circ).$$

$$t' = \frac{27^d 10^h \cdot 360}{360 + 27}$$

$$= 25 \text{ días } 12 \text{ horas dura la rotación verdadera.}$$

Para comparar esta velocidad con la rotación de la tierra, hay que distinguir dos casos:

1. **La velocidad angular** del sol es menor que la de la tierra; porque un punto ecuatorial del sol recorre 360° en 25 días, uno de la tierra en 24 horas.

2. **La velocidad lineal** del sol es unas cuatro veces mayor que la de la tierra. En efecto: el ecuador solar mide 4 000 000 km, y el terrestre sólo 40 000 en números redondos. Esta última longi-

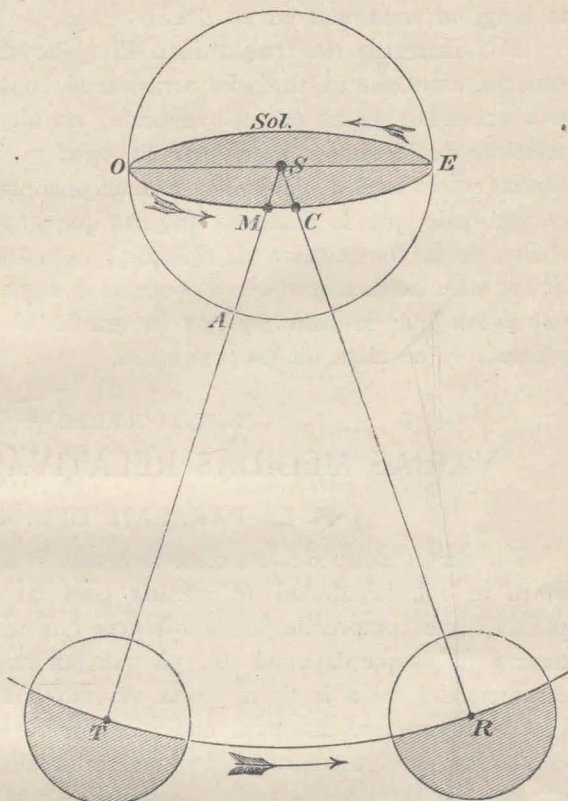


Fig. 41. Rotación del sol.

tud recorre un punto ecuatorial terrestre en un día, mientras que uno del sol debe andar 160 000 *km* en un día para recorrer toda la longitud ecuatorial en 25 días.

Movimiento de traslación. El globo solar no está fijo en el espacio, sino que se traslada, arrastrando consigo los planetas, con una velocidad de 25 *km* por segundo, en dirección hacia la constelación de Hércules. Esta extraña opinión de los astrónomos se funda en el hecho siguiente: exactas medidas micrométricas han comprobado que la distancia angular que guardan entre sí las estrellas de la constelación de Hércules, va aumentando, mientras la de las estrellas diametralmente opuestas decrece un poco; este hecho manifiesta que la tierra, y por lo mismo el sol, se acerca a las primeras y se aleja de las segundas.

CAPÍTULO CUARTO.

VARIAS MEDIDAS RELATIVAS AL SOL.

§ 48. LA PARALAJE DEL SOL.

Por ser el radio de la órbita terrestre, o sea la distancia de la tierra al sol, la unidad de medida para las órbitas de todos los planetas, se comprende la importancia que tiene la determinación exacta de la paralaje del sol, ya que por su medio se calcula la distancia del sol a la tierra, como veremos en el párrafo siguiente. El método que se usa para medir la paralaje de la luna, no puede emplearse en nuestro caso, por ser demasiado pequeño el ángulo a causa de la gran distancia del sol. Dos son los métodos que han empleado los astrónomos para determinar el valor de la paralaje del sol.

El método principal para determinar la paralaje del sol era hasta el año 1898 el paso de Venus delante del disco solar, en la conjunción inferior del planeta: este fenómeno se presentó en 1882 y volverá a presentarse en 2004 y 2012, porque en cada 243 años hay cuatro pasos posibles. Por este motivo su estudio carece de interés en la actualidad y no pertenece a la Cosmografía elemental.

Paralaje del sol calculada con ayuda de la paralaje del asteroide *Eros* (descubierto en 1896).

Una parte de la órbita de *Eros* está entre las de Marte y de Júpiter; la otra entre la de Marte y la terrestre (fig. 42): *Eros* recorre su órbita en dos años y cuatro meses y puede en la oposición acercarse a la tierra más que ningún otro planeta; la circunstancia más favorable se ofrece en los años 1919 hasta 1924.

Supongamos ahora determinada la paralaje de Eros por el método perfeccionado con que se mide la paralaje de la luna.

Tomando la distancia TS del sol a la tierra por unidad, sábese en virtud de la tercera ley de Képler que en una posición determinada, la distancia ET de Eros a la tierra es la $0,15^a$ parte de ST , de donde resulta que

$$\frac{ST}{ET} = \frac{1}{0,15} = \frac{100}{15} = 6,7.$$

Esto significa que la distancia del sol a la tierra, en la posición mencionada, es 6,7 veces *mayor* que la de Eros a la tierra. Aplicando la ley de los diámetros aparentes se comprende que *la paralaje del sol es 6,7 veces menor que la paralaje de Eros*: si esta última tuviese $59''$, la del sol sería $59 : 6,7 = 8'',80$.

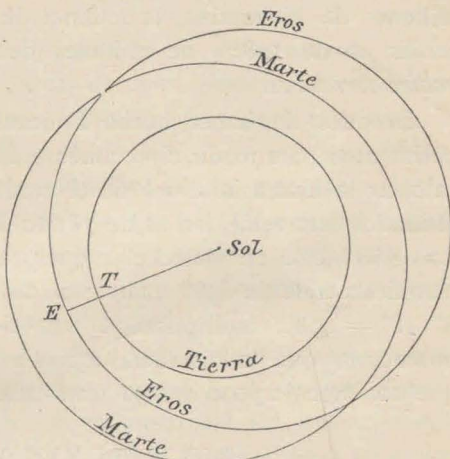


Fig. 42. Órbita de Eros.

§ 49. DISTANCIA DEL CENTRO SOLAR AL CENTRO DE LA TIERRA.

En 1896 adoptó el Congreso astronómico, reunido en París, el valor de $8'',80$ como valor medio de la paralaje del sol. Se calcula la distancia media del centro solar al centro de la tierra según el método explicado:

$$d = \frac{\rho}{p} \cdot R' = \frac{206\,265}{8'',80} \cdot R' = 23\,439 R' \text{ o sea } 149\,501\,000 \text{ km.}$$

La distancia media entre los dos centros es de unos 23400 radios terrestres en número redondo. El radio terrestre equivale a 6377 km ; luego la distancia es de unos 38000000 de leguas de a 4 km , o también es igual a 126 radios *solares*. Los principales autores la calculan en $150\,000\,000 \text{ km}$, número redondo. Un tren expreso que ande 50 km por hora, necesitaría 340 años para recorrer esta distancia. Una bala de cañón que tenga la velocidad de 500 m por segundo, gastaría 18 años. La luz la recorre en $8^m\,23^s$.

Hemos visto que la órbita aparente del sol es una elipse; por consiguiente no es invariable la distancia: la máxima es de $151\frac{1}{8}$ millones de kilómetros, la mínima de $146\frac{1}{7}$ millones; *la distancia media* es de $148\frac{2}{3}$ de millones de kilómetros o sea de 23312 *radios terrestres*.

Después de haber hecho Foucault y Fizeau sus notables experimentos para medir directamente la velocidad de la luz, se puede calcular la distancia al sol sin el auxilio de la paralaje: en números redondos esta velocidad es de 78 000 leguas de a 4 *km* por segundo. La observación de los eclipses que presentan los satélites de Júpiter, manifiesta que la luz recorre la distancia del sol a la tierra en $8^m 18^s = 498^s$: multiplicando este tiempo por aquella velocidad, obtenemos que la distancia equivale a unos 38 000 000 de leguas, que son unos 23 000 radios terrestres.

§ 50. RADIO, VOLUMEN Y MASA DEL SOL.

1. **Radio del globo solar.** Su medida se funda en el principio siguiente que se ha explicado en el § 4.

Tratándose de dos cuerpos (sol y tierra) vistos desde una misma distancia, que suponemos muy grande, la magnitud de sus diámetros verdaderos es directamente proporcional a la magnitud de sus diámetros aparentes. Denotando por D y D' los diámetros del sol y de la tierra, por n y n' los ángulos que son los diámetros

$$D : D' = n : n'. \quad (1)$$

Es evidente que podemos decir lo mismo de los radios verdaderos y aparentes (basta dividir por 2 los términos de la proporción que precede). Ahora bien: el diámetro aparente del sol, visto desde la tierra, mide $32'$ (valor medio), y por lo tanto mide el radio aparente $16'$, los que dan $960''$ de arco. Por otra parte el radio aparente de la tierra, visto desde el centro solar, mide $8'',80$, porque es la paralaje del sol. Denotemos por R el radio verdadero del sol, por R' el radio terrestre que es la unidad de medida: resulta que

$$R : R' = 960 : 8,80$$

luego

$$R = 109 R'.$$

El radio del sol equivale a 109 radios terrestres.

El diámetro del sol equivale a 109 diámetros terrestres, que son 1 390 000 *km*.

La circunferencia ecuatorial es $2 \pi R = \pi D$, o sea más de 4 000 000 *km*. Un viajero que caminara 74 *km* (unas 10 leguas

geográficas) por día, daría la vuelta al sol en unos 60000 días, que forman 160 años; para dar la vuelta a la tierra bastarían 540 días.

2. **La superficie del sol** es unas 12000 veces mayor que la superficie terrestre; porque las áreas de dos superficies esféricas son entre sí como el cuadrado de sus radios (S' la superficie terrestre). $S : S' = R^2 : 1$; luego $S = 108,4^2 \cdot S'$.

3. **Volumen del sol.** Los volúmenes de dos esferas son entre sí como el cubo de sus radios; resulta que el volumen del sol es 1284000 veces mayor que el volumen de la tierra; en otras palabras: si el sol fuese una esfera hueca, se necesitaría el volumen de 1284000 globos terrestres para llenarla.

Sábase por cálculo que en un litro caben unos 10000 granos de trigo; luego en 130 litros, que forman una fanega, caben 1300000 granos; esto supuesto, el volumen del sol queda representado por la fanega, y un grano de trigo representa el volumen de la tierra; la 49ª parte de este grano corresponde al volumen de la luna.

Si el globo solar estuviese hueco, coincidiendo su centro con el centro de la tierra, cabría dentro de él la órbita lunar y todavía sobraría la misma distancia hasta llegar a la superficie del sol.

4. **Masa del sol.** Por métodos algo complicados se ha podido calcular que la masa del sol es 324000 veces mayor que la masa de la tierra (otros autores dan el número 325000). Hemos visto que 1284000 globos terrestres juntos forman un volumen igual al volumen del sol; pero en cuanto a la masa bastan unos 350000 globos terrestres para equilibrar el *peso* del sol; por consiguiente, si el sol se descompusiese en 1284000 globos del tamaño de la tierra, cada uno pesaría unas cuatro veces *menos* que el globo terrestre; por lo tanto, *la densidad media* del sol es cuatro veces menor que la de la tierra; siendo la densidad media de ésta con respecto al agua igual a 5,48, la del sol es 1,5. Dividiendo la masa del sol por su volumen resulta que su densidad con respecto a la tierra es 0,27.

5. Si referimos **la atracción** ejercida en la superficie del sol a la atracción ejercida en la superficie de la tierra, y denotamos por A , M , R la atracción, la masa y el radio del sol, tomando la masa m , el radio r y la gravedad g de la tierra por unidad de medida, tenemos la proporción:

$$A : g = M : R^2 = m : r^2; \text{ luego } A = \frac{M}{R^2} \cdot g = 29 \cdot g.$$

Un cuerpo que pesa un kilogramo en la superficie terrestre, pesaría unos 29 *kg* en la superficie solar; al caer un cuerpo recorre en el primer segundo 136 metros.

CAPÍTULO QUINTO.

CONSTITUCIÓN DEL SOL.

§ 51. ASPECTO GENERAL DEL DISCO SOLAR.

El globo solar, en su proyección sobre la esfera celeste, se presenta como un disco brillante de gran limpieza; pero cuando está en el horizonte basta observarlo con atención, sea a simple vista, sea con un anteojo de débil alcance, para descubrir en él ciertas manchas oscuras; sin embargo, sólo con la ayuda de telescopios algo poderosos puede uno observarlas con exactitud: y es de notar que tanto el estudio de esas manchas como el descubrimiento de la rotación del sol fueron el primer resultado que se obtuvo por la invención de los anteojos. La existencia de las manchas ya era conocida de los árabes en tiempos remotos; pero los primeros que estudiaron detenidamente su posición y naturaleza, fueron los astrónomos Fabricio de la Frisonia (en 1611), Galileo y el P. Scheiner en Roma. A este respecto escribió Lalande: «Sea lo que fuere acerca de la prioridad histórica en esta cuestión, es indudable que nadie observó entonces mejor las manchas solares ni dió una teoría astronómica más satisfactoria que el jesuita alemán Scheiner.» En el párrafo siguiente se dan los detalles más importantes sobre las manchas solares.

§ 52. MANCHAS DEL SOL.

1. **Posición.** Las manchas solares aparecen habitualmente en zonas comprendidas entre los 20 y 40 grados al Norte y al Sur del ecuador solar: escasean a mayor latitud y no aparecen nunca en la vecindad del ecuador ni en la región polar.

2. **Forma.** Una mancha aislada es próximamente de forma circular (fig. 43); si en los bordes del disco solar ofrecen la forma oblonga, ésta es debida a la proyección ortogonal, de que se trata en el libro IV.

Toda mancha consta de un *núcleo* que parece obscuro, de la *penumbra*, que es el circuito gris, y de las *fáculas*, que son las partes más brillantes, debidas al hidrógeno en incandescencia. En realidad tienen las manchas gran brillo, pero aparecen oscuras por el contraste con la fotósfera.

Con frecuencia se forman **grupos** de manchas pequeñas reunidas en torno de una o dos manchas grandes.

La fig. 44 representa el grupo fotografiado por el P. A. Secchi.

3. Aparición. Hay manchas que se forman a la vista del observador para desaparecer después

de pocos días; otras persisten durante diez o doce rotaciones del sol: a pesar de los cambios que sufre una mancha en sus formas y dimensiones, se reconoce su identidad con auxilio de las coordenadas solares que fijan su posición heliográfica.

4. Periodicidad. Se ha comprobado que existe una variación periódica de 11 años próximamente: el máximo puede llegar a 80 manchas en un solo año; pero también sucede que durante varios meses no se presente ni una mancha o pocas y pequeñas, para formarse en seguida gran número de ellas.

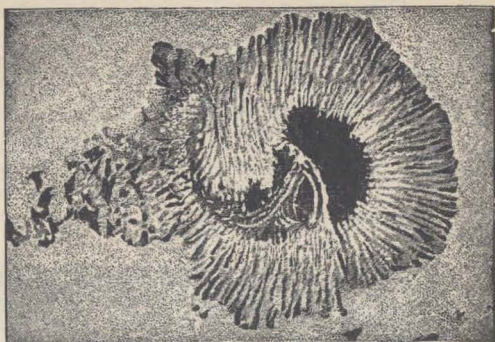


Fig. 43. Mancha aislada.

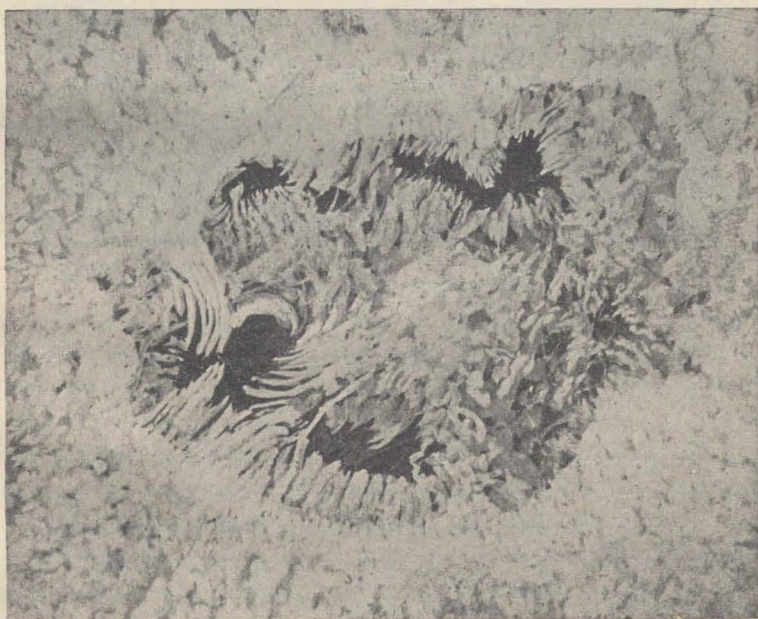


Fig. 44. Grupo de manchas.

5. **Dimensiones.** Éstas son notablemente variadas; desde 100 leguas cuadradas, hasta una extensión que es 18 veces mayor que la superficie de la tierra. Si una mancha que está frente al observador ofrece un diámetro aparente de un segundo de arco, su magnitud real es de 100 leguas geográficas.

6. **Influencia.** Se ha podido comprobar que al número y tamaño de las manchas solares corresponden sobre la tierra variaciones

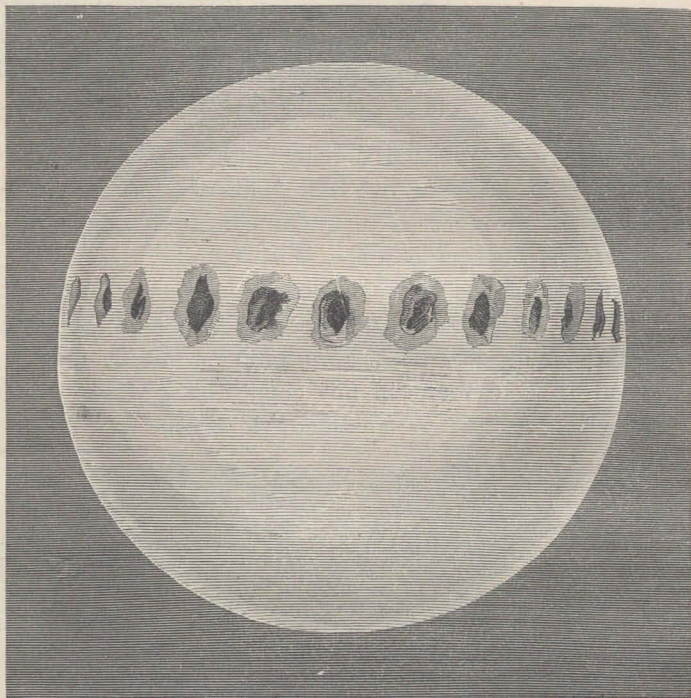


Fig. 45. Forma de una mancha.

en la brújula magnética, en las corrientes telúricas y en las auroras boreales; pero su relación con el estado meteorológico permanece dudosa.

7. **Naturaleza.** Que las manchas del sol son cavidades en la atmósfera solar está hoy día fuera de duda: su forma es la de un inmenso embudo cónico cuya cúspide se dirige hacia el núcleo del globo solar.

La fig. 45 representa el aspecto de una mancha al desfilarse; en virtud de la rotación del globo solar delante del observador, al estar en la región oriental del disco solar, presenta la parte oriental

de sus paredes, pero en forma oblonga; desde el centro ofrece todo su interior en forma circular; en el borde occidental ofrece las partes de la pared occidental. Con facilidad se comprende que tan sólo una cavidad honda puede ocasionar tales variedades en el aspecto. (Se puede convencer el alumno practicando una cavidad cónica en una papa grande, pintando el fondo en color obscuro y haciéndola desfilas de un lado a otro.)

Que las manchas no pueden ser efecto de montañas, es evidente; porque éstas tienen la existencia, la forma, la extensión invariables, se destacarían en los bordes del disco solar y no podrían ofrecer el aspecto de cavidades ni serían oscuras.

¿Por qué las manchas no pueden atribuirse a nubes acuosas ni a nubes de vapores metálicos?

8. **¿Cuál es el origen de las manchas?** Con esta pregunta entramos en el terreno de las probabilidades; en el párrafo siguiente daremos alguna explicación sobre este punto.

§ 53. CONSTITUCIÓN FÍSICA DEL SOL.

El sol como astro radiante se compone de un núcleo incandescente, rodeado de varias capas concéntricas gaseosas.

1. **El núcleo.** Para explicar el color negro de las manchas, Wilson y Herschel suponían un núcleo frío y oscuro: considerando la alta temperatura de las capas que rodean al núcleo, esta opinión es inadmisibles y se encuentra completamente abandonada. Tampoco puede hallarse en estado gaseoso, a causa de la alta presión que ejercen sobre él los vapores que le rodean, lo cual se confirma por el espectro solar, que es continuo, siendo así que los gases y vapores dan rayas aisladas.

Ni es admisible el estado sólido, porque los cuerpos que existen en el sol, se funden por la alta temperatura del astro. Según la opinión más acertada y generalmente admitida, *el núcleo se halla en el estado de líquido espeso viscoso*, porque la gran presión que sufre por la tensión de los vapores atmosféricos impide la fluidez del líquido; que la temperatura en la superficie del núcleo sea menor que en el interior, se comprende por la pérdida de calor en virtud de la radiación.—Un experimento prueba que el núcleo es incandescente y no gaseoso; pero no decide si es sólido o líquido. Tómese la llama de un mechero de Bunsen o de una lámpara de alcohol puro y póngase detrás de la parte superior (que es la más caliente) un alambre de platino, de manera que se haga in-

candesciente, y se obtendrá un espectro *continuo*; después, quitado el alambre, póngase una perla de cloruro de sodio en la parte inferior de la llama (que es la menos caliente), pero por delante, frente al espectroscopio, y se obtendrá únicamente la raya amarilla *D* del sodio. Mas si volvemos a poner como antes el alambre, dejando la perla, resultará un espectro continuo, atravesado por la raya *D obscura*, porque ahora la luz viva del alambre atraviesa el vapor de sodio. Como el espectro solar presenta el mismo fenómeno, la existencia de un núcleo incandescente está comprobada.

2. **La atmósfera** del sol está formada por las nubes y los vapores que envuelven al núcleo: su naturaleza es bien conocida, gracias a los eclipses del sol. Si pasamos del interior a la superficie podemos distinguir tres capas principales concéntricas: la fotósfera, la cromósfera, la corona.

a) **La fotósfera** rodea directamente al núcleo y es una atmósfera dotada de gran poder luminoso.

b) **La cromósfera** se halla encima de la fotósfera y es una capa poco espesa, formada por vapores metálicos más ligeros que los existentes en la fotósfera, pero de una temperatura muy elevada; en ella predominan el hidrógeno y frecuentes erupciones de magnesio.

c) Finalmente hay una atmósfera que llamamos **corona**, exterior, menos caliente que las otras y muy enrarecida; pero agitada por grandes tempestades, se halla raras veces en equilibrio.

3. **Origen de las manchas.** Las manchas son debidas a unas cavidades en la fotósfera, las que están llenas de vapores metálicos; éstos impiden que la luz nos llegue con todo su brillo desde aquella parte, y por efecto del contraste nos parecen negras en el centro (núcleo) y de color gris en los bordes (penumbra). Las fáculas son debidas a erupciones de hidrógeno incandescente, que tiene brillo, porque sufre una presión alta de parte de los vapores metálicos vecinos; pero existen también sustancias desconocidas en las fáculas, porque su espectro contiene rayas que no corresponden a los elementos químicos que conocemos.

Nota. El P. Scheiner fué el primero en sostener que las manchas eran cavidades, diciendo que alrededor del sol debía existir un océano de fuego, que tenía sus movimientos tumultuosos, su oleaje y sus abismos.

4. **Las granulaciones** en la superficie del sol son efecto de numerosos surtidores incandescentes que en forma de pelos y de haces y de llamas se encuentran en todas las partes del globo solar.

5. **Las protuberancias** (fig. 46 y 47). En el momento de un eclipse total de sol se observa que el astro se halla rodeado

de una especie de aureola cuyo brillo es de gran hermosura; pero al mismo tiempo se notan de trecho en trecho unas llamaradas rojas de variada forma que se designan con el nombre de protuberancias. Éstas se destacan vivamente sobre el contorno de la luna y alcanzan enormes alturas, hasta medio millón de kilómetros; se sabe por medio de su espectro que son una masa gaseosa, formada

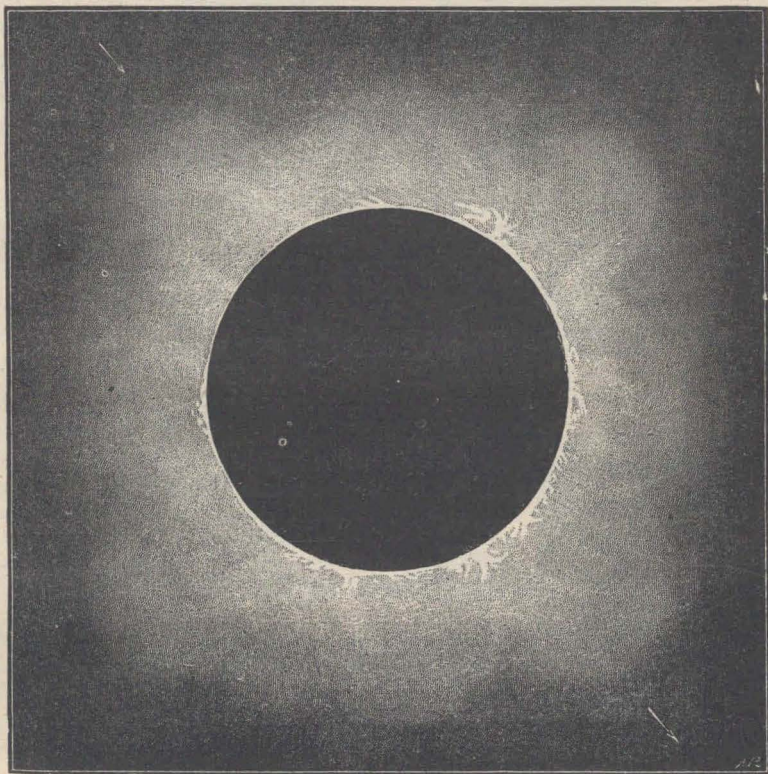


Fig. 46. Eclipse total del sol.

sobre todo de hidrógeno y de otro cuerpo desconocido en la tierra. Estas protuberancias son efecto de erupciones causadas en la cromósfera, mucho más violentas que aquellas en cuya virtud se producen las fáculas.

6. Luz solar. La intensidad de la luz con respecto a la tierra se ha medido por métodos fotométricos, que se explican en Física: supera unas 619 000 veces a la claridad de la luna; 68 000 bujías, colocadas a un metro de distancia, producirían la misma intensidad de iluminación.

7. **Calor del sol.** Aplicando el método radiomicrométrico, Wilson y Gray han avaluado la temperatura de las capas superiores del sol en 6200 grados Celsius; lo cual difiere mucho de los millones de grados que antes se suponían. El calor recibido anualmente tan sólo por la tierra, sería suficiente para fundir una masa de hielo que tuviera la extensión de la superficie terrestre y un espesor de 31 *m*. Una masa de hulla del mismo volumen que el globo solar, estando en combustión viva, podría compensar por 4000 años el calor recibido solamente por la tierra. ¿Por qué, pues, en virtud de la radiación, no disminuye sensiblemente el calor de la fotosfera? He aquí el gran arcano cuya investigación ha preocupado a los astrónomos y físicos más distinguidos y ha conducido a las opiniones e hipótesis más variadas, pero en su mayor parte poco satisfactorias. Sea de ello lo que fuere, se comprende que lógicamente y en conformidad con las leyes y principios de la Física, debemos admitir la disminución, por lenta que sea, primero en la intensidad de la luz, y en segundo lugar del calor solar; si, pues, existiese el sol desde la eternidad, es indudable que ya en tiempos muy remotos se habría quedado siendo un cuerpo frío y oscuro.

Nota. Mencionemos la hipótesis bastante probable de Helmholtz sobre la compensación del calor perdido por la radiación. Atribuye el origen del calor a la *contracción* progresiva que sufre el núcleo solar, ya que todo trabajo mecánico destruido engendra calor. En verdad, las medidas del diámetro aparente del sol no manifiestan tal contracción; pero se ha calculado que una disminución de $\frac{2}{10}$ de un segundo del diámetro aparente en un siglo sería suficiente para compensar el calor gastado, aunque por otra parte habría enfriamiento lento; pero es imposible medir con exactitud el mencionado ángulo.

Considerando el célebre sabio Sir William Thomson (lord Kelvin) tan sólo este hecho indudable del enfriamiento, opina que el sol no podría existir sino desde unos 20 millones de años y que después de unos 5 millones de años sería un cuerpo frío. Sin embargo, mucho antes el sol tendría tan sólo el brillo de la incandescencia roja oscura, formándose escorias en la superficie, fenómeno que ya ofrecen algunas estrellas fijas (*Himmelskunde*, de José Plassmann, 2ª y 3ª ed. pág. 277).

8. **Elementos químicos que existen en el sol.** Por el estudio comparativo de las rayas del espectro solar con las rayas espectrales que producen los elementos químicos terrestres, consta con certeza que existen en la atmósfera del sol, y por consiguiente en el núcleo del mismo, los cuerpos siguientes: cobre, plata, cinc, níquel, cromo, magnesio, sodio, hidrógeno y otros. La existencia del oro y del platino no se ha manifestado en el espectro solar.

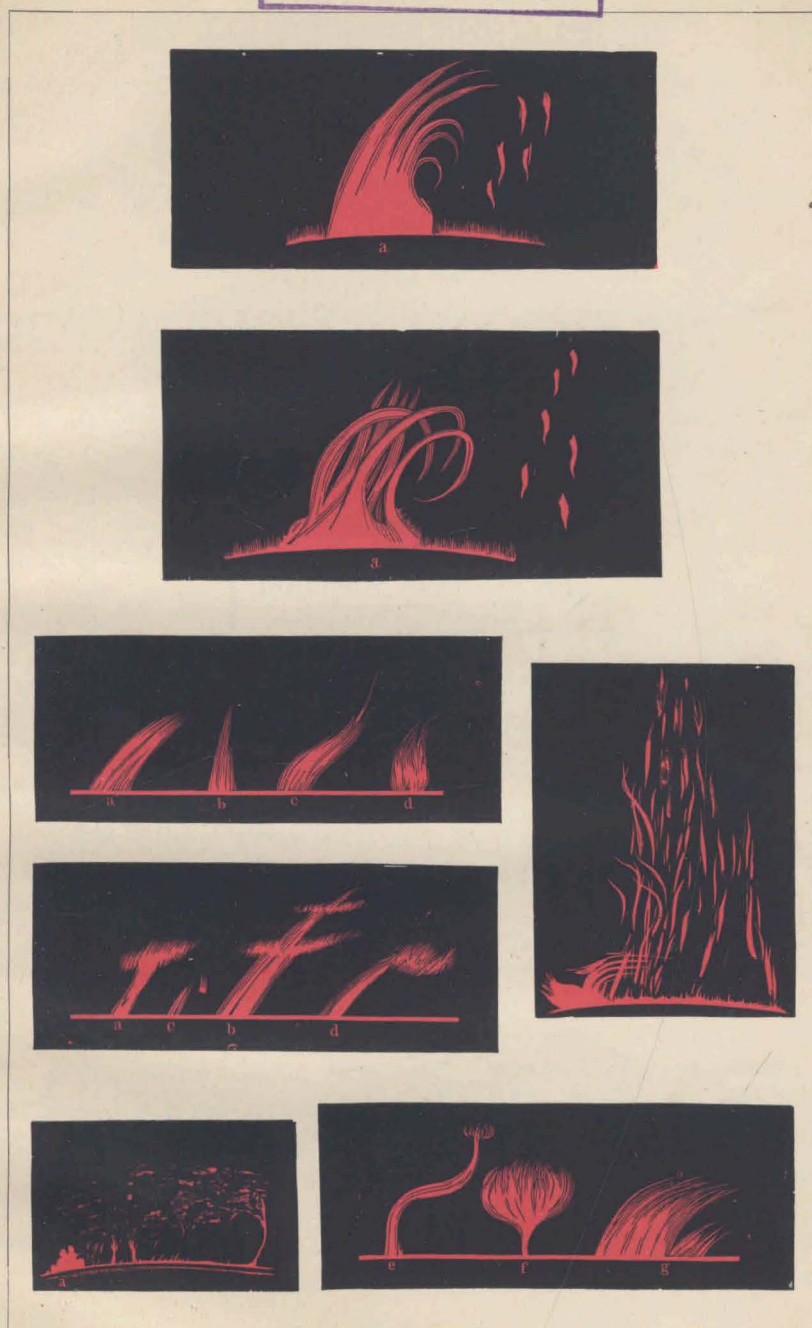


Fig. 47. Algunas protuberancias del sol.

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

LIBRO TERCERO.

GENERALIDADES SOBRE LOS PLANETAS.

Designamos con el nombre de **planetas** cierto número de astros desprovistos de luz propia; la que reciben del sol, en cuyo derredor giran en órbitas elípticas, siempre inclinadas hacia la eclíptica y contenidas en la zona del zodíaco. (La palabra planeta deriva del griego *πλανῶμαι*, yo ando vagando.)

CAPÍTULO PRIMERO.

GENERALIDADES SOBRE SU MOVIMIENTO.

§ 54. SUS CARACTERES. DIVISIÓN.

Los planetas se diferencian de las estrellas fijas en los caracteres siguientes:

1. Las estrellas tienen luz propia, los planetas la reciben del sol.
2. Las estrellas ofrecen el fenómeno del centelleo, pero no los planetas.
3. Las distancias angulares son casi constantes en las estrellas, siendo muy variables en los planetas: basta observar la posición de Venus o Marte con respecto a una estrella vecina, para conocer en pocos días el cambio en la distancia angular.
4. Observados con el telescopio, los planetas ofrecen un diámetro aparente más o menos sensible, siendo así que las estrellas todas aparecen como puntos.

División de los planetas. 1. Si tomamos por término de comparación la distancia de la tierra al sol, se dividen los planetas en dos grupos:

planetas inferiores, Mercurio y Venus, que están entre la tierra y el sol;

planetas superiores, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno, que distan del sol más que la tierra.

2. Entre Marte y Júpiter hay una zona en que se mueven unos 700 planetas muy pequeños que juntos se designan con el nombre de **asteroides** (astros pequeños). Tomando esta zona por término de comparación, se llaman

planetas interiores Mercurio, Venus, Tierra, Marte, porque están entre la zona y el sol; se llaman

planetas exteriores Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno, por hallarse fuera de la zona mencionada, esto es, más lejos que ella, del sol.

Urano fué descubierto en 1781, Neptuno en 1846: los otros eran conocidos en la antigüedad.

3. **Satélites** son astros que giran en torno de los planetas, como la Luna en torno de la Tierra; Marte tiene 2, Júpiter 8, Saturno 10, Urano 4, Neptuno 1.

4. *Signos*. Los astros de nuestro sistema planetario suelen llevar los signos siguientes: Sol ☉; Mercurio ☿; Venus ♀; Tierra ♂; Marte ♂; Júpiter ♃; Saturno ♄; Urano ♅; Neptuno ♆; Luna ☾.

§ 55. DEFINICIONES IMPORTANTES RELATIVAS AL MOVIMIENTO DE LOS PLANETAS.

I. Conjunción y oposición. Decimos que un planeta está en *conjunción con respecto a la tierra*, cuando su diferencia de longitud astral con la del sol es cero: en este caso un observador, mirando al sol, descubre al planeta en la misma dirección.

Se dice que un planeta está en *oposición* con respecto a la tierra, cuando su longitud tiene con la del sol una diferencia de 180°: mirando primero al sol debemos dar media vuelta para mirar hacia el planeta.

Recordando que las órbitas de Mercurio y Venus están entre el sol y la tierra, se comprende que no pueden tener nunca oposición; en cambio tienen dos conjunciones, a saber: una *inferior* al hallarse el planeta entre el sol y la tierra en *línea recta*, y otra *superior* al hallarse el sol entre el planeta y la tierra. Los planetas superiores tienen conjunción y oposición.

Cuadratura es la posición en que la longitud del planeta difiere en 90° con la del sol.

Elongación es la distancia angular del planeta al sol, visto desde la tierra (una visual se dirige al planeta, otra al sol): es *oriental*, estando el planeta a la izquierda del sol; en el caso contrario es *occidental*. La elongación máxima suele llamarse *digresión*:

en este punto empieza a decrecer el ángulo de la elongación. Mercurio tiene 28° de digresión, Venus 48° .

En la fig. 48 representa la circunferencia interior la órbita de Venus, la exterior la de Marte o de otro planeta superior; *T* es la tierra y su órbita. Debe el alumno indicar cuáles sean las conjunciones y oposiciones respectivas.

II. Nodos.

Como los planetas no se mueven en el plano de la eclíptica en que está el centro del sol, síguese que en una revolución cortan dos veces dicho plano prolongado, y los dos puntos en que lo cor-

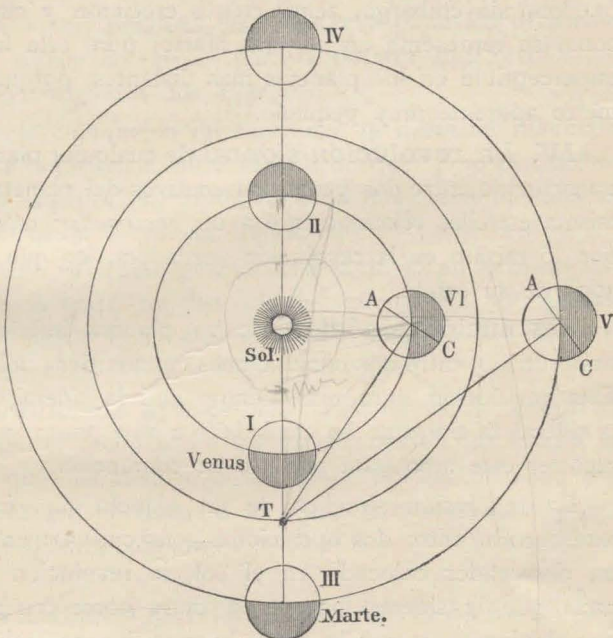


Fig. 48. Conjunción y oposición de los planetas.

tan, se llaman *nodos*: nudo ascendente es el punto en que el planeta pasa del hemisferio austral al boreal; en el descendente pasa del boreal al austral (*ascendere* en latín significa subir).

III. Fases de un planeta son los diferentes aspectos que puede ofrecer, a semejanza de la luna, durante una revolución en torno del sol. Refiriéndonos a la fig. 48, en las posiciones *V* y *VI* la recta *AC* es la traza del círculo que separa el hemisferio visible del invisible para un observador colocado en la tierra.

Venus en la posición *I*, que es la conjunción inferior, vuelve hacia *T* el hemisferio obscuro, y en *II*, que es la conjunción superior, el hemisferio iluminado: tiene, pues, Venus las mismas fases que nuestra luna, de donde sacó Galileo su argumento decisivo, de que Venus tenía movimiento de traslación en torno del sol. Mercurio tiene las mismas fases, pero difíciles de observar, por la vecindad del sol.

Los planetas superiores vuelven tanto en la conjunción como en la oposición hacia la tierra el hemisferio iluminado, como lo evidencian en la fig. 48 las posiciones *III* y *IV* de Marte, recordando que las órbitas de los planetas no coinciden con la eclíptica; pueden, sin embargo, tener cuarto creciente y cuarto menguante, como se representa en *V* para Marte; pero esta fase se hace casi imperceptible en los planetas más distantes, porque ofrecen un diámetro aparente muy pequeño.

IV. La revolución sideral de cualquier planeta es el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del planeta delante de una misma estrella, relativamente a un *observador colocado en el sol*; por lo mismo es la revolución verdadera, en que el astro recorre 360^0 de su órbita.

Revolución sinódica de un planeta inferior es el tiempo transcurrido entre dos conjunciones consecutivas del mismo nombre. Esta revolución dura más tiempo que la sideral, porque durante la sideral la tierra se ha trasladado a otro punto, y el planeta debe recorrer este arco para ponerse en conjunción.

La revolución sinódica de un planeta *superior* es el tiempo transcurrido entre dos oposiciones consecutivas: en este caso, para un observador colocado en el sol, la revolución sinódica es más corta que la sideral, porque la tierra corre con mayor velocidad que el planeta, y por lo tanto la oposición se realiza antes de concluirse la revolución sideral de 360^0 .

El tiempo de la revolución sideral se calcula por medio de la sinódica, cuya duración se determina por observación directa.

Se ha observado que el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del planeta por el nodo ascendente es constante: este mismo tiempo es la duración de una revolución sideral del planeta.

Nota. Coordenadas heliocéntricas. Para el estudio del movimiento planetario suelen usarse las *coordenadas heliocéntricas*, es decir, las que se refieren al centro del sol. La latitud heliocéntrica de un astro es el ángulo que forma el radio vector que va del centro solar al centro del astro, con su proyección sobre el plano de la eclíptica. La longitud heliocéntrica es el ángulo que forma la proyección mencionada con la línea que va del punto Aries al centro del sol.

Se conoce que el planeta pasa por el nodo cuando su latitud geocéntrica (esto es, la astral) es nula: para ello basta una observación del nodo en el momento de la oposición, cuando el sol, la tierra y el planeta están en línea recta; porque entonces el planeta es visto desde el sol en la misma dirección que desde la tierra y por lo tanto su longitud heliocéntrica es igual a la geocéntrica, la que se conoce: de esta manera se obtiene la longitud del nodo.

V. Las distancias de un planeta al sol no sufren otras variaciones que las relacionadas con el afelio, donde es máxima, y con el perihelio, donde es mínima; pero éstas ofrecen diferencias poco notables por ser pequeña la excentricidad de las órbitas planetarias.

En cambio son muy notables las diferencias entre las distancias a la tierra que ofrece un mismo planeta durante una revolución: para evidenciarlo pongamos dos ejemplos.

1. *Venus* en la conjunción inferior tiene la distancia mínima a la tierra, igual a la distancia entre las dos órbitas; pero es máxima en la conjunción superior por ser igual a la mínima aumentada de todo el diámetro de la órbita de Venus.

2. *Júpiter* tiene su distancia mínima a la tierra en la oposición, igual a la distancia entre las dos órbitas; la máxima corresponde a la conjunción, siendo igual a la mínima aumentada del diámetro de la órbita terrestre.

VI. Los diámetros aparentes varían en razón inversa de las distancias. De lo dicho sobre las variaciones en las distancias, no es extraño que los diámetros aparentes de los planetas presenten variaciones tan notables: a la distancia mínima corresponde el máximo del diámetro aparente.

§ 56. MOVIMIENTO CENTRAL DE LOS PLANETAS.

La trayectoria curvilínea de los planetas es la resultante de dos fuerzas componentes: la una es la atracción del sol, en cuya virtud, si actuase sola, el centro del planeta se dirigiría hacia el sol (como sucede en la caída vertical con respecto a la tierra), por lo cual esta fuerza se llama centrípeta; la otra fuerza es la tangencial, porque debemos admitir que el planeta ha recibido, en un primer momento, un empuje instantáneo por el cual y en virtud de la inercia siempre seguiría la dirección de la recta AB (tangente a la trayectoria), si ninguna otra fuerza actuase sobre el planeta.

En la fig. 49 representa O el centro de las atracciones que ejerce el sol sobre el centro A de un planeta. Suponiendo que la atracción, en vez de ser continua,

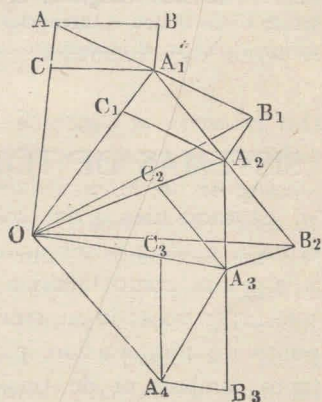


Fig. 49.

Trayectoria de un planeta.

actúe por intervalos de segundos, las rectas AC y AB representan el camino recorrido por el centro A en un segundo, en el caso de obrar la fuerza centrípeta AO y la tangencial AB separadamente; mas como su acción es simultánea, el centro A recorre la diagonal AA' del paralelogramo. En el segundo siguiente el planeta recorrería A_1B_1 si no actuase la atracción; pero sufriendo nueva atracción A_1C_1 , debe recorrer la diagonal A_1A_2 del segundo paralelogramo. Por las mismas causas recorre en el tercer segundo la diagonal A_2A_3 , y en el cuarto la diagonal A_3A_4 , etc. De esta manera el centro del planeta seguiría en torno del sol la dirección de la línea quebrada que forman las diagonales; pero, como la fuerza centrípeta no actúa por intervalos sino constantemente, las diagonales son infinitamente pequeñas y la trayectoria es curvilínea, la cual será circular al actuar la atracción siempre con la misma intensidad; variando, empero, la distancia en el perihelio y el afelio, debe también variar esta intensidad, según la ley de Newton: síguese que la trayectoria se acercará tanto más a la forma circular, cuanto menor sea la diferencia entre las varias distancias del planeta al sol.

Nota. *Perturbaciones del movimiento de los planetas.* Si los planetas estuviesen sometidos solamente a la acción del sol, describirían exactamente elipses alrededor de su centro común en planos fijos; pero es de notar que también los planetas se atraen mutuamente, lo cual complica su movimiento. Sin embargo, la elipse que describe el planeta en torno del sol, es poco modificada por la atracción de los demás planetas en consideración de ser la masa del sol muy grande con relación a la de los planetas. En el movimiento de la luna las perturbaciones del movimiento elíptico son más notables; éstas son ocasionadas por el sol a pesar de su distancia. La atracción del sol hace retrogradar la línea de los nodos trasladando el plano de la órbita lunar; dicha atracción hace mover el eje mayor en el sentido directo, y produce desigualdades en el movimiento lunar.

CAPÍTULO SEGUNDO.

SISTEMAS DE TOLOMEO Y DE COPÉRNICO.

El movimiento del sol en la forma aparente con que se presenta a nuestra observación es un movimiento *relativo* con respecto a la tierra, como también lo es el movimiento diurno de la esfera celeste; pero todo movimiento relativo que no presenta un tercer punto de comparación, puede explicarse de dos maneras, y por lo tanto también el de traslación alrededor de la tierra que ofrecen el sol y los planetas, a saber: o la tierra está inmóvil, girando el sol y los planetas a semejanza de la luna en torno de ella; o el

sol está fijo en el espacio, y la tierra, lo mismo que los planetas, describe órbitas en torno del sol. La primera de estas dos hipótesis fué la vigente desde los tiempos más remotos; **Tolomeo de Alejandría** no hizo más que consignarla en el año 150 de nuestra era, por lo cual lleva el nombre de sistema de Tolomeo o geocéntrico: según él la tierra se halla en completa inmovilidad, y forma el centro del universo. Es de notar que el filósofo Platón emitió la opinión, que fué enunciada con claridad por Aristarco de Samos (año 265 a. d. J. C.), que la tierra no era el centro del universo sino más bien el sol, por lo cual esta hipótesis lleva el nombre de heliocéntrica. El primero que defendió científicamente este sistema y motivó la caída del antiguo fué **Nicolás Copérnico**, canónigo de la catedral de Frauenburgo en Alemania: por más de 23 años trabajó en la soledad para plantear su sistema y escribir su obra «De revolutionibus orbium cœlestium»: la dedicó al Papa Paulo III como al protector de todas las ciencias, según decía el sabio y piadoso sacerdote. Copérnico murió en 1543, a la edad de 70 años, habiendo recibido pocas horas antes de su muerte el primer ejemplar impreso de su obra. Copérnico tiene la gloria de haber sido el primero en formular el verdadero sistema del movimiento planetario. Es verdad que por entonces adolecía éste de defectos y no resolvía ciertas dificultades, por lo cual era considerado como una hipótesis. Varios sabios, y aun astrónomos, combatieron el nuevo sistema, entre ellos el célebre *Tycho Brahe*, en 1587; en cuanto al movimiento de traslación de la tierra, decía que en esta suposición debía observarse algún cambio aparente en la posición relativa de las estrellas, lo que no se verificaba. Por entonces los partidarios del sistema de Copérnico no pudieron resolver la dificultad ni otras análogas, que solamente más tarde se deshicieron.

Galileo, de Pisa, que nació en 1564, es conocido como el más ardiente defensor del nuevo sistema; tuvo la ventaja en sus estudios astronómicos de verse favorecido por la reciente invención del anteojo astronómico, que en general se le atribuye: descubrió las fases de Venus, que prueban que este planeta se mueve alrededor del sol; descubrió además cuatro satélites de Júpiter y su movimiento en torno de éste: pero debe observarse que, si bien los hechos mencionados prueban que no todos los astros describen órbitas en torno de la tierra, no dan, sin embargo, un argumento *decisivo* en favor del nuevo sistema. Efectivamente, estos hechos podían explicarse por la hipótesis de Tycho Brahe, según la cual los planetas describen

órbitas en torno del sol, y éste con todo su séquito una órbita alrededor de la tierra como centro. Otras pruebas que daba Galileo en sus célebres Diálogos, eran mal interpretados textos de las Sagradas Escrituras, llevándose así la cuestión al terreno de la teología, por culpa de Galileo, que tenía marcada afición a discusiones y sutilezas teológicas. Con razón dice un historiador que Galileo fué condenado por el tribunal eclesiástico *no por buen astrónomo sino por mal teólogo*, y en confirmación de ello basta recordar que ningún tribunal había incomodado a Copérnico ni censurado su obra y que al contrario los cardenales le colmaron de elogios. En el mismo año que vió la censura de Galileo, la corte del pontífice no perdonó medio alguno para que fuese a la universidad de Bolonia el célebre Képler, el cual ya había publicado sus trabajos, que dieron nuevo apoyo al sistema de Copérnico.

Nota. Cien años antes de Galileo, el astrónomo alemán Widmanstado dió delante del Papa Clemente VII y de los cardenales una conferencia «De motu terræ» proponiendo la hipótesis heliocéntrica. El Papa, lejos de contrariarlo, le nombró miembro honorario de su familia y le regaló un códice griego de Alejandro de Afrodisia. (Del discurso pronunciado por el cardenal Maffi en la audiencia que dió Pío X a todo el personal de la Spécula Vaticana.)

Képler nació en 1571 en una pequeña ciudad de Alemania del Sur; después de estudios y cálculos largos y difíciles pudo el modesto astrónomo, que vivía en gran pobreza, demostrar que la órbita del planeta Marte no era circular sino que formaba una elipse, y más tarde pudo evidenciar que los demás planetas describen la misma curva en su traslación. Como el sol se encuentra siempre en el mismo foco de la elipse, el planeta al recorrer su órbita debe pasar una vez a la mayor distancia del sol, que es el afelio, y una vez a la menor, que es el perihelio; comprobó, pues, Képler que la mayor velocidad angular del planeta corresponde al perihelio o sea a la menor distancia; enunció además en una sola ley las *relaciones* existentes entre las distancias del planeta y el tiempo de su revolución. Ahora bien: el hecho de recorrer los planetas su órbita con tanta mayor velocidad cuanto menor sea la distancia al cuerpo central, manifiesta que la fuerza misteriosa que es la causa del movimiento ha de buscarse en el sol.

Al gran genio de **Newton** (nació en 1642) se debe el descubrimiento de la causa que origina el movimiento planetario, a saber: la gravitación o atracción universal, cuya intensidad se ejerce conforme a la ley que inmortalizó el nombre de este astrónomo.

CAPÍTULO TERCERO.

MOVIMIENTO APARENTE DE LOS PLANETAS.

§ 57. MOVIMIENTO DIRECTO Y RETRÓGRADO.

Movimiento directo llámase todo movimiento propio de un astro que se efectúa del Occidente al Oriente: así decimos que la rotación de la tierra y de los otros planetas, lo mismo que su traslación en torno del sol, es un movimiento directo.

El **movimiento retrógrado** no significa avanzar y retroceder (a manera de los cangrejos); se usa este término para indicar un movimiento opuesto al directo, del Oriente al Occidente. El movimiento general diurno es aparente y tiene la dirección opuesta al que tiene la rotación de la tierra, por lo cual decimos que es retrógrado.

Los satélites de Urano y Neptuno, al girar en torno de su planeta, siguen siempre la misma dirección; pero como ésta en realidad va del Oriente hacia el Occidente, decimos que su movimiento es retrógrado.

Los planetas al girar en torno del sol guardan siempre en realidad la misma dirección del Occidente al Oriente; por una ilusión óptica, que se explicará luego, parecen en ciertas posiciones retroceder tomando la dirección opuesta, por lo cual decimos que tienen movimiento directo y retrógrado.

Nota. Para dar un ejemplo observemos el movimiento de Venus, tomando por punto de partida un día en que aparece a las seis de la tarde cerca del Poniente después de ponerse el sol.

1. En los días siguientes, a la misma hora, Venus se aleja del Poniente y aparece a mayor altura hasta que su elongación máxima alcance 48° (§ 55), donde queda estacionaria: tenía, pues, movimiento directo.

2. Pocos días después el planeta (por ilusión óptica) retrocede hacia el Poniente (movimiento retrógrado), hasta perderse de vista por estar en conjunción con el sol.

3. Después de algunas semanas aparece Venus, antes de salir el sol, encima del horizonte oriental, prosiguiendo en movimiento retrógrado hasta que su elongación sea de 48° , donde queda estacionaria; en seguida, tomando movimiento directo, se acerca cada día más al Oriente hasta desaparecer en la conjunción.

Los planetas superiores tienen también movimiento retrógrado, pero algo más complicado que Venus y Mercurio.

§ 58. EXPLICACIÓN DEL MOVIMIENTO RETRÓGRADO DE LOS PLANETAS.

Si nos fuese dado contemplar el movimiento de los planetas desde el centro solar, los veríamos trasladarse en sus órbitas del

Occidente hacia el Oriente, sin la apariencia del movimiento retrógrado de la misma manera que se realiza y observa el movimiento de la luna en torno de la tierra. La causa, pues, de las irregularidades aparentes que ofrecen los movimientos de un planeta, consiste en que la tierra, desde la cual los observamos, no está en el centro común de las órbitas planetarias.

El fundamento de la explicación que vamos a proponer, es el hecho demostrado con certeza, de que un planeta se muéve con tanta menor velocidad, cuanto mayor sea su distancia al sol, centro común de la atracción para todos ellos. (Este hecho es consecuencia

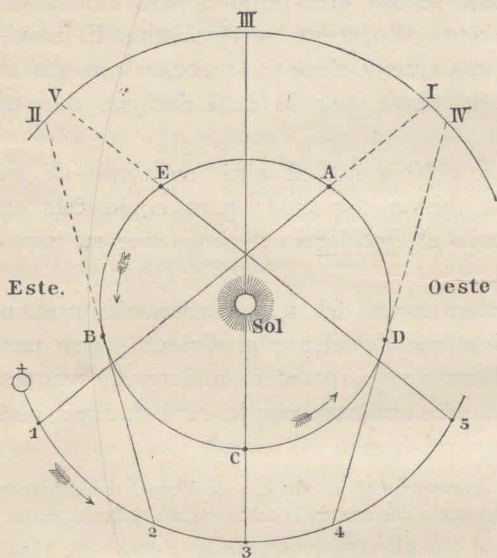


Fig. 50. Movimiento retrógrado de Venus.

de la ley de Newton y de la tercera ley de Képler, que se darán en otro capítulo.) Síguese, por lo tanto, que *en el mismo tiempo, la tierra recorre un arco menor de su órbita que los planetas inferiores*; pero que el arco recorrido por la tierra es mayor que el recorrido por uno de los planetas superiores en la misma unidad de tiempo.

Propongamos dos ejemplos, el de un planeta inferior y otro de un planeta superior, para

evidenciar la tesis siguiente: *Los movimientos aparentes de que estamos tratando, se deben a la diferencia de velocidades del movimiento de la tierra y del planeta respectivo*; a esto debe agregarse la circunstancia de que no percibimos el movimiento de la tierra.

1. Movimiento de Venus. Suponemos el movimiento uniforme para mayor facilidad. En la fig. 50 representa el arco inferior, parte de la órbita terrestre; la circunferencia es la órbita de Venus, el arco superior es un arco de la bóveda celeste, sobre la cual proyectamos los astros.

Los números 1, 2, 3, 4, 5 indican la posición de la tierra; las rectas son visuales dirigidas a Venus en sus posiciones A, B, etc. Desde 1 se proyecta A en I; desde 2 se proyecta B en II; desde

3 vemos *C* en III, etc. Resulta que desde la proyección I hasta II el movimiento es y se presenta como directo; pero desde II pasando por III hasta IV el sentido es retrógrado, aunque el planeta en realidad prosiga en sentido directo; desde IV vuelve el movimiento directo hasta V.

En *B* y *D* el planeta parece estacionario, porque se mueve por unos días en sentido de la visual tangente, acercándose en *B* y alejándose en *D* en línea recta.

*2. Movimiento aparente de Júpiter.

En la fig. 51 representa *S* el sol, la circunferencia es la órbita terrestre, el arco *PP'* pertenece a la órbita de Júpiter, *FF'* a la esfera celeste. La velocidad angular de la tierra es mayor que la de Júpiter y por lo tanto los arcos de la órbita de Júpiter son más pequeños que los arcos *respectivos* de la órbita terrestre. Estando la tierra en 1 (a la derecha) y el planeta en I, lo veremos en *a*; la tierra adelanta hasta 2 y el planeta hasta II, y lo veremos en *b*; desde 3 lo veremos en *c*, desde 4 en *d*, etc. En la realidad de su movimiento propio se ha movido desde I a II, a III, a IV, etc., y lo mismo notaría un observador colocado en el sol; pero al observador colocado en la tierra, el movimiento parece retrógrado desde *b* hasta *c*, y en este trayecto la velocidad parece menor que aquella que observamos desde *a* hasta *b* y desde *d* hasta *e*. Los puntos *b* y *c* se llaman *estaciones* del planeta, que parece estacionario cuando cambia el sentido de su movimiento aparente; porque en estos puntos se mueve sobre la misma visual tangente durante algunos días, y las perspectivas se dirigen a un mismo punto de la esfera celeste.

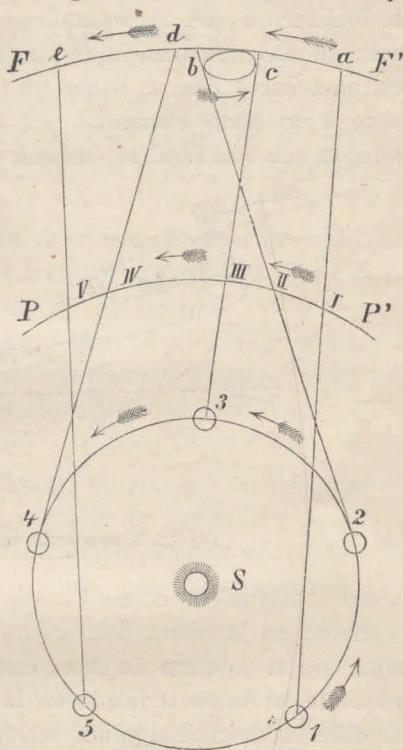


Fig. 51. Movimiento de Júpiter.

Las precedentes explicaciones se facilitan con la comparación siguiente. Imaginemos un poste colocado en el centro de dos grandes círculos concéntricos; el exterior represente la órbita de Marte y

el interior la de la tierra: si dos individuos recorren estas órbitas de manera que la velocidad en la exterior sea menor que en la interior, tendremos una imitación del movimiento aparente de los planetas superiores.

3. **Órbitas aparentes.** El sol, en su movimiento aparente anual, arrastra consigo la órbita del planeta al mismo tiempo que éste la recorre. Suponiendo la tierra inmóvil y prescindiendo de la inclinación que tiene la órbita del planeta con la eclíptica, resulta de la circunstancia indicada que la órbita parece sinuosa, esto es, una curva que se llama *epicicloide*, cuya explicación no pertenece a un texto elemental. *El plano de la órbita que describe un planeta, en realidad no coincide con el plano de la eclíptica*; los

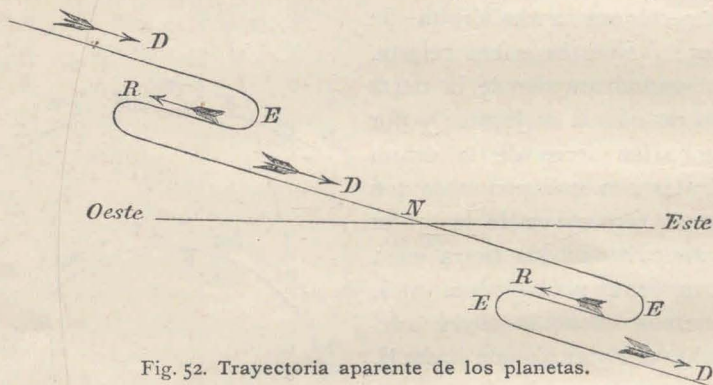


Fig. 52. Trayectoria aparente de los planetas.

arcos retrógrados; como *b c*, de la perspectiva que tiene la órbita aparente en la esfera celeste, no coinciden con los arcos directos, sino que se apartan de ellos, de manera que la trayectoria aparente presenta la forma indicada en la fig. 52, la cual está conforme con la observación; *R* significa retrógrado, *D* directo, *E* estacionario, *N* es el nodo.

Los arcos descritos en sentido retrógrado son siempre menores que los descritos en sentido directo; porque el movimiento de la tierra se efectúa en sentido directo y por lo mismo el arco retrógrado se hace menor, y el directo mayor.

CAPÍTULO CUARTO.

LEYES GENERALES.

§ 59. LAS TRES LEYES DE KÉPLER.

Los antiguos supusieron a priori que los movimientos de todos los cuerpos celestes se realizaban en órbitas circulares; Copérnico

haciendo la primera reforma fundamental con su sistema heliocéntrico conservaba, sin embargo, las órbitas circulares. Képler, en 1610, puso los verdaderos fundamentos de la geometría celeste estableciendo la relación que existía entre los movimientos de los planetas hasta entonces conocidos, la cual se halló comprobada también en aquellos que después se descubrieron.

1ª ley. Cada planeta describe una elipse en la cual el sol ocupa uno de los focos, que es común a todos los planetas; la excentricidad es, no obstante, pequeña, de suerte que la suposición de órbitas circulares ofrece una aproximación suficiente.

2ª ley. Las áreas descritas por el radio vector de un planeta son proporcionales a los tiempos (esto es, en tiempos iguales recorre el radio vector áreas iguales).

Esto significa que en la unidad de tiempo el área descrita por el radio vector es constante, y esta constancia es tanto más rigurosa cuanto más pequeña sea la unidad de tiempo.

Esta ley tiene una aplicación particular para explicar la irregularidad que se observa en el movimiento aparente del sol en longitud, según veremos en el § 104. (La demostración de esta ley se halla en el apéndice.)

3ª ley. *Los cuadrados de los tiempos en que dos planetas cualesquiera efectúan sus revoluciones siderales en torno del sol, son proporcionales a los cubos de sus distancias medias al sol* (o sea, de los semiejes mayores de sus órbitas, que representamos con a , a' , etc.

$$\frac{t^2}{t'^2} = \frac{a^3}{a'^3}$$

Ejemplo. Expresando en días las revoluciones siderales de Júpiter y de Mercurio, elevándolas al cuadrado y dividiendo el primer número por el segundo, se obtiene por cociente 2425,7; este mismo número resulta dividiendo los cubos de sus distancias medias.

Aplicación. Si tomamos por unidad de las distancias el semieje de la órbita terrestre, y por unidad del tiempo el día solar medio, y alternamos la proposición, tenemos que

$$t^2 : a^3 = (365,25)^2 : 1^3$$

Si conocemos el tiempo, podemos calcular a , y recíprocamente; pero en general se conoce más fácilmente el tiempo, porque basta para ello observar dos pasos consecutivos del planeta por el mismo nodo, los que se efectúan de una manera real y no aparente. Se obtiene la distancia media en función del tiempo y del semieje

terrestre, que es la unidad de medida, despejando a en la proporción precedente:

$$a = \sqrt[3]{\left(\frac{t}{365,25}\right)^2}.$$

Recíprocamente, conociendo por medio de la paralaje la distancia media de un planeta al sol, podemos por medio de esta ley calcular su revolución sideral y conocerla mucho antes de completarse

§ 60. LEY EMPÍRICA DE BODE.

Acabamos de ver cómo la tercera ley de Képler sirve para calcular las distancias medias de los planetas al sol, tomando por unidad de medida la longitud del semieje mayor de la órbita terrestre; veamos ahora el método empírico, que ofrece mayor facilidad para el mismo objeto.

Primero se forma una progresión geométrica cuya razón sea 2 y principiando con 3:

3 6 12 24 48 96 192 384.

En esta serie pongo 0 al principio y agregó 4 a cada número:

4 7 10 16 28 52 100 196 388.

Si representamos por 10 la distancia de la tierra al sol, resulta que los demás números representan las distancias de los planetas respectivos; por ejemplo, para Saturno tenemos: $10 : 100 = 37\,000\,000 : x$; luego la distancia de Saturno, o sea x , es 10 veces mayor que la distancia de la tierra. Dividiendo, pues, por 10 cada número de la segunda serie obtenemos la serie que representa directamente la distancia de cada planeta al sol en función de la distancia terrestre, empezando por Mercurio. Bode publicó esta ley en 1778; entonces no se podía aplicar el número 28 que ahora corresponde a la región que ocupan los *asteroides*. Lo mismo sucedió con 196 que corresponde a Urano; para Neptuno la ley no es exacta, porque se le debe atribuir el número 300. Aunque esta ley no tenga precisión científica, es muy útil para recordar las distancias en números redondos. He aquí la serie definitiva:

0,4 0,7 1 1,6 2,8 5,2 10 19,6 60

que corresponden respectivamente a Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Asteroides, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Aplicaciones. 1. La distancia de un planeta al sol se halla multiplicando su número respectivo por la que tiene la tierra; más brevemente se puede decir, por ejemplo, que Júpiter tiene una distancia 5,2 veces mayor que la tierra, etc.

2. **Los diámetros aparentes** están en razón inversa de las distancias; podemos pues, calcular la magnitud del diámetro aparente que presenta el sol visto desde los planetas, y comparado con el que se observa desde la tierra. *Ejemplos:* Desde Mercurio $n':n = 10:4$; luego $n' = 10:4 = 2,5$. Esto significa que el diámetro aparente del sol, visto desde Mercurio, es 2,5 veces mayor que el mismo visto desde la tierra. Los discos guardan la razón del cuadrado de sus radios; luego el disco solar se ve desde Mercurio unas 6 veces mayor, pero desde Saturno unas 100 veces menor que desde la tierra.

3. **La intensidad de la luz** y del calor está en razón inversa del cuadrado de las distancias. Tenemos para Mercurio, que $i:i' = 10^2:4^2$; luego la intensidad es 6 veces mayor que en la superficie terrestre; en Saturno es 100 veces menor, porque $i:i' = 10^2:100^2$.

4. Con auxilio de la tercera ley de Képler se puede calcular el **tiempo de una revolución**. Para Saturno $x^2:1 = 100^3:10^3$; $x = \sqrt{1000} = \sqrt{100 \cdot 10} = 10 \sqrt{10} =$ unos 30 años terrestres, ya que este año se ha tomado por unidad. Para Júpiter tenemos que $x^2:1 = 52^3:10^3$, o $x^2 = 5,2^3$; $x = 5,2 \sqrt{5,2} = 10$ años en número redondo.

§ 61. LEY DE NEWTON.

Los antiguos consideraban los movimientos de los cuerpos celestes como una cuestión de geometría. Képler fué el primero en descubrir que se trataba en realidad más bien de una cuestión de mecánica, formulando el principio sobre la inercia: Si ninguna fuerza exterior actúa sobre un cuerpo, éste tomará un movimiento rectilíneo y uniforme en virtud de un impulso recibido.

Los planetas no se mueven en línea recta: luego debe cada uno hallarse solicitado por una fuerza exterior. Képler indicó que esta fuerza llevaba la dirección hacia el sol; pero Newton lo puso en evidencia por su ley sobre la gravitación universal, que inmortalizó su nombre y que está fundada en el principio, enunciado por él mismo, de que a toda acción corresponde una reacción igual y contraria; en otras palabras: si la tierra atrae la luna, ésta a su vez atrae la tierra. Interpretando Newton las leyes de Képler bajo el punto de vista de la mecánica dedujo las siguientes consecuencias:

1. Resulta de la ley sobre las áreas que hacia el sol se dirige la fuerza que solicita al planeta; todo se verifica como si el sol fuese el centro de la atracción.

2. El movimiento elíptico manifiesta que la atracción ejercida por el sol sobre cada planeta varía en cada punto de la órbita en razón inversa del cuadrado de las distancias que tiene el planeta al sol. $f:f' = R_1^2 : R^2$, si las masas son iguales.

3. Resulta de la tercera ley de Képler que las atracciones ejercidas por el sol sobre los planetas serían directamente proporcionales a las masas, si éstos se hallasen a la misma distancia del sol, o sea $f:f' = m:m'$.

En el caso de que las masas y las distancias fuesen desiguales, tendríamos (llamando f'' a la atracción que ejercería el sol sobre un planeta que tuviera la masa del primero y la distancia del segundo):

$$f:f'' = R_1^2 : R^2; \text{ y } f'':f' = m:m'.$$

Multiplicando ordenadamente estas dos igualdades, resulta:

$$f:f' = m R_1^2 : m' R^2.$$

Los satélites de los planetas obedecen a las tres leyes de Képler en sus movimientos planetocéntricos; de donde se sigue que los planetas los atraen, así como el sol atrae a los planetas.

Consecuencias. La fuerza que retiene a la luna en su órbita geocéntrica se deduce fácilmente de la curvatura de esta órbita; Newton encontró por cálculo que esta fuerza es igual a la pesantez terrestre disminuída en la relación que guarda el cuadrado del radio terrestre con el cuadrado del radio vector de la luna: de donde sacamos como consecuencia que la pesantez terrestre es una fuerza de igual naturaleza que la atracción planetaria. (Véase *Briot* n. 263, donde se da la comprobación de lo dicho aplicando el cálculo.)

La masa que pesa 1 *kg* en la superficie terrestre, pesaría unos 27 *kg* en la superficie del sol, porque $330000:108^2 = m:R^2$. En Júpiter pesaría tres veces más, en Marte seis veces menos, en Venus lo mismo que en la tierra. Es digno de observar la siguiente consecuencia: pesando los cuerpos tres veces más en la superficie de Júpiter, es preciso desplegar un esfuerzo tres veces mayor para levantarlos; los hombres y los animales deberían estar dotados, en igualdad de masa, de una fuerza muscular tres veces mayor para moverse con igual facilidad. (*Briot*.)

Habitantes. La cuestión sobre la existencia real de habitantes en los planetas parece del todo ociosa, por ser imposible comprobar el hecho. De la posibilidad, empero, por bien fundada que sea, como Marte la presenta, no se puede deducir la realidad. Opina un astrónomo que por medio del telégrafo Marconi podremos un día ponernos en comunicación con los Martesños: la cosa será muy fácil «en el caso de existir los tales habitantes, de tener el telégrafo mencionado, de entender uno de nuestros idiomas» y de conservar las ondas eléctricas suficiente energía hasta llegar a Marte.

LIBRO CUARTO.

ELEMENTOS GEOMÉTRICOS Y MOVIMIENTOS DE LA TIERRA.

De todos los astros que pueblan el universo, la tierra es el único del cual no nos separa ninguna distancia y que por lo mismo puede ser el objeto de una investigación completa y exacta: la ciencia que tiene este objeto, se designa con el nombre de **Geografía**, esto es, descripción (γραφή) de la tierra (γῆ). Por ser muy vasto el material que se ofrece, su estudio se ha dividido en varias ciencias, las cuales, según su objeto formal, llevan diferentes denominaciones que vamos a indicar con brevedad.

La Geología (λόγος, discurso) estudia la naturaleza de las masas de que se compone el globo terráqueo; pero se propone además investigar los estados por que ha pasado la tierra en la antigüedad remota, las revoluciones materiales que ha sufrido, y las modificaciones en la fauna y las plantas que antes poblaron su inmensa superficie.

La Geognosia (γνώσις, conocimiento) estudia tan sólo el estado actual de los terrenos y minerales que forman la tierra, haciendo caso omiso de los siglos pasados.

La Geodesia (δαίω, divido) tiene por objeto la repartición y medida de una grande extensión, por ejemplo, para determinar los límites entre los países o provincias, medición de un cuadrante de meridiano, etc.

La Geografía física propiamente dicha, a la cual pertenecen la Meteorología y la Climatología, estudia los fenómenos producidos por los agentes físicos (calor, luz, electricidad) particularmente en la atmósfera; por ejemplo, los vientos regulares e irregulares, los ciclones, las corrientes marítimas, las causas que modifican el clima de los países, etc.

La Cosmografía, empero, considera la tierra como un astro entre los astros, mejor dicho, como un planeta entre los planetas, Brugier, Cosmografía.

y estudia este globo, en primer lugar, en su conjunto para determinar su forma geométrica, sus dimensiones, la existencia de su rotación, etc. (geografía matemática): esta materia se tratará en este libro IV. Además, se ocupa la Cosmografía en la explicación de aquellos fenómenos terrestres que se relacionan con los astros, principalmente con el sol y la luna (geografía astronómica): tales son la desigualdad de los días y noches, el crepúsculo, las estaciones, la traslación de la tierra, las fases de la luna, los eclipses, las mareas, etc., lo que se explicará al tratarse del astro respectivo.

CAPÍTULO PRIMERO.

FORMA DE LA TIERRA EN GENERAL.

§ 62. LA TIERRA TIENE UNA FORMA CONVEXA ESFEROIDAL.

En los tiempos antiguos había varias opiniones acerca de la forma de la tierra: unos la consideraban como un disco rodeado del océano (Homero), otros como un timbal invertido (Leucipo). Sin embargo varios filósofos reconocieron y comprobaron su forma esférica, a saber Pitágoras, Aristóteles y Arquímedes. En el siglo VIII de la era cristiana, Beda y otros sabios hicieron admitir definitivamente la doctrina de la forma esférica. Desde entonces se representaba en el mundo cristiano la tierra en forma de un globo con una cruz. Daremos algunas pruebas para evidenciar que la tierra tiene una forma convexa esferoidal, reservando para otro capítulo la investigación sobre su verdadera forma.

1. Acercándose un navío desde alta mar a la costa (fig. 53) un observador distingue primero las puntas de los mástiles, en

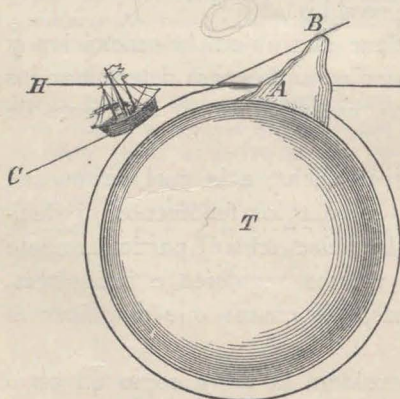


Fig. 53. Forma de la tierra.

seguida las velas y finalmente el casco, mientras las personas que se hallan sobre la cubierta del buque observan primero las puntas más altas de las montañas o de las torres y poco a poco sus partes inferiores y la playa. Alejándose un navío del puerto sucede el fenómeno en sentido contrario: un observador colocado en la playa ve desaparecer primero el casco de-

bajo del horizonte, y después las partes altas del navío; pero su visual vuelve a encontrarlo si en aquel momento sube a un faro o a un cerro vecino.

Estos fenómenos no pueden atribuirse a la debilidad de la vista, porque observados con un anteojo se presentan idénticos; tan sólo se explican por la convexidad de la superficie terrestre.

2. Si la tierra tuviese la forma de un disco, el sol sería visible al mismo tiempo desde todos los puntos terrestres, lo que es contrario a la experiencia, porque sabemos que la salida del sol y de los astros se adelanta tanto más con respecto a una región cuanto más al Este se halla situada, lo que prueba que la tierra es convexa en la dirección del Este al Poniente. Viajando del Norte al Sur observamos nuevas estrellas del hemisferio austral, desapareciendo otras del boreal; por lo tanto la tierra tiene forma convexa en la dirección del Norte al Sur, porque si fuese plana se observarían desde la zona boreal las mismas estrellas que son visibles en la zona polar del Sur.

3. Si un observador se eleva en un globo o sube a una montaña, se ensancha el círculo de su horizonte en una proporción que corresponde a los cálculos matemáticos respectivos, lo cual sucede siempre y en todos los puntos de la tierra; pero sólo un cuerpo esférico o a lo menos uno que lo sea con aproximación, puede presentar esta forma circular de cualquier lado y en cualquiera dirección que lo miremos.

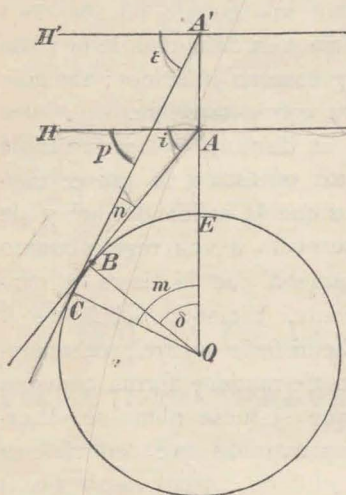
4. En los eclipses de luna los límites de la sombra que proyecta la tierra sobre el disco lunar, son *siempre circulares*. Este fenómeno movió a Aristóteles (siglo IV a. d. J. C.) a admitir la forma esférica de la tierra. Sólo un cuerpo sensiblemente esférico proyecta *en cualquiera circunstancia* una sombra de forma circular, lo que otros cuerpos de superficie curva sólo pueden producir en determinadas condiciones.

Nota. Los viajes efectuados alrededor de la tierra no prueban de una manera decisiva la forma esferoidal, sino que la superficie es coherente en todas sus partes y desprovista de esquinas y cantos.

§ 63. DEPRESIÓN DEL HORIZONTE.

Sábase por experiencia que el horizonte se ensancha a medida que un observador se eleva a mayor altura. Representemos en la fig. 54 por un círculo máximo la intersección de un plano vertical con el globo terrestre. Supongamos colocado un observador en A y otro en A' ; OA es la vertical, H y H' son los horizontes racio-

nales o más bien sus trazas; los rayos visuales AB y $A'C$, tangentes a la superficie, tocan a ésta en puntos del horizonte visible. El ángulo



HAB que la visual forma con la traza del horizonte racional, se llama **depresión del horizonte aparente**, porque es la cantidad angular en que el rayo visual AB , que determina un punto del horizonte visible, se halla depri-mido con respecto al horizonte racional HA . Vamos a demostrar *que la depresión del horizonte aumenta con la altura* a que se eleva un observador.

Denoto en la fig. 54 el ángulo HAB por i ; $H'A'C$ por ϵ ; trazo OB y OC que son perpendiculares a las tangentes respectivas.

Demostración. El ángulo $\epsilon = p$

Fig. 54. Depresión del horizonte. $= i + n$; luego $\epsilon > i$.

*§ 64. MEDIDA DEL RADIO TERRESTRE.

Reservando para otro capítulo la explicación de la marcha que debe seguirse para la medida exacta del radio terrestre, daremos aquí un método elemental que sirve para determinar de un modo aproximado esta longitud.

Represente la fig. 55 un meridiano de la tierra que suponemos sensiblemente circular considerando la tierra como esférica. Sean HE y AB dos piquetes verticales, y la altura de cada uno sea igual a 1,5 m: al encontrarse éstos a una distancia de 2 leguas (una legua de 4444 m), se comprueba por la experiencia que para un observador colocado en A la visual AH se hace tangente en el punto C de la superficie terrestre. Prolongo la vertical AB

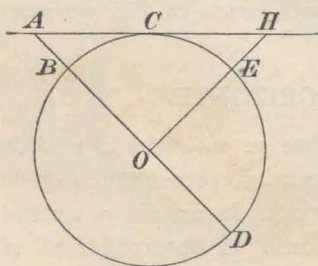


Fig. 55. Radio terrestre.

hasta D , y tenemos que BD será un diámetro y los puntos C, B, D están en el plano del círculo máximo. Conforme a un teorema de geometría, la tangente AC es media proporcional entre la secante AD y la parte externa AB . El diámetro BD vale 2 radios. $AC = 4444$ metros o una legua; $AB = 1,5$ m; $AD = AB + BD = 1,5 \text{ m} + 2 R$.

Tenemos que $\frac{AD}{AC} = \frac{AC}{AB}$; la razón $\frac{AC}{AB} = \frac{4444}{1,5} = 2963$,
 luego $\frac{AB + BD}{AC} = 2963$; de donde $AB + 2R = 2963 \times AC$.
 El valor de $AB = 1,5 m$ puede despreciarse; AC es una legua,
 luego $R = \frac{2963}{2} \times AC = 1482$ leguas (próximamente 1500 leguas).

Para expresar la longitud en metros basta multiplicar el resultado por 4444: se obtienen 6580000 m en número redondo.

Nota. Este número, lo mismo que el obtenido por la depresión del horizonte, es demasiado grande. Veremos que el verdadero valor del radio ecuatorial es de 6377 397 m .

Observación. La forma siempre circular del horizonte nos obliga a admitir que la tierra tiene sensiblemente la forma de una esfera. En cuanto a desigualdades en la superficie terrestre que parecen oponerse a esta suposición, diremos, citando las palabras de Pichot, que las más altas montañas no producen un cambio sensible en la forma general de la tierra y que su efecto puede asemejarse a las rugas que ofrece la cáscara de una naranja. Sabemos que la montaña más alta de nuestro globo (el Everest en el Himalaya) tiene unos 8800 m de altura y por lo tanto la 750ª parte del radio terrestre. En un globo cuyo diámetro es de 7,5 decímetros, la altura de esa montaña se representaría, guardando la misma escala, por una desigualdad de medio milímetro, lo que no deformaría el aspecto general del globo.

En cuanto a los mares, su profundidad con respecto al espesor probable del núcleo, se representaría sobre el globo mencionado por una capa delgada de agua puesta con auxilio de un pincel. De donde se sigue que podemos representar la figura del globo terrestre, considerado en su conjunto, por la forma que ofrece la superficie de los mares.

CAPÍTULO SEGUNDO.

COORDENADAS GEOGRÁFICAS.

§ 65. CÍRCULOS Y MERIDIANOS TERRESTRES.

Para determinar la posición de ciudades y otros puntos de la superficie terrestre, se han imaginado dos series de círculos en ella que corresponden a círculos análogos en la esfera celeste. Una recta que es paralela al eje del mundo y pasa por el centro de la tierra, perfora la superficie de ésta en dos puntos opuestos, que son el polo Norte y el polo Sur; esta recta es el eje de rotación de la tierra y coincide con el eje del mundo. Un plano perpendicular a este eje, pasando por el centro, cortará la superficie según un círculo máximo que es el *ecuador terrestre*, y divide el globo en dos hemisferios, uno boreal y otro austral. Todo plano paralelo al ecuador corta la superficie según un círculo menor que se llama *paralelo terrestre*.

Meridiano geográfico o terrestre *es todo semicírculo máximo que pasa por el eje terrestre y el punto de observación.*

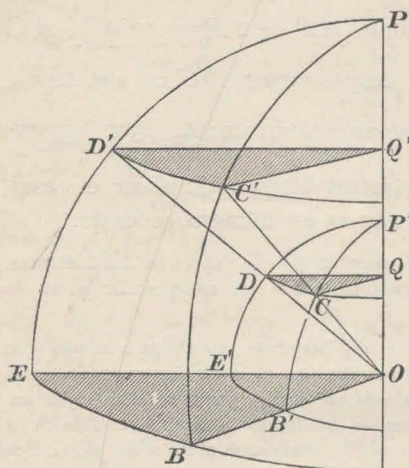


Fig. 56. Círculos terrestres.

Este plano se confunde con el meridiano astronómico y por consiguiente los dos cortan la esfera celeste por un mismo círculo horario en un mismo instante; por lo tanto *los observadores colocados sobre un mismo meridiano, tienen en un mismo instante la misma hora sideral o solar; reciprocamente, si dos observadores no tienen la misma hora en un mismo instante dado, se hallan sobre un meridiano distinto cada uno.*

La fig. 56 representa una parte de la esfera celeste con la parte del globo terrestre que le corresponde y los elementos que hemos mencionado en este párrafo.

§ 66. LONGITUD Y LATITUD GEOGRÁFICAS.

Para determinar con exactitud un punto en tierra firme o en alta mar, se ha adoptado el sistema de coordenadas geográficas o terrestres que son la longitud y la latitud. Daremos las definiciones de un modo general *e independiente de la forma que pueda atribuirse a la tierra.*

Longitud de un punto terrestre *es el ángulo diedro que forma el meridiano de este lugar con otro meridiano escogido como origen.*

Latitud geográfica *es el ángulo que forma la vertical de un punto con el plano del ecuador.*

Explicaciones (fig. 57). Según la definición la longitud del punto *A* es el diedro $OPP'B$, si el meridiano terrestre $P'OP$ se toma por origen; su rectilíneo correspondiente OCB se mide por el arco OB . (El semicírculo $EOBE'$ pertenece al ecuador terrestre; el círculo de la figura es un meridiano terrestre completo.)

La latitud del punto *A* es el ángulo ACB formado por la vertical AC y su proyección CB sobre el plano del ecuador.

Los puntos que se hallan sobre un mismo meridiano, tienen la misma longitud, pero diferente latitud, por estar en paralelos dis-

tintos, como A y A' . Los puntos de un mismo paralelo tienen igual latitud: *su cenit se halla en un paralelo celeste de la misma graduación que el terrestre*; en la fig. 56 el cenit del punto D se halla en D' . La latitud se cuenta de 0^0 a 90^0 principiando en el ecuador, donde es 0, conforme a la definición, y puede ser boreal o austral. La longitud se cuenta de 0^0 a 180^0 , partiendo del meridiano que por convenio se adopta como origen, hacia el Este lo mismo que hacia el Oeste: por lo tanto en la graduación se agrega si la longitud es oriental u occidental. En geografía y en la navegación se toma por origen el meridiano de París, pero en Inglaterra se usa el de Greenwich. *La longitud de Greenwich con respecto al meridiano de París es occidental y cuenta $2^0 20' 24''$* . Dada la longitud de un punto con respecto a Greenwich se reduce al meridiano de París sumándola con ese número si es occidental; pero si es oriental, debe restarse. (Greenwich está al Oeste de París.)

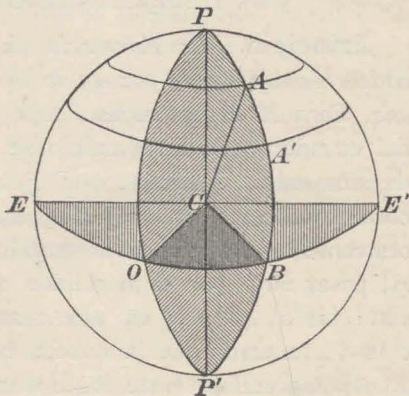


Fig. 57. Coordenadas geográficas.

§ 67. DETERMINACIÓN DE LA HORA SIDERAL.

El tiempo empleado por una estrella fija para recorrer un arco de 15^0 en el movimiento diurno, es una hora sidereal; el tiempo gastado en recorrer un arco de $15'$ o de $15''$, es un minuto o un segundo sidereal.

La hora sidereal de un punto terrestre es el número de horas, etc., transcurridas desde que el punto vernal ha pasado por el meridiano de este lugar. (Fijarse bien en esta definición.) Para determinarla se observa con el teodolito el paso de una estrella conocida por este meridiano; su ascensión recta, expresada en tiempo, como se publica en las tablas astronómicas, es precisamente la hora sidereal de este punto. He aquí la razón: El momento en que el punto vernal pasa por el meridiano, es por convenio el origen del día sidereal en cada lugar, el que tiene entonces $0^h 0^m 0^s$ tiempo sidereal; pero el punto vernal es también el origen de las ascensiones rectas, y decir, por ejemplo, que la ascensión recta de *Sirio* es de $6^h 40^m$, significa que *Sirio* pasa siempre $6^h 40^m$ después

del punto vernal por cada uno de los meridianos terrestres: luego al pasar una estrella por el meridiano, su ascensión recta indica la hora sideral de este punto.

§ 68. DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD.

Principio. *La diferencia de longitudes entre dos puntos se obtiene multiplicando por 15 la diferencia del tiempo propio de cada uno.* Para la demostración, supongamos que en todos los puntos del ecuador o de un paralelo se regulen los relojes sobre el paso de una misma estrella, por ejemplo de Sirio, por el meridiano correspondiente: esta estrella pasará en su movimiento diurno sucesivamente por todos los meridianos, los que consideramos fijos. Al pasar Sirio por el meridiano de *A* (fig. 57), el reloj sideral marcará las $6^h 40^m$: si en este momento son las $9^h 40^m$ en la estación *O*, tenemos que la estrella ha gastado 3 horas en recorrer el arco comprendido entre los dos meridianos; pero sabemos que recorre 15° por hora: luego basta multiplicar la diferencia de tiempo por 15 para hallar la longitud de *A* con respecto al meridiano de *O*. *El punto cuya hora adelanta sobre la del otro, está al Este.* Conociendo la longitud de *O* con respecto a París, será fácil referir la de *A* al mismo meridiano.

Síguese de lo dicho que toda la dificultad consiste en determinar la hora exacta que hay en un mismo momento en las dos estaciones, a veces muy distantes entre sí, y en saber si los relojes marchan de acuerdo. Veamos ahora algunos métodos que se usan para resolver esta dificultad.

1. Con el auxilio de buenos cronómetros se determina la diferencia de longitudes entre dos puntos *B* y *C* de la manera siguiente: Antes de partir de *B*, el viajero debe regular uno o varios cronómetros con referencia a la hora sideral de este punto¹, comprobando por algunos días la exactitud de su marcha: éstos, que tienen movimiento uniforme, como lo tienen las estrellas, marcarán la hora sideral de *B*. Llegando al punto *C* el viajero, determina la hora sideral en un momento oportuno; supongamos que sean en *C* las $6^h 40^m$. Si en el mismo instante el cronómetro que da el tiempo de *B*, marca las $7^h 3^m$, los dos puntos distan entre sí $23' \times 15 = 345'$, esto es $5^\circ 45'$, y la longitud de *C* es occidental con respecto a *B*.

¹ También puede adoptar la hora solar tomando la misma unidad en el segundo punto.

En alta mar la hora se determina por un método propio de los marinos: estos métodos pertenecen a la Náutica y la Geodesia.

2. Por el telégrafo o el cable submarino. Si dos estaciones se hallan unidas por el telégrafo, se manda la hora de la primera estación a la segunda, lo cual se efectúa casi instantáneamente, vista la gran velocidad de la corriente eléctrica, y suponiendo comunicación directa. *Ejemplo:* Se telegrafía desde Buenos Aires a Córdoba que son las $12^h 23^m 12^s$; el empleado en Córdoba observa que en este momento son las 12^h ; la diferencia $23^m 12^s$ se multiplica por 15; los 348 minutos de arco obtenidos manifiestan que Córdoba está $5^\circ 48'$ de longitud al *Oeste* de Buenos Aires.

Este método es bastante exacto y generalmente preferido donde hay comunicación telegráfica.

Ejercicios. Determinése la diferencia de longitud entre las ciudades siguientes:

1º Siendo en Barcelona mediodía, en Madrid son las 12^h menos $23^m 23^s,6$, en Roma (al Este) las $12^h 41^m 15^s,7$.

2º Siendo mediodía en París, en Barcelona son las 12^h menos 50^s ; en Madrid las 12^h menos $24^m 36^s$; en Buenos Aires las $8^h a. m.$; en Sidny las $9^h 54^m$ de la tarde.

3º Al ser en Santiago de Chile las 12^h , en Buenos Aires son las $12^h 52^m$. ¿Cuál es la diferencia en longitud?

Observación. La longitud geográfica suele denotarse con la letra *L*. En las efemérides de los astrónomos e ingenieros la longitud se expresa habitualmente en horas, etc., a semejanza de la ascensión recta: así para Madrid $L = 0^h 24^m 6^s$. Basta multiplicar el tiempo ordenadamente por 15, para obtener la graduación.

[3. Por los fenómenos astronómicos. Los fenómenos cuya observación se usa para determinar las longitudes, son los siguientes: a) los eclipses de los satélites de Júpiter; b) las ocultaciones de las estrellas que se producen al pasar la luna delante de ellas; c) las distancias lunares, esto es, las distancias angulares de la luna a las estrellas que están sobre su órbita: estas distancias son variables.

La hora en que estos fenómenos se realizan con respecto a París, se publica cada año en las efemérides, que se llaman «*Connaissance des temps*». El observador determina la hora respectiva de su estación y obtiene así la diferencia de tiempo con respecto a París. Habitualmente se mide la ascensión recta de la luna en su paso por el meridiano del observador; después se busca en las efemérides mencionadas la hora de París a la cual corresponde la ascensión recta observada. Este método es de gran precisión a causa de la rapidez que tiene el movimiento de la luna en ascensión recta.]

§ 69. DETERMINACIÓN DE LA LATITUD.

I. Teorema. *La latitud de un punto de la tierra es igual a la altura del polo en este punto.*

En la fig. 58 representa el círculo exterior el meridiano celeste y el interior el terrestre del punto A de observación. La latitud de este punto es, por definición, el $\sphericalangle ZOE$, que se mide por su arco ZE ; la altura del polo POH se mide por su arco PH : estos dos ángulos son iguales, porque, para valer un recto, tiene cada uno

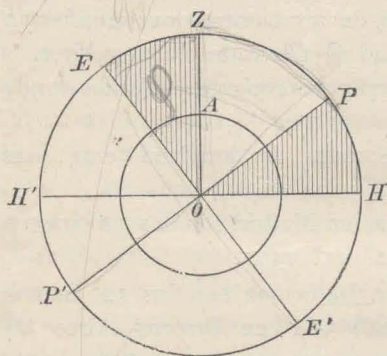


Fig. 58. Latitud.

el mismo complemento $\sphericalangle ZOP$, distancia cenital del polo. Bastaría, pues, medir la altura del polo (véase § 14) en un punto de observación, para conocer el valor de su latitud terrestre. Recíprocamente, conocida la latitud, se conoce la altura del polo.

Sin embargo, haciendo caso omiso de la altura del polo, se calcula directamente la latitud mediante la distancia cenital del polo, como luego veremos.

II. Métodos prácticos para determinar la latitud.

1. Restando de 90 grados la distancia cenital del polo, porque ésta es el complemento de la latitud. Recordando que $PP' \perp EE'$ y tomando los arcos correspondientes, tenemos que $EZ + ZP = EP = 90^\circ$; luego $EZ = \varphi = 90^\circ - ZP$.

Si la observación se hace con respecto al polo Sur, la latitud es austral.

Ejemplo. En un punto del hemisferio Sur, donde la Cruz es circumpolar, se mide la distancia cenital en sus dos pasos por el meridiano y sea 28° en el superior y 84° en el inferior. Determinar la latitud.

$$ZP = \frac{28 + 84}{2} = 56^\circ; \text{ luego } \varphi = 90^\circ - 54^\circ = 36^\circ.$$

El punto está situado sobre el paralelo 36° Sur.

Este método es el más exacto, pero sirve tan sólo en tierra firme y no en la navegación, ni en los viajes.

2. **Con auxilio de una estrella polar.** La estrella polar del hemisferio boreal dista del polo Norte $1^\circ 8'$: basta, pues, tomar su altura meridiana con la debida corrección y restar o sumar $1^\circ 8'$, según que el paso sea superior o inferior, para obtener la altura del polo mismo.

En el hemisferio austral la pequeña estrella B del Octante dista del polo Sur solamente $44'$; σ del Octante dista $46'$ del polo Sur¹.

3. Con auxilio de la fórmula $D = \varphi \pm Z$.

En alta mar el primer método es imposible (¿por qué?) y en tierra firme es incómodo para los viajeros.

Como la declinación del sol se publica en las efemérides para todos los días del año, y la Z del centro solar se mide directamente, basta despejar *con tino* la incógnita φ . (Se evita fácilmente el apuro con la fig. 21 y recordando que el sol se halla en el hemisferio boreal desde el 21 de marzo al 21 de septiembre.)

a) *En el día de los equinoccios la latitud es igual a la Z del sol en todos los puntos de la tierra* (¿por qué?).

b) *Zona intertropical*. Al estar el sol en el cenit $\varphi = \pm D$; al hallarse el sol en el hemisferio opuesto $\varphi = Z - D$; si en *el mismo*, se ofrecen dos casos: el sol está entre cenit y ecuador, luego **hacia** el hemisferio opuesto, $\varphi = Z + D$; si está entre Z y horizonte, $\varphi = D - Z$. (Compárese con la fig. 21.)

Ejemplos. Determinar φ de un punto situado en el Norte de Colombia, el 21 de diciembre, siendo $Z = 28^{\circ} 27'$ y $D = 23^{\circ} 27'$ austral. $\varphi = Z - D = 5^{\circ}$ (Paralelo de Bogotá).

El 21 de junio se observa en Venezuela que el sol tiene $D = 23^{\circ} 27'$ Norte y $Z = 13^{\circ}$. La latitud $\varphi = D - Z = 10^{\circ} 27'$.

En el istmo de Panamá se observa el 21 de marzo que $Z = 5^{\circ} 22'$; en este día $D = 3^{\circ} 32'$. La latitud φ es $= D + Z = 8^{\circ} 54'$ (Paralelo de Panamá).

c) *En la zona templada* el sol nunca llega a estar entre el cenit y el polo (¿por qué no?), sino únicamente en dirección al hemisferio opuesto, entre el cenit y el ecuador, o entre éste y el horizonte.

Regla fácil. $\varphi = Z + D$ al estar el sol en el mismo hemisferio que el observador; estando en el hemisferio opuesto, $\varphi = Z - D$.

Ejemplos. 1° Navegando al Sur de Pacífico, se encuentra que el 21 de diciembre el sol tiene $Z = 31^{\circ} 33'$; siendo $D = 23^{\circ} 27'$ Sur, $\varphi = Z + D = 55^{\circ}$. (Paralelo del Cabo de Hornos próximamente.) (¡Debe determinarse la longitud!)

2° Un viajero en la pampa argentina halla el 21 de junio que el sol tiene $Z = 56^{\circ} 53'$, siendo $D = 23^{\circ} 27'$ Norte.

La latitud $\varphi = Z - D = 23^{\circ} 26'$ (Paralelo de Santiago de Chile).

¹ Las coordenadas de la estrella polar, que se dan en la página 12, son las del año 1888. Actualmente son: $D = 88^{\circ} 52'$; $AR = 1^{\text{h}} 32^{\text{m}}$. Dista por tanto del polo $1^{\circ} 8'$.

Observación. En alta mar se determina directamente la altura del sol o de una estrella con auxilio del sextante: restándola de 90^0 con las debidas correcciones se obtiene Z .

¶ En este caso no es necesario conocer con exactitud la dirección del meridiano: basta fijarse, si la altura es sensiblemente la misma durante algún rato, porque en la vecindad del meridiano la altura es máxima, o de una variación insignificante.)

Nota. No hay círculo vicioso al decir aquí que la latitud se mide con auxilio de la declinación, siendo así que ésta se determina con auxilio de la latitud: porque, primero se determina la latitud del observatorio midiendo la distancia cenital del polo; después se miden las declinaciones de las estrellas y se publican en los anuarios astronómicos y pueden servir para determinar la latitud de cualquier punto.

Dos casos particulares. I. Al mediodía de un equinoccio la latitud de cualquier punto terrestre es igual a la distancia cenital del centro solar, medida desde este punto; porque la declinación del sol es cero y $\varphi = Z$.

II. Al estar una estrella o el sol en el cenit de un lugar, la latitud de este punto es igual a la declinación del astro (¿por qué?).

Ejemplo. Después de una tempestad en el Pacífico, se establece calma y en lóbrega noche se disipan las nubes, y risueño aparece Canopo en el cenit del buque; buen piloto como es en el navío de los Argonautas, manifiesta al capitán desorientado que se halla en la latitud 52^0 Sur.

§ 70. EJERCICIOS NUMÉRICOS.

Lema. *La diferencia de tiempo entre dos ciudades, situadas sobre meridianos distintos, se calcula multiplicando por 4 la diferencia de sus longitudes.* Si un factor se da en grados, el producto resulta ser minutos de tiempo; si un factor se da en minutos de arco, el producto son segundos de tiempo; si el producto es mayor que 60, se divide por 60 para reducir los minutos a horas, y los segundos a minutos; los segundos de arco sobrantes ya no se multiplican por 4, sino que se dividen por 15 para obtener segundos de tiempo.

Téngase presente que el tiempo de la ciudad situada al Este de otra, *adelanta* sobre el tiempo de la segunda, porque el sol pasa antes por el meridiano de aquélla.

Cuando una ciudad está al Este de París y otra al Oeste, sus longitudes deben *sumarse* [porque $+10^0 - (-20^0) = 10^0 + 20^0$] para obtener la diferencia de sus longitudes, más bien, porque aquélla se considera como origen.

Demostración del lema. Un raciocinio sencillo evidencia la exactitud de la tesis. Si el sol, en su movimiento diurno, gasta

4 minutos de tiempo para recorrer 1° , para recorrer 13° gastará 13 veces 4 minutos; además, si gasta 4 segundos de tiempo para recorrer $1'$ de arco, para $20'$ gastará 20 veces 4 segundos.

Observación. El problema puede también resolverse dividiendo por 15 la diferencia de longitudes, porque a cada 15° corresponde una hora, a cada $15'$ de arco un minuto y a cada $15''$ un segundo de tiempo.

Ejercicios numéricos. Denotamos, para abreviar, con las letras d. t. las palabras diferencia de tiempo, y con d. L. la diferencia de longitud. Para el ejercicio ponemos la longitud en número redondo.

I. Calcular la hora de París, siendo mediodía en otro lugar. (En el § 80 están las coordenadas de varias ciudades para servir en estos problemas.)

¿Cuál es la d. t. entre Buenos Aires y Santiago de Chile?
d. L. = $73^{\circ} 1' 50'' - 60^{\circ} 42' 30''$; d. t. $49^m 17^s$.

II. El 21 de diciembre se encuentra en alta mar por medio del sextante que la altura meridiana del sol es de $78^{\circ} 51'$; las efemérides de París indican que la declinación austral del sol tiene $23^{\circ} 27'$. En este caso la distancia cenital del sol era $90^{\circ} - 78^{\circ} 51' = 11^{\circ} 9'$. Como el astro está entre el cenit y el ecuador, $D = H - Z$, luego la latitud $\phi = D + Z = 23^{\circ} 27' + 11^{\circ} 9' = 34^{\circ} 36'$ Sur. Estaba, pues, el navío sobre un punto de este paralelo: débese determinar su longitud. A este efecto se determina la hora del punto por un método propio de los navegantes: sean las 9 de la mañana. Supongamos que los cronómetros concuerden con la hora de París y marquen el mediodía y 40 minutos: multiplicando la diferencia de tiempo por 15, resulta que el navío se halla sobre el meridiano de 55° al Oeste de París y frente a Buenos Aires.

III. ¿Por qué el navegante, al dar una vuelta al mundo, *pierde* o *gana* un día sobre el tiempo del punto de su partida, que sea, por ejemplo, Barcelona?

1^o Tomando rumbo al Este (por el canal de Suez), camina el navío al encuentro de la salida del sol: por *cada* 15° Este el reloj del punto de arribo adelanta una hora sobre Barcelona; luego en la vuelta completa de 360° ($= 15^{\circ} \times 24$) aparecerán en el diario del navío 24 horas adelantadas sobre la hora de Barcelona; por lo tanto, si al entrar es lunes 1^o de octubre en este puerto, el diario del navío tiene martes 2 de octubre: el navegante ha *gastado* durante su viaje un día más que los habitantes de Barcelona.

2^o Tomando el navegante su rumbo al Oeste (por el Atlántico), el fenómeno es inverso: por cada 15° hay una hora de atraso

sobre la hora de Barcelona; luego en una vuelta el atraso es de 24 horas; si en este puerto es lunes 1º de octubre, el diario del navío tiene domingo 30 de septiembre, *ganando* un día.

Al volver Sebastián de Elcano en 1522 de su viaje en torno del mundo, era el 6 de septiembre en el puerto; pero el diario del buque marcaba el 5 del mismo mes.

Observación. Por la explicación precedente se comprende que en el primer caso el navegante cuenta días de 23 horas, y en el segundo caso días de 25 horas con respecto a Barcelona. Si dos buques saliesen el mismo día, uno al Este, otro al Oeste, dando la vuelta al mundo, a su regreso tendrían dos días de diferencia el uno con respecto al otro.

CAPÍTULO TERCERO.

EL RADIO Y LA FORMA VERDADERA DE LA TIERRA.

Nota histórica. En 256 a. d. J. C. calculó Eratóstenes de Alejandría la longitud del radio terrestre de la manera siguiente: Había oído decir que el 21 de junio el sol iluminaba el fondo de un pozo en Syene (alto Egipto), hecho que prueba que el sol estaba en el cenit y en el meridiano de este punto. Midiendo desde Alejandría a mediodía de esa fecha la distancia cenital del sol, la halló igual a $7^{\circ} 12'$; supo, además, por viajeros que la distancia entre los dos puntos era de 5000 estadios.

Si en la fig. 59 B representa Syene, A Alejandría, será $\angle ZZ' = \angle AOB = 7^{\circ} 12'$; por lo tanto la meridiana AB tiene $7^{\circ} 12'$ y mide 5000 estadios en longitud lineal.

Eratóstenes dedujo de estos datos que un grado de meridiano mide 700 estadios y toda la circunferencia del meridiano 360 veces más, suponiéndola circular, esto es, 250000 estadios; basta dividir este número por el valor de 2π para obtener la longitud del radio terrestre (porque $c = 2\pi r$, luego $r = c : 2\pi$).

Ignoramos el valor exacto de un estadio en metros; pero la causa principal de error es la evidente inexactitud en la distancia entre los dos puntos de observación.

§ 71. MARCHA QUE SE SIGUE EN ESTA INVESTIGACIÓN.

El principio fundamental, que es la base de las operaciones prácticas, lo manifiesta el siguiente raciocinio. Si la tierra es una esfera perfecta, los meridianos son círculos máximos, y los arcos de un grado de sus circunferencias tienen la misma longitud métrica; de donde resultaría que los radios tomados desde el nivel de los mares, pero en diferente latitud, serían iguales entre sí. Por el contrario, si la tierra es un elipsoide, y por lo mismo aplanada en los polos y prominente en la región ecuatorial, los meridianos son elipses o los arcos de un grado deben medir mayor número de metros cerca de los polos que cerca del ecuador: resultaría, pues, que los radios terrestres, que corresponden a diferente latitud, serían desiguales entre sí.

Llámanse **arco de un grado** un arco de meridiano tal que las normales trazadas en sus dos extremidades forman un ángulo de un grado. Daremos unas nociones breves sobre las tres operaciones principales que esta investigación comprende.

La primera operación consiste en trazar una meridiana entre dos estaciones, conforme a la explicación dada en el § 13. Debe elegirse un terreno llano y libre de obstáculos, que además presente puntos de alguna elevación.

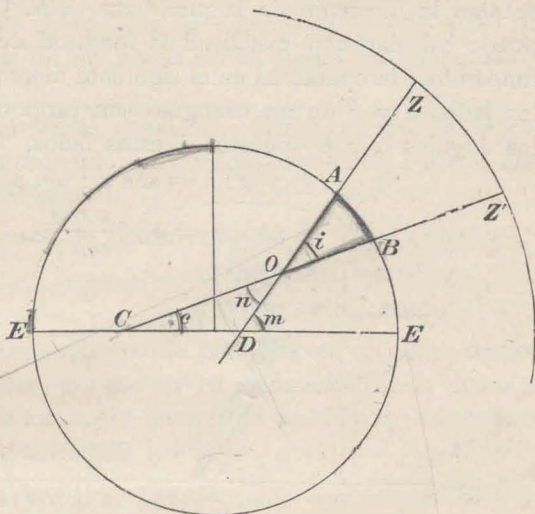


Fig. 59 Diferencia de latitud.

La segunda operación determina el número de grados que tiene la meridiana AB (fig. 59). Si las dos estaciones están en el mismo hemisferio, esta graduación es igual a la diferencia entre las dos latitudes; si B está al otro lado del ecuador, la graduación será igual a la suma de las latitudes:

$$AB = AE - EB = \varphi - \varphi'$$

$$AB = AE + EB = \varphi + \varphi'.$$

Téngase presente que nuestra definición de la latitud no supone la tierra esférica ni elíptica, sino convexa.

[Demostración exacta. La meridiana AB se mide por el $\angle AOB$ que forman las dos normales AD y BC ; los ángulos m y c son las latitudes; el $\angle m$ es el externo del $\triangle OCD$: tenemos, pues, que

$$AB = \angle i = n = m - c = \varphi - \varphi'.$$

Si las estaciones están en hemisferios distintos, resulta

$$AB = \varphi - (-\varphi') = \varphi + \varphi'.$$

La tercera operación consiste en medir la longitud métrica de la meridiana y su exactitud ofrece grandes dificultades que fácilmente se comprenden. El método más exacto es el de la triangulación, adoptado por Pictet en 1669 y perfeccionado por La Condamine. La elección del terreno y de puntos eminentes (torres y colinas) situados en torno de la meridiana, depende de los ingenieros.

Triangulación abreviada. Primero se miden la base AM (fig. 60) y todos los ángulos de los triángulos, en particular los que señalan la dirección de la meridiana MR . Con estos elementos se puede calcular con exactitud la longitud de los lados necesarios, fundándose la operación en el siguiente teorema de la Trigonometría: los lados a y b de un triángulo son proporcionales a los senos de los ángulos α y β opuestos a estos lados.

$$\frac{a}{b} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \Rightarrow a = b \times \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

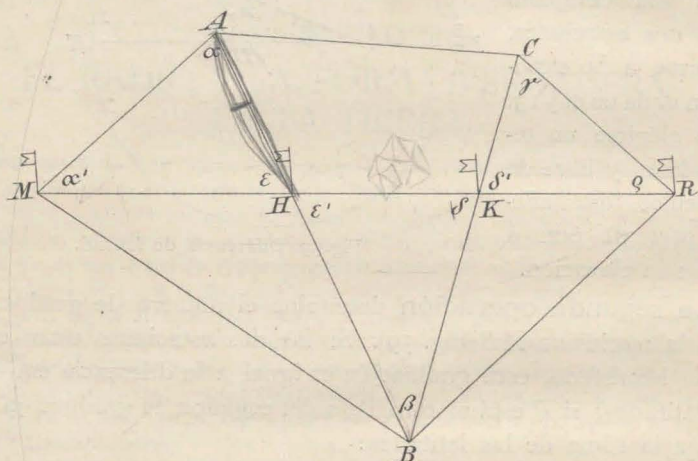


Fig. 60. Triangulación.

Se comprende, pues, que basta conocer la base AM y la graduación de los ángulos necesarios, para pasar de un triángulo a otro, sin necesidad de medir directamente la meridiana, operación que ofrecería graves dificultades. Para dar una idea consideramos unos pocos triángulos, aunque en realidad hay muchos, ya que esta medida pertenece a la Geodesia, y no a las nociones de Cosmografía.

Ejemplo. MH se calcula multiplicando la base AM por el cociente que dan los senos de los ángulos α y ϵ opuestos a estos lados; asimismo se calculan AB y AH , y será $HB = AB - AH$; la porción HK se calcula con HB y los senos de los ángulos opuestos, etc. La suma de las partes dará la meridiana entera.

Nota. Para prescindir de las desigualdades del terreno se proyecta la serie de los triángulos sobre la superficie de los mares, que se prolonga bajo de los continentes. El teodolito da los ángulos reducidos al horizonte.

§ 72. LA TIERRA ES UN ELIPSOIDE. SUS ELEMENTOS.

I. Arco de un grado de meridiano. La longitud total de la meridiana medida se divide por su número de grados para obtener la longitud lineal de un grado de la meridiana en la latitud escogida.

Por los trabajos que varias comisiones científicas ejecutaron con sumo cuidado, se han obtenido las medidas siguientes para el arco de un grado; este arco mide:

en el Ecuador, cerca de Quito, 110608 *m* (Condamine);

en Francia 111212 *m* (Delambre);

en Laponia 111917 *m* (Clairaut).

Estos números deben saberse de memoria en su valor aproximado 110, 111, 112 *km*, porque sirven para calcular la distancia entre dos puntos situados sobre un mismo meridiano, conociendo la diferencia entre sus latitudes.

II. Radios de curvatura. Multiplicando por 360 la longitud de un grado, se obtiene la longitud lineal $2\pi r$ de la circunferencia; dividiéndola por 2π , que vale 6,2832, resulta la longitud del radio de curvatura, el cual no debe confundirse con el radio que va al centro del globo terrestre. Síguese, 1º que los radios de curvatura de la región polar son más largos que los de la región ecuatorial, porque corresponden a arcos de un grado más largos; 2º síguese que las *normales* (§ 9) no se cortan ni en el centro ni en un mismo punto.

III. La tierra es aplanada en los polos. Hemos visto que los arcos de un grado no tienen la misma longitud métrica en cualquier latitud terrestre, de donde resulta que los meridianos no son círculos, ya que en ellos los arcos de un grado son todos iguales; por lo tanto, la tierra no es perfectamente esférica. Ahora bien: en toda *elipse* el arco de un grado medido cerca de la línea de los ápsides (ecuador) debe ser menor que el arco de un grado tomado cerca de los polos; como por los resultados arriba mencionados se evidencia que la longitud del arco de un grado va aumentando desde el ecuador hacia los polos, deducimos con razón que los meridianos, y por consiguiente también la tierra, son aplanados en los polos y prominentes en el ecuador: la tierra debe, pues, considerarse como un *elipsoide de revolución*, esto es, un cuerpo engendrado por la revolución de una superficie elíptica que gira alrededor de su eje menor.

Nota. El aplanamiento de la tierra puede considerarse como una consecuencia de la rotación sobre su eje, admitiendo que la tierra en su estado primitivo era una masa fluida; este fenómeno se explica en los tratados de Física, y de una manera más especial por los experimentos de Plateau, de Bruselas.

IV. Aplanamiento. Designando con la letra a la longitud del radio ecuatorial y con b la del radio polar, llamamos aplanamiento de la tierra la relación que guarda la diferencia $a - b$ con el radio ecuatorial. Substituyendo los valores y simplificando tenemos:

$$\frac{a - b}{a} = \frac{21\,318}{6\,377\,397} = \frac{1}{299}, \text{ que es el aplanamiento;}$$

luego la diferencia entre los dos semiejes del globo terrestre es casi la 300ª parte del radio ecuatorial. Un globo, cuyo radio ecuatorial tuviese 299 mm , tendría en la suposición de este aplanamiento un radio polar de 298 mm , porque

$$\frac{299 - 298}{299} = \frac{1}{299}.$$

Se comprende que tal diferencia no se notaría a simple vista. De esta consideración se deduce que en los casos ordinarios podemos decir que la tierra es sensiblemente esférica, y tomar 10 millones de metros como valor para la longitud del cuadrante de meridiano.

V. Se llama **normal** de un punto de observación a la recta perpendicular al plano que es tangente a la superficie terrestre en este punto. Las normales, por ser radios de curvatura, no convergen en el centro de la tierra; sin embargo, cuando no se pide gran precisión, las normales se confunden con las verticales, por considerarse la tierra casi esférica.

VI. Radios de la tierra. Debemos distinguir dos radios terrestres principales, *que no han de confundirse con los radios de curvatura*, puesto que aquéllos son las distancias desde la superficie al centro del elipsoide; un radio terrestre es el semieje mayor, otro es el semieje menor. En cuanto a la medida de estos dos radios, se adoptan las calculadas por el astrónomo *Bessel* como las más exactas, a saber:

el radio ecuatorial mide 6 377 397 m ,

el radio polar mide 6 356 079 m ;

el valor medio del radio terrestre = 6 366 km próximamente. En los cálculos astronómicos se emplea siempre el valor del radio ecuatorial; por su medio se calculan fácilmente la superficie y el volumen de la tierra.

La experiencia ha confirmado esta diferencia de radios y por lo mismo el aplanamiento: porque la intensidad de la gravedad (el

valor de g) es menor cerca del ecuador que en la región polar, según se explica en Física al tratarse de la caída de los cuerpos y de las leyes del péndulo. El péndulo de segundos tiene mayor longitud cerca de los polos que cerca del ecuador; en otras palabras, un mismo péndulo, en igualdad de tiempo, da mayor número de oscilaciones hacia los polos, lo cual prueba que la distancia al centro de la tierra decrece. Obsérvese, no obstante, que la única prueba decisiva en favor del aplanamiento es la diferente longitud del arco de un grado; la gravedad pierde una parte de su intensidad por la fuerza centrífuga que se opone a ella y es máxima cerca del ecuador: se comprende que por esta causa la prueba en favor del aplanamiento, deducida de la aceleración, o sea del valor de g , se hace más complicada y no pertenece a un texto elemental.

§ 73. DIMENSIONES DEL GLOBO TERRESTRE.

1. La **circunferencia** ecuatorial mide:

$$2\pi R = 2 \times 3,14159 \times 6377 \text{ km} = 40.067\,839 \text{ m.}$$

2. **Superficie** $= 4\pi R^2$; pero débese tener en cuenta que la tierra no es una esfera perfecta. Según el astrónomo Bessel, nuestro globo tiene una superficie total de 509,950,000 kilómetros cuadrados. La extensión que ocupan todos los mares es de 383,000,000 de kilómetros cuadrados. La superficie del sol es más de 11000 veces mayor que la de nuestro globo.

3. **Volumen** $= \frac{4}{3}\pi R^3$. El espacio que ocupa la tierra es equivalente a 1,083,000,000,000 de kilómetros cúbicos.

4. El **peso del globo terrestre** se calcula multiplicando el volumen (expresado en medidas del sistema decimal) por la densidad relativa al agua. El metro cúbico de agua pesa 1000 kg y es una tonelada métrica. Para expresar el volumen en metros cúbicos deben agregarse nueve ceros al número arriba indicado, y este número daría el peso en toneladas métricas, si la tierra tuviese la densidad del agua; pero siendo su densidad más de 5 veces mayor que la del agua, aquel número debe multiplicarse por 5. Resulta que el peso total del globo terrestre equivale a 5875 *trillones de toneladas* (de 1000 kg).

5. El **radio de un paralelo** cualquiera es la perpendicular trazada al eje desde un punto de la circunferencia del paralelo: su longitud se calcula multiplicando la del radio terrestre por el valor que tiene el coseno de la latitud ϕ respectiva.

Para los puntos no vecinos al ecuador se pone el valor de $R = 6366 \text{ km}$.

Ejemplo. Para la latitud de 60° el $\cos \varphi = 0,5$; la circunferencia de este paralelo mide $2 \pi r = 2 \times 3,14159 \times 3183 \text{ km}$.

En el polo $\cos \varphi = \cos 90^{\circ} = 0$ (no hay paralelo). En el ecuador $\cos \varphi = \cos 0^{\circ} = 1$; el radio del paralelo es el mismo radio terrestre.

§ 74. PROBLEMAS FUNDAMENTALES.

Primer problema. *¿Cuánta es la distancia lineal que corresponde a un grado de longitud geográfica, tomada sobre un paralelo de una latitud dada?*

Solución. Téngase presente que los meridianos se trazan en los globos de 10 en 10 grados; pero, aunque los arcos interceptados tienen la misma graduación, no pueden tener la misma longitud lineal, porque a partir del ecuador se estrechan los meridianos para concurrir en los polos.

Los 360° del ecuador miden 40000 km (en número redondo); luego un grado mide $111,3 \text{ km}$.

¿Cuántos kilómetros mide un grado de longitud geográfica sobre el paralelo 34° (boreal o austral)?

Mido con un compás en el globo la distancia entre *dos meridianos* sobre el paralelo 34° ; aplico esta medida sobre la graduación del ecuador, lo que dará unos 8° ; este número se multiplica por $111,3 \text{ km}$ y se obtiene que los 10° del paralelo miden $890,4 \text{ km}$; dividiéndolo por 10, resulta que 1° mide 89 km .

[Con exactitud científica se resuelve el problema por lo dicho en el número 5 del párrafo anterior: dividiendo la longitud lineal de todo el paralelo por 360 se obtiene la de un grado.]

Aplicaciones. Conocida la longitud métrica de un grado, podemos calcular la distancia entre dos puntos situados sobre el mismo paralelo, determinando primero la diferencia entre sus longitudes geográficas.

Ejemplos. 1. Calcular la distancia de Buenos Aires a la costa del Pacífico, contada sobre el paralelo 34° (diferencia de longitud unos 13°).

2. Distancia de la mayor anchura de Sud-América, en el paralelo 10° (diferencia de longitud unos 45°).

3. Distancia de la mayor anchura de África, contada sobre el paralelo 10° (diferencia de longitud unos 70°).

Problema segundo. *Calcular la distancia métrica entre los puntos situados sobre el mismo meridiano, conocidas sus latitudes.*

Solución. Se multiplica el valor métrico de un grado de meridiano por el número de grados que da la diferencia de latitud; si los dos puntos se hallan en distinto hemisferio, sus latitudes se suman. (Debe tenerse presente que un grado de meridiano tiene diferente valor hacia los polos, según se indica en el § 72; para el ejercicio basta tomar el valor medio de 111 km.)

Ejemplos. 1. Calcular la distancia entre Barcelona y París, situados sensiblemente sobre el mismo meridiano (diferencia de latitud 7^0).

2. Calcular la distancia entre Caracas y el Cabo de Hornos. El primer punto tiene $\varphi = +10^0$, el segundo $\varphi = -56^0$ próximamente. ¿Cuánto tiempo gastaría un tren en este trayecto, caminando 60 km por hora? (Como en este trayecto hay una gran parte vecina al ecuador, conviene para una mitad tomar el valor de un grado 110,6 km, y para la otra mitad 111,2 km.)

3. Calcular la distancia de Ceuta (en África, frente a Gibraltar) hasta el Cabo de Buena Esperanza. $\varphi = 35^0$; $\varphi' = -34^0$ próximamente.

Observación. Los ejemplos contenidos en los dos problemas de este párrafo bastan para hacer aplicaciones variadas y acomodadas al país respectivo en que uno vive.

CAPÍTULO CUARTO.

MAPAS GEOGRÁFICOS.

§ 75. GENERALIDADES.

Así como existen globos celestes, también se usan geográficos; basta recordar las explicaciones dadas con referencia a los celestes y en su construcción aplicar las coordenadas terrestres, la longitud sobre el ecuador o un paralelo, y la latitud sobre un meridiano. A pesar de la forma elipsoidal de la tierra úsanse globos esféricos en conformidad con el aplanamiento, que en globos relativamente tan pequeños no es sensible, según hemos visto al tratar de los elementos del elipsoide terrestre.

El objeto del presente capítulo es dar algunas nociones sobre los mapas geográficos. Supongamos construido un globo terrestre y que lo tengamos delante de nuestra vista. Para construir un mapa conforme a este globo tendremos que resolver un problema de geometría que se puede enunciar así: *transportar sobre un plano unas figuras cualesquiera trazadas sobre una esfera.*

Sabemos que es imposible *desarrollar* una superficie esférica como se puede hacerlo con una cilíndrica; la esférica no puede extenderse sobre un plano sin rasgarse y doblarse: produciendo, pues, cualquier método o sistema alguna deformación, debe adoptarse aquel en que el dibujo se deforme lo menos posible o que sea más conveniente al fin propuesto; en todo caso *el problema se reduce a trazar en el papel una red de meridianos y paralelos terrestres* con el fin de aplicar la longitud y latitud del punto considerado. Los mapas se pueden dividir en dos categorías: los unos representan habitualmente el globo terrestre por medio de dos hemisferios, yuxtapuestos, pero separados por un meridiano común; los otros no se refieren más que a una parte de poca extensión, un país o una provincia. Llámase *plano de proyección* el círculo máximo sobre el cual proyectamos la figura, y lo es el ecuador o un meridiano.

§ 76. SISTEMA ORTOGRÁFICO U ORTOGONAL.

En este sistema el observador se supone colocado fuera de la esfera y a una gran distancia, frente al centro del plano de pro-

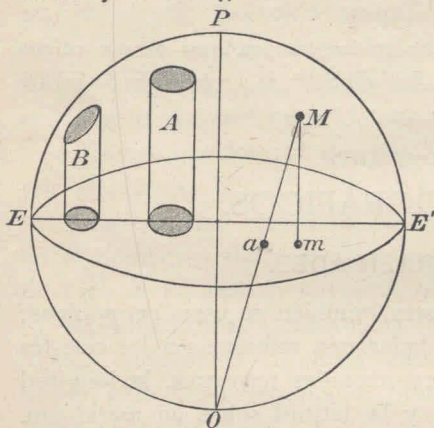


Fig. 61. Proyecciones.

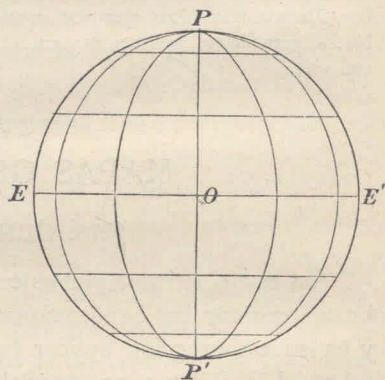


Fig. 62. Proyección ortográfica.

yección. Si el plano de proyección en la fig. 61 es el ecuador, la proyección de un punto cualquiera M situado en la superficie es el pie m de la perpendicular bajada desde M sobre el plano del mapa.

Supongamos ahora que el plano de proyección sea un meridiano y que se trate de proyectar sobre él un hemisferio terrestre y que el círculo de la fig. 62 sea este meridiano. Tendremos la proyección ortográfica si bajamos sobre el meridiano perpendiculares

desde los diferentes puntos de la superficie del hemisferio. Siendo PP' el eje terrestre, resulta que el ecuador y los paralelos se representan por *rectas* perpendiculares al eje; la proyección del meridiano *medio* (el que divide *este* hemisferio en dos partes iguales) coincide con PP' ; los demás meridianos se representan por *elipses* cuyo eje mayor es PP' .

En este sistema se representan con bastante exactitud las partes del hemisferio que corresponden a las regiones centrales del mapa; pero en la vecindad de las orillas hay necesariamente deformaciones: esto lo manifiesta la fig. 61, en donde la parte polar A se proyecta en verdadera magnitud, y la parte B tiene una proyección menor y de diferente forma. Por este inconveniente, el sistema ortográfico se usa poco en geografía y de preferencia en las cartas celestes. Cuando miramos el sol y la luna, observamos que el disco se presenta a nuestra vista en forma de proyección ortográfica, siendo el plano de proyección un meridiano.

§ 77. PROYECCIÓN ESTEREOGRÁFICA.

Este sistema, que se usa con preferencia en geografía, es una *perspectiva*, porque se supone el ojo del observador aplicado en O diametralmente opuesto al vértice del hemisferio que se quiere representar. *La proyección del punto M (fig. 61) es el punto a , donde el rayo visual OM penetra en el plano de proyección*; este ejemplo manifiesta la diferencia que existe con el sistema ortográfico.

El sistema estereográfico se caracteriza por las dos propiedades que vamos a indicar, sin dar la demostración.

1^a Las proyecciones de dos curvas cualesquiera, trazadas sobre la esfera, se cortan bajo el mismo ángulo que forman las curvas reales: el ángulo que forman las tangentes a las curvas se conserva en la proyección. Un triángulo trazado sobre la esfera, tan pequeño que sus lados pueden considerarse como rectilíneos, tiene por proyección un triángulo semejante lo mismo que otra figura pequeña: la razón de la semejanza es variable desde el centro hasta las orillas, lo cual es una consecuencia natural de la posición que tiene el ojo del observador.

2^a La proyección de un círculo situado sobre la esfera es un círculo; pero éste se transforma en línea recta siempre que el círculo proyectado pasa por el punto de vista O . Se sigue que los meridianos y los paralelos se representan por círculos; pero al pasar su plano por el punto de vista se representan por rectas.

Nota. Cuando en este sistema el plano de proyección es el ecuador, las regiones polares se proyectan en el centro del mapa; en este caso el sistema estereográfico es más conveniente a las cartas celestes que a los mapas geográficos, a no ser que se trate de una región circumpolar.

Proyección estereográfica sobre un meridiano. Para representar un hemisferio terrestre se adopta con preferencia como plano de proyección un meridiano que atraviesa de un lado el Atlántico y del otro el Pacífico, a fin de dejar intacta la tierra firme. — Sea el círculo de la fig. 63 este meridiano, y NS la

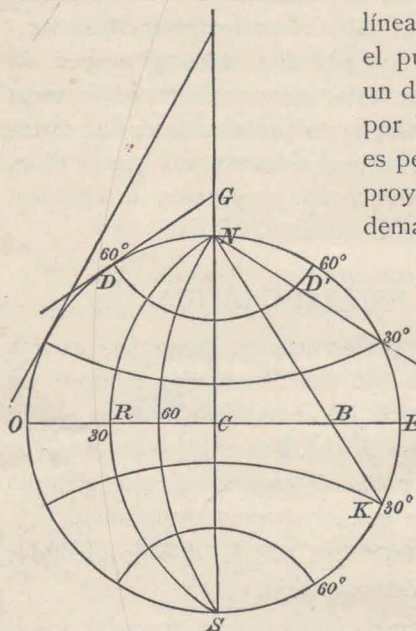


Fig. 63. Proyección estereográfica.

línea de los polos. El ecuador contiene el punto de vista y se proyecta como un diámetro EO perpendicular al eje; por la misma razón el meridiano que es perpendicular al plano del mapa, se proyecta siguiendo la recta NS ; los demás meridianos y los círculos paralelos al ecuador se proyectan en forma de arcos de círculo. Para dar un ejemplo, veamos la proyección de un

arco de 60° de latitud. En la circunferencia tomo $OD = ED' = 60^{\circ}$;

por el punto D trazo una tangente DG hasta encontrar la prolongación del eje, y con el radio DG , desde G como centro, describo el arco DD' , que será el

paralelo pedido, porque pasa por D y D' (que son sus propias proyecciones) y corta el meridiano de proyección formando un ángulo recto.

Para construir un meridiano cualquiera, por ejemplo uno que forme un ángulo de 30° con el plano del mapa (hacia la izquierda), trazo hacia la derecha la cuerda NK , que forme con el eje un ángulo de 30° y encuentre en B el diámetro OE ; desde B como centro y con el radio BN describo el arco NRS , que es el meridiano pedido, porque este meridiano debe pasar por N y S (que son su propia proyección); además, su normal en el punto N debe formar un ángulo de 30° con la normal trazada al meridiano $ONES$; estas condiciones están cumplidas en virtud de la construcción. La fig. 64 es la representación estereográfica de los dos hemisferios terrestres.

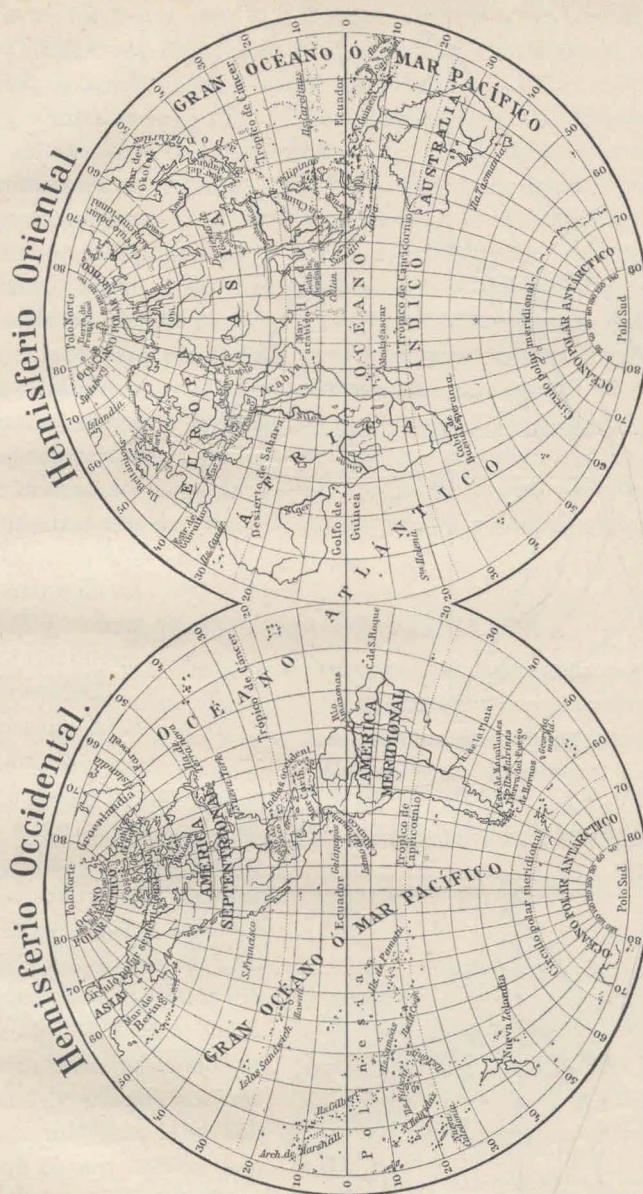


Fig. 64. Los dos hemisferios terrestres (Proyección estereográfica).

§ 78. MAPAS PARCIALES.

Cuando se trata de representar en el mapa, no un hemisferio entero, sino un país, como, por ejemplo, Alemania, la Argentina, el Perú, suele emplearse el *desarrollo cónico*.

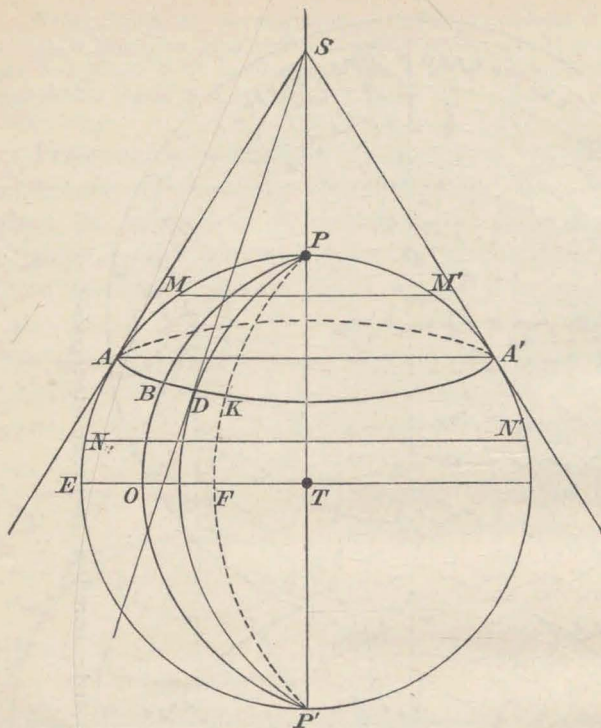


Fig. 65. Desarrollo cónico.

En la fig. 65 sean MM' y NN' los dos paralelos extremos entre los cuales está comprendida la región cuyo mapa se quiere construir: AA' sea el paralelo medio (para evitar confusión en la figura se representan los paralelos extremos por sus trazas); sean PDP' y PKP' los meridianos extremos y PAP' el meridiano medio.

Debemos ahora imaginarnos un cono circunscrito

a la esfera, a lo largo del paralelo medio, de manera que tenga su cúspide en la prolongación del eje. Como el mapa representa un país

o una región parcial, los meridianos respectivos se confunden sensiblemente con las generatrices SA , SD , etc. del cono, que son tangentes a sus arcos; los paralelos se confunden sensiblemente con los círculos determinados en el cono por sus planos, puesto que la diferencia de sus radios es pequeña en los paralelos extremos y nula en el paralelo medio. Por consiguiente puede admitirse, en la suposición hecha con referencia a la

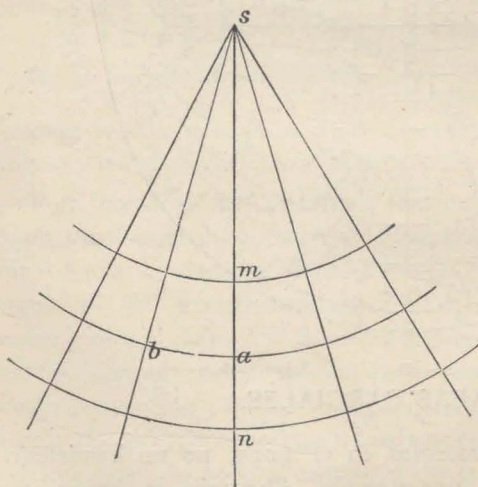


Fig. 66. Aspecto plano de desarrollo cónico.

extensión del mapa, que la superficie del cono se confunde con la parte considerada del globo y que para la construcción del mapa basta el desarrollo cónico sobre un plano.

En este desarrollo (fig. 66) los paralelos se transforman en círculos concéntricos, y los meridianos en líneas rectas que concurren al centro común de esos círculos. Primero se traza el meridiano medio sa , sobre el cual se fija un punto arbitrario que se toma por centro; con los radios $sa = SA$, $sm = SM$, $sn = SN$ trazo arcos que corresponden a los tres paralelos de la fig. 65. Para construir un meridiano cualquiera $PBOP'$ basta recordar que un arco AB del paralelo medio se transforma en el mapa en un arco ab de igual graduación, con lo cual está determinado el punto b : este punto se une con el centro y la recta sb representa el meridiano pedido. — Este sistema tiene la ventaja de que los meridianos y paralelos se cortan formando ángulos rectos, como lo hacen sobre el globo; pero las áreas de las figuras que se trazan sobre el globo quedan notablemente alteradas en el mapa.

§ 79. SISTEMA DE MERCÁTOR.

Los mapas marítimos se construyen habitualmente conforme al sistema de *Mercátor* (fig. 67). Imaginémonos un *cilindro circuncrito* a la esfera, a lo largo del ecuador, y supongamos que los planos de los meridianos se prolongan hasta el cilindro, que cortan en sus generatrices. Tomemos un meridiano por origen, y de uno y otro lado de este meridiano desarrollemos ahora el cilindro sobre

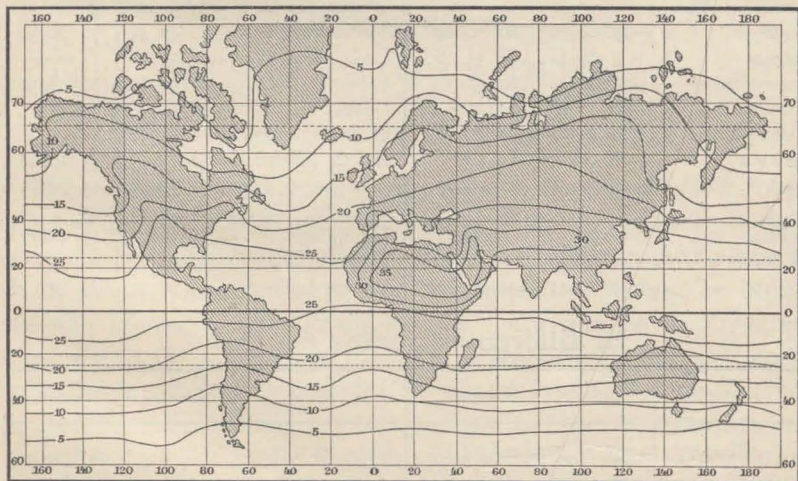


Fig. 67. Sistema de Mercátor.

un plano que sea tangente a la esfera. Los meridianos se representan sobre el plano como rectas paralelas entre sí y perpendiculares al ecuador; sus distancias respectivas miden las longitudes. Los paralelos se representan por rectas paralelas al ecuador; pero sus distancias al ecuador ya no se miden por medio de sus latitudes, sino que deben calcularse con el auxilio de una fórmula particular. En la figura hágase caso omiso de las curvas, que indican la inclinación magnética.

Las ventajas de este sistema se resumen en las siguientes: los meridianos y paralelos se cortan formando ángulos rectos y las líneas trazadas sobre el mapa se cortan bajo el mismo ángulo que las curvas correspondientes descritas sobre el globo terráqueo por el rumbo del navío; el mapa ofrece, además, al estudio comparativo la superficie terrestre en todo su conjunto.

La desventaja de sufrir las partes polares en su configuración notables alteraciones, no ofrece inconveniente para los marinos.

§ 80. COORDENADAS GEOGRÁFICAS.

Se entiende que la longitud es Oeste, cuando no se indica. El meridiano de origen es el de París. Se han tomado del Anuario de París y de un Diccionario de geografía.

I. Capitales.

Ciudades	Latitud	Longitud	Ciudades	Latitud	Longitud
Asunción, Paraguay	-25° 16' 50"	60° 0' 20"	Montevideo . . .	-34° 54' 29"	58° 32' 18"
Bogotá	+ 4 35 48	78 34 8	Nueva York . . .	+40 42 44	76 20 38
Buenos Aires . . .	-34 36 28	60 42 29	París	+48 53	cero
Caracas	+10 30 50	69 15	Pekín	+39 54 23	114 8 30 E
Guatemala	+14 41	92 55	Quebec	+46 48 30	73 32 35
Habana	+23 9 24	84 42	Quito	- 0 14 0	81 5 30
La Paz, Bolivia . .	-16 29 57	70 29 25	Río de Janeiro .	-22 54 15	45 28 48
Lima	-12 3 4	79 27 45	Roma	+41 54 6	10 6 21 E
Londres	+51 30 50	2 26 57	Santiago, Chile .	-33 26 42	73 1 49
Madrid	+40 24 30	6 1 30	Leningrado . . .	+59 56 30	27 58 13 E
Méjico	+19 25 45	101 27	Terán	+35 40	49 5 E
			Yeddo, Japón . .	+35 36	137 24 E

II. Diferentes puntos del globo.

Puntos	Latitud	Longitud	Puntos	Latitud	Longitud
Bahía, Brasil . . .	-13° 0' 37"	40° 50' 0"	Cabo de Buena		
Barcelona	+41 21 44	0 10 18 O	Esperanza	-33° 56' 3"	16° 8' 37" E
Bilbao	+43 22 36	5 24 19	Cabo Hornos . . .	-55 58 40	69 37 30

Puntos	Latitud	Longitud	Puntos	Latitud	Longitud
Catamarca . .	-28° 12'	68° 30' 0''	Panamá . . .	+ 8° 57' 16''	81° 52' 26''
Córdoba, Arg. .	-31 26	65 13 20	Salta, Argent. .	-24 20	66 55
Gibraltar . . .	+36 17 20	7 41 42	S. Francisco E. U.	+37 50	124 50 15
Greenwich . . .	+51 28 38	2 20 15	Santa Fe, Arg.	-31 40	60 18
La Plata . . .	-34 40 8	60 8	Sidney . . .	-33 51 40	148 52 E
Manila . . .	+14 36 30	118 38 40 E	Spitzberg . . .	+79 33	8 49 E
Mendoza . . .	-32 58	60 18	Tucumán, Arg.	-26 50	67 16
Nueva Zembla .	+76 33	60 37 E	Valencia, Esp. .	+39 27 10	2 40

III. Varios puntos de Chile.

Puntos	Latitud	Longitud	Puntos	Latitud	Longitud
*Santiago . .	-33° 26' 42''	73° 1' 49''	San Felipe . .	32° 44' 55''	0° 8' O
		París	Valparaíso . .	33 1 48	3 50 O
Arepunta . . .	18 56 55	5° 16' E	San Fernando .	34 35 7	1 15 O
Antofagasta . .	23 38 39	1 7 5E	Talca . . .	35 25 37	3 56 O
Caldera . . .	27 4 6	0 34 O	Los Ángeles .	37 28 16	6 39 O
Copiapó . . .	27 31 33	1 40 5E	*Concepción .	36 41	72° 30' París
La Serena . .	29 54 29	2 15 9O	*Valdivia . .	39 4	75 16 »
Coquimbo . .	29 57 5	2 38 O	*Ancud . . .	41 51	73 49 »
Ovalle . . .	30 36 3	2 5 O	*Iquique . . .	20 12	70 12 »

Las coordenadas de los puntos de Chile que no llevan asterisco, han sido determinadas por los astrónomos del observatorio de Santiago: su longitud se expresa en **tiempo** con respecto al meridiano de este observatorio.

CAPÍTULO QUINTO.

ROTACIÓN DE LA TIERRA.

§ 81. POSIBILIDAD DE ESTE MOVIMIENTO.

Al explicar los fenómenos astronómicos hemos admitido hasta el momento actual la existencia del movimiento diurno de los astros, efectuado en 24 horas alrededor del globo terrestre. Examinemos ahora si estos fenómenos pueden igualmente explicarse en la suposición contraria, admitiendo que la tierra gira en 24 horas en torno de su eje juntamente con toda la atmósfera, permaneciendo inmóviles en el espacio las estrellas. Este movimiento, que se llama **rotación**, debe distinguirse del movimiento de **traslación**, en virtud del cual la tierra recorre una trayectoria elíptica alrededor del sol, como veremos.

Si desde la cubierta de un navío que atraviesa una laguna, clavamos la vista en las aguas tranquilas, pero con firmeza y sin mirar a otra parte, nos formamos de repente una ilusión: se nos figura que corren las aguas, y que el barco está inmóvil: esta ilusión desaparece si, levantando la vista, miramos puntos de comparación que estén en la orilla; igualmente distinguimos la realidad del movimiento si dejamos caer un objeto al agua y éste se desvía de la vertical. Cosa análoga sucede en el movimiento de la tierra: por faltar en este movimiento relativo puntos de comparación, sucede que el efecto de la impresión en nuestra vista es el mismo, sea que la tierra gire sobre su eje permaneciendo inmóviles los

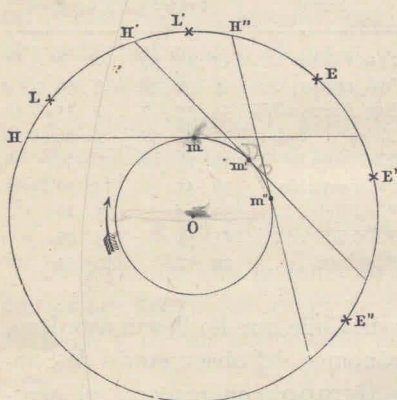


Fig. 68. Rotación de la tierra.

astros, sea que suceda el fenómeno contrario; lo único que varía es el sentido, la dirección del movimiento, lo que vamos a manifestar por la explicación siguiente.

Sea el punto O centro de la tierra (fig. 68); el arco exterior la trayectoria aparente de algunas estrellas: un observador colocado en m vería todas las estrellas colocadas encima de su horizonte H . Supongamos que la tierra gire en el sentido de la flecha:

en virtud de esta rotación el horizonte H va cambiando en cada momento; llegando el observador al punto m' , la estrella L se ha puesto y la E' ha salido; estando en m'' , se pone la L' , y E' se halla en su cenit, saliendo la E'' . En una palabra, las apariencias son las mismas en la hipótesis de la rotación de la tierra que en la suposición antigua: las estrellas parecen describir circunferencias del círculo cuyo plano es perpendicular al eje del mundo. Daremos ahora algunas pruebas que nos obligan a admitir la existencia de esta rotación.

§ 82. PRUEBAS RACIONALES.

Las razones que en seguida vamos a proponer, no prueban directamente la rotación de la tierra sino más bien la improbabilidad y en cierto grado aun la imposibilidad del movimiento diurno de las estrellas.

1. Si las estrellas estuviesen fijas en una superficie esférica de cristal u otra materia, no sería tan absurdo admitir su movimiento diurno; pero es el caso que las estrellas no están colocadas de esta manera: son astros numerosos, independientes los unos de los otros, que se hallan a distancias muy variadas y enormes; parece imposible que puedan combinar sus movimientos para recorrer órbitas tan desiguales en tan rigurosa igualdad de tiempo. Además seguiríase entonces que, para ejecutar este movimiento, los astros deberían tener una velocidad tan enorme, que sobrepasaría toda imaginación; el sol, por ejemplo, debería recorrer unos 666 000 *km* (90 000 leguas geográficas) en un *minuto*, y la estrella *más cercana* debería tener una velocidad de 17 000 millones de leguas por minuto para recorrer su paralelo en 24 horas. Admitiendo, por el contrario, la rotación de la tierra, cada punto del ecuador terrestre recorre 40 070 *km* en 24 horas, y por lo tanto 28 *km* en cada minuto, lo que no constituye una velocidad enorme.

2. A esta velocidad enorme de los astros debería corresponder una fuerza atractiva proporcional de la tierra en cuyo torno girarían; pero sabemos que la sola masa del sol es unas 324 000 veces mayor que la de nuestro globo, sin mencionar la masa de las otras estrellas. Sería, pues, contra el principio fundamental de la mecánica suponer que una masa pequeña obligara a otra tan enorme a girar en torno suyo.

3. Para que un cuerpo adquiriera el movimiento circular es preciso evidentemente que alguna fuerza lo solicite sin cesar hacia el centro del círculo: dejando de obrar esta fuerza, el cuerpo toma una dirección tangencial y abandona el movimiento circular. Ahora bien: no hay sobre el eje del mundo, en el centro de cada paralelo recorrido por las estrellas, cuerpo alguno para producir esta acción centripeta; luego es imposible el movimiento diurno de las estrellas.

Nota. La dificultad mencionada no puede alegarse en contra de la rotación de la tierra; porque al estar un cuerpo sólido animado de un movimiento de rotación, por ejemplo un trompo, en torno de su eje de simetría y que ninguna acción exterior le sea contraria, el movimiento se conserva indefinidamente lo mismo que el movimiento rectilíneo y uniforme.

§ 83. PRUEBAS EXPERIMENTALES.

Antes de examinar algunos fenómenos terrestres que pueden tan sólo explicarse admitiendo la rotación de la tierra del Oeste al Este, mencionemos el argumento que se deduce de la analogía

con otros cuerpos cósmicos, a saber: se ha comprobado por la observación que todos los cuerpos celestes cuya forma y dimensiones podemos conocer por medio del telescopio, tienen movimiento de rotación sobre su eje: el sol, la luna, los planetas; siendo la tierra un planeta como los demás, es natural que también tenga el movimiento de rotación, lo que se prueba con certeza mediante los siguientes fenómenos.

Rotación de la tierra, comprobada por la caída de un cuerpo (fig. 69).

Represente la curva inferior un arco del ecuador terrestre; la vertical AT coincide en el ecuador con el radio de rotación. (Fácil es hacer la aplicación a un paralelo, recordando que en este caso el radio de la tierra no coincide con el radio de rotación.)

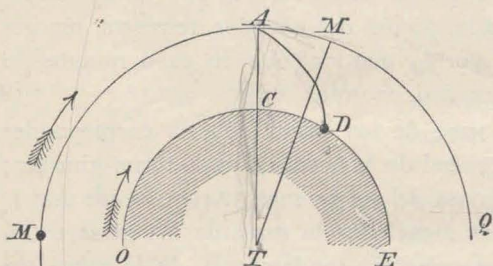


Fig. 69. Desvío de la vertical.

Supongamos un cuerpo pesado A suspendido a la altura de 320 m (torre de Eiffel), y demostremos primero con Newton la siguiente proposición: Si la tierra tiene rotación en

torno de su eje, del Oeste al Este, el cuerpo A , al romperse la suspensión, no cae al pie C de la vertical, sino algo desviado hacia el Este.

I. Demostración. Por ser el radio de rotación AT mayor que CT , el cuerpo A está dotado de mayor velocidad lineal que el punto C : en el momento de romperse la suspensión, el cuerpo A posee por lo mismo mayor fuerza viva de proyección hacia el Este que el punto C . Mientras la vertical AT llega a tomar la posición MT , el cuerpo A , solicitado por la gravedad y la fuerza tangencial, recorre la resultante parabólica AD y caerá al Este de C ; el desvío será tanto mayor cuanto mayor sea la diferencia entre el camino del punto A y el camino del punto C , esto es, cuanto mayor sea la altura. — Ahora bien: los experimentos ejecutados con toda precaución han comprobado la existencia de esta desviación hacia el Este; luego tiene la tierra rotación del Oeste al Este.

El experimento hecho en un pozo de las minas de Freiberg en Sajonia, en 1832, dió un desvío de 28 mm Este.

II. **La dirección de los vientos alisios.** El aire atmosférico de las zonas ecuatoriales tiene una temperatura muy superior a la del de las regiones circumpolares, de lo cual resulta que las capas inferiores se dilatan y se elevan hacia arriba dejando el aire enrarecido en las regiones inferiores. Las capas circumpolares, más frías y densas, se precipitan en forma de vientos hacia la región ecuatorial. Si no existiera la rotación de la tierra, las corrientes aéreas deberían soplar del Norte al Sur en el hemisferio boreal, y del Sur al Norte en el opuesto; pero en realidad esos vientos, que se llaman **alisios**, soplan en el hemisferio boreal en la dirección del Nord-Este al Sur-Oeste, y en el austral del Sur-Este al Nord-Oeste y sufren un desvío resultante hacia el Oeste. Estos fenómenos sólo pueden explicarse por la rotación de la tierra del Oeste al Este, en conformidad con los principios que vamos a indicar brevemente.

1º Todas las capas atmosféricas participan del movimiento de rotación juntamente con el globo terrestre.

2º La velocidad lineal del movimiento rotatorio en torno de un eje es tanto menor cuanto menor sea la distancia del punto considerado al eje de rotación. (En el ecuador es de 1670 km, a 60º latitud sólo de 835 km *por hora*; en el polo es nula.) De estos principios se sigue que las capas circumpolares tienen una velocidad de rotación menor que las tropicales, por ser menor su distancia al eje; las capas de aire que se dirigen de la región polar al ecuador, tienen una velocidad de rotación menor que la superficie terrestre situada en paralelos algo distantes del polo. Cuanto más se acerca este viento boreal al paralelo de 30º, tanto mayor es la velocidad de rotación que tiende a empujarlo del Occidente al Oriente; pero, conservando su fuerza con que sopla del Norte al Sur, toma la dirección resultante intermedia soplando del Nord-Este hacia el Sud-Oeste. En el hemisferio austral, por la misma causa, los alisios soplan del Sud-Este al Nord-Oeste. (Comparación: las aguas de un río que va del Norte al Sur, se desvían y corren como si viniesen del Nord-Este al recibir el empuje de un afluente que va del Oeste al Este.) Pormenores sobre los alisios y la región de las calmas pertenecen a la Geografía Física.

III. El hecho que sigue, sirve de comprobación sin ser una prueba decisiva: los grandes ríos que siguen la dirección de un meridiano, tienen mayor profundidad en la costa oriental que en la occidental, ya que las aguas, a causa de su movilidad, son lanzadas en esta dirección por la rotación.

Mencionamos aquí la nueva prueba de la rotación publicada por el P. Juan Hagen, director del observatorio Vaticano en Roma, y aprobada por varias Academias: la prueba no es experimental sino mecánica, y no corresponde a un texto elemental.

IV. Experimento sobre el plano de oscilación del péndulo. Esta prueba de la rotación es la más decisiva, aunque bastante difícil. Daremos la argumentación compendiada, agregando algunas notas explicativas que deben estudiarse.

1º *Existe la rotación.* Según la primera ley del péndulo, el plano de oscilación permanece invariable, y en el caso de trasladarse el plano de suspensión, paralelo a la dirección primitiva (véase Nota 1); pero *muchos experimentos* han manifestado que el plano de oscilación *parece* apartarse más y más del meridiano, aumentando su azimut, y que el valor de este desvío angular varía con la latitud, siendo igual al producto de $15^{\circ} \times \sin \phi$ por hora en cualquier punto terrestre, según lo ha demostrado Foucault en su célebre teorema (véase Nota 2).

Síguese, pues, que en realidad no gira el plano de oscilación, sino más bien el plano de suspensión y por lo mismo la tierra con la cual está unido.

2º *La rotación se efectúa de Oeste a Este.* En los experimentos se observa, además, que el plano de oscilación *parece* desviarse del Este al Oeste; mas, por ser este plano invariable, debe admitirse que el plano de suspensión, y por lo mismo la tierra, gira de Oeste a Este; tiene, pues, movimiento directo.

La siguiente comparación puede servir para mejor inteligencia de lo dicho. Supongamos un péndulo suspendido en el coche de un tren que va del Sur al Norte, y un observador mirando sus oscilaciones en esta dirección. Al describir el tren una curva hacia el Este, el plano de oscilación parece desviarse al Oeste (izquierda del observador); al seguir el tren la dirección del Oeste al Este, el péndulo oscilará de un costado del coche al otro, pero en realidad paralelo al plano primitivo.

El Experimento de Foucault se efectuó en 1851 en París: el hilo metálico tenía 62 metros de largo, con el fin de obtener oscilaciones lentas de 8 segundos; la bala de cobre pesaba 28 kg para acercarse al péndulo simple; para dar principio a las oscilaciones, se ató el péndulo en la pared, quemando el hilo con rapidez.

El desvío horario era de $11^{\circ} 17'$ y la vuelta entera se realizó en 32 horas.

Nota 1. Demuéstrase en Física que un péndulo al oscilar no se aparta de su plano de oscilación a no ser que intervenga una fuerza extraña que lo obligara a cambiar la dirección seguida en el primer momento. Si con la debida precaución suspendemos un péndulo (empleando un hilo sin torsión) encima de un disco graduado en 360° y damos vuelta al disco, el péndulo recorre en apariencia todos los grados del limbo; pero si en el plano de oscilación fijamos dos varillas de referencia, independientes del aparato, observamos que el péndulo guarda la misma dirección invariable y que al girar el disco, los grados desfilan sucesivamente por debajo del plano de oscilación (fig. 70). Este hecho proporciona un medio para demostrar de un modo experimental la rotación de la tierra. A este efecto suponemos primero la existencia de la rotación del Oeste al Este recorriendo un punto de una latitud cualquiera 15° por hora, y examinamos el fenómeno que debe en esta suposición ofrecer un péndulo que oscila en algún punto de la superficie terrestre.

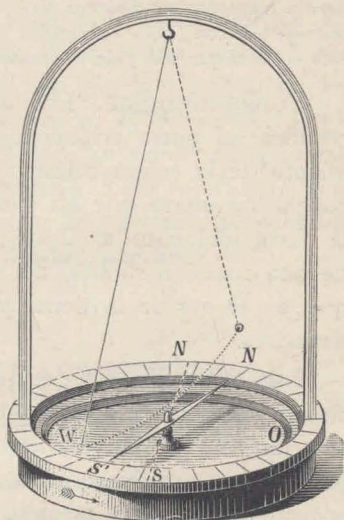


Fig. 70. Oscilación del péndulo en su plano.

Nota 2. Imaginémosnos un péndulo en oscilación y suspendido encima del polo boreal (fig. 71) en la prolongación del eje terrestre, que es también la vertical en este punto. ¿Qué sucederá en tal suposición? Un observador, colocado a alguna distancia del péndulo sobre uno de los paralelos mínimos, gira en realidad alrededor del plano de oscilación invariable; pero no dándose cuenta de la rotación, le parece que el mismo péndulo recorre 15° por hora con respecto al limbo en que se mide su azimut, y en dirección del Este hacia el Oeste (de la izquierda a la derecha).

En el polo Sur el fenómeno sería idéntico, pero de contraria dirección. En un punto del ecuador el plano de oscilación guardará con referencia al observador su dirección primitiva sin alteración, porque el observador está siempre en la misma posición con respecto al péndulo oscilante: el desvío será nulo.

Para los puntos intermedios entre el ecuador y el polo, la explicación se vuelve bastante complicada; pero se comprende que debe obtenerse una desviación intermedia entre 0° y 15° por hora sideral. Para una latitud dada puede calcularse este ángulo

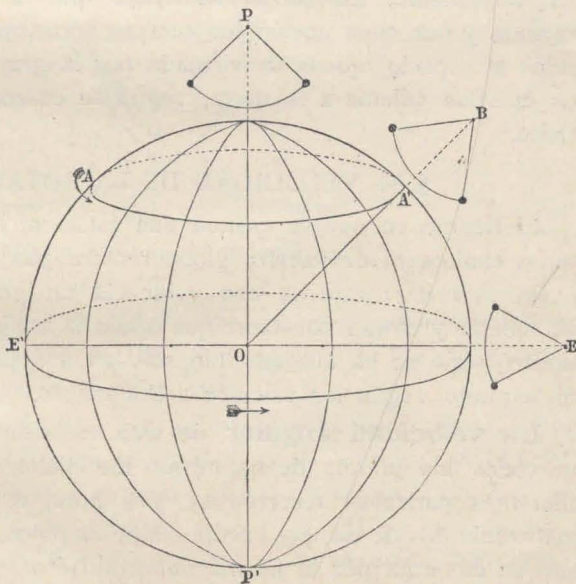


Fig. 71. Experimento del péndulo.

horario multiplicando 15 grados por el seno de la latitud del punto de observación. *Es así que el fenómeno sucedió en esta forma* al hacer Foucault su célebre experimento en 1851; luego existe la rotación de la tierra, tanto más cuanto que numerosos experimentos realizados en ciudades de diferente latitud han dado resultados conformes a los cálculos teóricos. (Debe observarse, sin embargo, que en los cálculos se prescinde del roce en la suspensión y de la resistencia del aire.)

Consecuencias. Los argumentos explicados nos obligan a rectificar el juicio erróneo que nos formamos con respecto al movimiento de la esfera celeste: debemos, por lo tanto, admitir como conclusión cierta que no son los astros los que giran en torno de la tierra (del Este al Oeste), sino que nuestro globo está dotado de una rotación rápida, del Oeste al Este, en torno de una recta que es el eje de la tierra y contiene los centros de los paralelos terrestres."

Las dificultades que pueden ofrecerse, encuentran la solución en las observaciones siguientes: El hecho de ser imperceptible esta rotación, no es tan extraño, puesto que nos faltan puntos de referencia que sucesivamente aparecen para desaparecer luego; además, en este movimiento no hay ni sacudidas ni ruidos característicos, como sucede en los trenes y vapores, ni hay roce con el aire, ya que la misma atmósfera que está unida al globo sólido por la gravedad, toma parte en la rotación. Sabemos por experiencia que las circunstancias mencionadas nos ayudan para conocer la realidad del movimiento. *La fuerza centrífuga* que se desarrolla en toda rotación y por cuya acción los cuerpos terrestres deberían ser lanzados al espacio, queda desvirtuada por la gravedad que mantiene los cuerpos sujetos a la tierra, según se enseña en los textos de Física.

§ 84. VELOCIDAD DE LA ROTACIÓN.

El tiempo en que se ejecuta una rotación, esto es, en que un punto cualquiera de nuestro globo recorre 360° , se llama *día verdadero terrestre*: éste es con evidencia de igual duración que el día sideral y es tan constante que desde la antigüedad griega hasta nuestro siglo se ha alterado tan sólo en una pequeña fracción de un segundo, según los cálculos astronómicos.

La velocidad angular de esta rotación es uniforme, esto es, todos los puntos de un mismo meridiano, y por lo tanto de diferentes paralelos, recorren 15° por hora, o un grado en cada cuatro minutos de tiempo, exceptuando los polos, que son inmóviles: esto se confirma por la misma uniformidad del movimiento general diurno.

La **velocidad lineal** de los puntos que pertenecen a un mismo paralelo, es también uniforme, recorriendo cada uno el mismo número de metros por segundo; pero los puntos de los paralelos de *diferente latitud* tienen diferente velocidad lineal, porque en igualdad de tiempo deben recorrer arcos de diferente longitud métrica, aunque tengan igual graduación, ya que la longitud de los paralelos decrece desde el ecuador a los polos. *Ejemplo:* Un punto del ecuador recorre 1670 *km por hora*; pero un punto del paralelo de 60° tan sólo 835 *km* en el mismo tiempo. Esta velocidad lineal se calcula dividiendo la longitud métrica de la circunferencia del paralelo por 24: el resultado es la velocidad por hora.

CAPÍTULO SEXTO.

MOVIMIENTO DE TRASLACION.

§ 85. POSIBILIDAD DE ESTE MOVIMIENTO.

En el capítulo 2 del libro III hemos estudiado los dos sistemas principales acerca del movimiento anual del sol. Examinemos en el

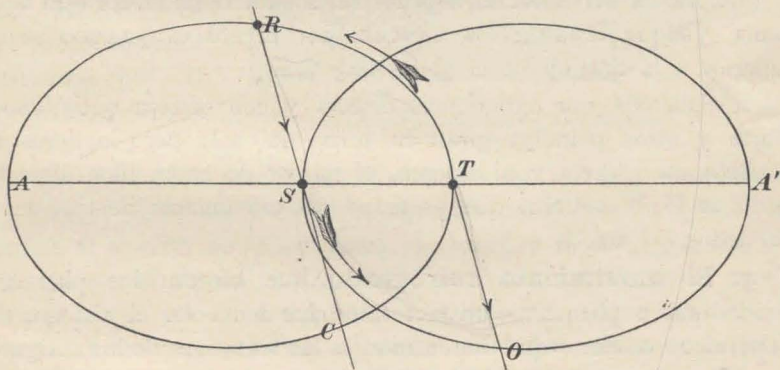


Fig. 72. Movimiento de traslación.

presente párrafo la posibilidad de dar una explicación satisfactoria del movimiento aparente del sol en cualquiera de los dos sistemas, tanto de Tolomeo como de Copérnico.

Ya hemos comprobado que la órbita solar es elíptica: suponemos, pues, que la tierra se traslada en el sentido *CR* (fig. 72); al hallarse en el punto *R* veríamos el sol en la dirección *RC* proyectado sobre la esfera celeste; pero si el sol se moviese en el sentido *SO*, estando la tierra inmóvil en el punto *T*, se vería el sol proyectado en la dirección *TO* al encontrarse el astro en el

punto O . Suponiendo que son iguales los tiempos en que se recorre TR y SO , se tiene que las áreas RST y STO son iguales; luego las dos rectas RS y TO son paralelas y a causa de la gran distancia coinciden sensiblemente y por lo tanto el efecto de las visuales es el mismo en los dos sistemas. En cuanto a los diámetros aparentes y las distancias del sol es evidente que sus variaciones son idénticas en las dos hipótesis; finalmente la desigual duración del día y de la noche, lo mismo que el cambio de las cuatro estaciones, recibió una explicación exacta por el mismo Copérnico.

§ 86. LA TIERRA TIENE UN MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN EN TORNO DEL SOL.

Veamos en primer lugar algunas pruebas racionales en favor de nuestra tesis; aunque no son decisivas, manifiestan en su conjunto suma probabilidad en favor del sistema de Copérnico.

1. Siendo la masa del sol unas 324 000 veces mayor que la de la tierra, parece absurdo que ésta sea el centro de atracción con respecto a una masa tan enorme, obligando al sol y a los planetas a girar en su derredor: el sistema heliocéntrico no ofrece esta anomalía, ya que la atracción ejercida por el sol es 324 000 veces superior a la que ejerce el globo terrestre.

2. Sabemos por experiencia directa y con certeza que Venus, Marte y otros planetas giran en torno del sol; pero la tierra es también un planeta y ni siquiera el mayor de entre ellos: por lo tanto es lógico admitir que participa del movimiento de traslación alrededor del sol.

3. **El movimiento retrógrado** que ofrecen los planetas, recibe una explicación satisfactoria únicamente en el sistema de Copérnico: sabemos que fueron inútiles las tentativas de los antiguos para dar una explicación admisible de este fenómeno.

4. **Existencia de la paralaje anual.** Vamos a proponer esta prueba experimental que es muy concluyente y sirve al mismo tiempo para resolver la dificultad propuesta por Tycho Brahe contra el sistema de Copérnico. El argumento se puede proponer en forma de silogismo del modo siguiente: Si la tierra careciese del movimiento de traslación, ninguna estrella *fija* podría ofrecer una paralaje anual, porque la determinación de ésta supone que la tierra ocupe dos posiciones distintas y diametralmente opuestas en la órbita: es así que se ha determinado con precisión la paralaje de bastantes estrellas fijas; luego existe el movimiento de traslación de la tierra

alrededor del sol. El valor de estas paralajes es muy pequeño; no excede un segundo de arco para la estrella más vecina a la tierra.

5. **La aberración de la luz** es indudablemente un argumento sólido en favor del sistema de Copérnico: mas, por ser este fenómeno algo difícil, daremos de ello una explicación amplificada en el párrafo siguiente.

§ 87. LA ABERRACIÓN DE LA LUZ.

1. **Ángulo de aberración.** Para facilitar la explicación, pongamos primero un caso que ofrece alguna analogía con nuestro asunto. Sea AB (fig. 73) un barco que lleva la dirección al Este, perpendicular a la meridiana; a cierta distancia de la orilla se halla un cañón C .

Estando inmóvil el barco, frente al cañón, una bala lanzada por éste perfora las dos paredes, en M y D , y un observador mirando por D vería el cañón en su sitio verdadero,

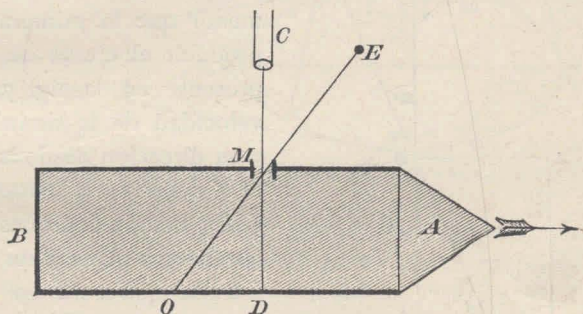


Fig. 73. Ángulo de aberración.

en dirección de la meridiana. Si el barco está en movimiento hacia el Este, la bala no perfora la segunda pared en D , sino en un punto O situado un poco hacia el Oeste, y la distancia OD , lo mismo que el ángulo $OMD = \angle CME$ será tanto mayor, cuanto mayor sea la velocidad del barco con respecto a la de la bala. A un observador que está en el buque sin darse cuenta de su movimiento, y que examina la posición de las dos aberturas M y O , le parecería que el tiro hubiese venido, no en la dirección de la meridiana MD , sino más bien desde un punto E , situado al Este del cañón C ; finalmente, para recibir en un tubo esa bala que en realidad lleva la dirección de la meridiana, no debemos dar al tubo la dirección DM , sino apartarlo hacia el Oeste, en la dirección OE . El desvío, que se mide por la magnitud del ángulo CME , se llama **ángulo de aberración**.

2. Apliquemos este ejemplo a los rayos luminosos que nos vienen de las estrellas, con respecto a la **aberración anual**, producida por la traslación de la tierra, ya que la aberración *diurna*, debida

a la rotación, es insignificante. El fenómeno de nuestro ejemplo sucede también en el barco inmenso que es la tierra, y con los telescopios, esos tubos en que recibimos los rayos de luz emitidos por las estrellas, habitualmente no vemos la luz en dirección al punto de la verdadera posición que ocupa la estrella, sino que se aparta de ella, formando el rayo un pequeño ángulo con la verdadera dirección; de esta manera vemos la estrella *hacia adelante, en el sentido de la traslación del globo terrestre*. Este fenómeno, que se llama *aberración de la luz*, es por lo tanto efecto de la

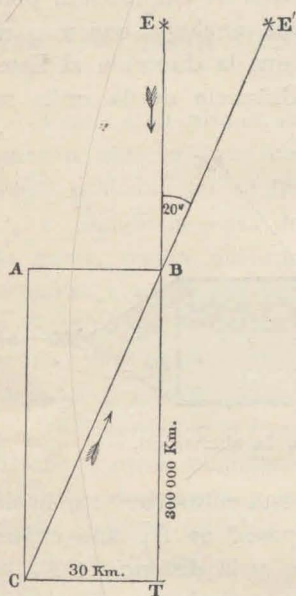


Fig. 74.
Aberración de la luz.

composición de los movimientos: la luz recorre unos 300 000 *km* por segundo, y la tierra 30 *km* por segundo en su órbita; aunque esta velocidad sea 10 000 veces menor que la primera, es suficiente para producir el efecto de la aberración. Represente en la fig. 74 la recta *CT* la velocidad de la tierra y *BT* la de la luz y su dirección desde la estrella *E* (la recta *BT* debería ser 10 000 veces mayor que *CT*); componiendo estas dos velocidades obtenemos que *CB* es la resultante, y la estrella aparecerá en *E'*. El ángulo de aberración *EBE'* vale 20 segundos de arco. Se comprende que el observador verá la estrella un poco antes del momento en que la vería si no hubiese aberración.

3. **Prueba de la traslación.** El astrónomo inglés *James Bradley* demostró en 1728 que el período en que una estrella sufre los cambios aparentes men-

cionados, coincide exactamente con el tiempo en que la tierra ejecuta una revolución en torno del sol; además comprobó que en virtud del movimiento elíptico de la tierra y por la aberración resultante, la estrella cambia su posición sin cesar; de tal manera que el observador recibe la impresión como si la estrella, y no la tierra, describiese una órbita elíptica en la esfera celeste. Si la tierra estuviese inmóvil, deberíamos ver la estrella también inmóvil en el centro de la elipse.

[En la fig. 75 se representa por la elipse inferior la órbita terrestre (el círculo de aberración tiene una magnitud exagerada, a fin de evitar confusión de letras).

Sea E la estrella γ del Dragón, situada cerca del polo de la eclíptica: a causa del ángulo de aberración el punto E se proyecta desde A en a' , desde C en c' , etc., variando su posición según la *tangente* a la órbita terrestre. La estrella E parece describir en un año una elipse casi circular, que reproduce la trayectoria terrestre: tal fenómeno sería imposible, si la tierra estuviese inmóvil, ocupando el foco de la elipse.

Para estrellas que no están cerca del polo de la eclíptica, la elipse es tanto más achatada, cuanto más vecinas estén al plano de la eclíptica (cuanto menor sea su latitud astral), por ejemplo, la posición K ; encontrándose la estrella en el plano de la eclíptica, posición P , el movimiento aparente es rectilíneo.

En todos los casos el eje mayor de la elipse de aberración vale $40''$ y es paralelo al plano de la eclíptica.]

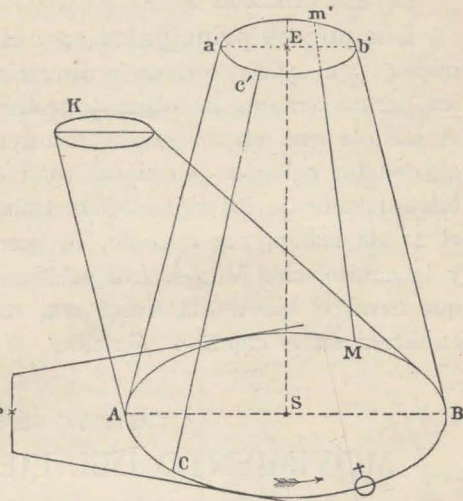


Fig. 75. Elipses de aberración.

§ 88. LA ÓRBITA TERRESTRE: SUS ELEMENTOS Y PUNTOS PRINCIPALES.

La traslación curvilínea de nuestro globo es el efecto de dos poderosas componentes: una es la atracción del globo solar y otra es la fuerza tangencial comunicada a la masa terráquea en el primer instante de su existencia: en virtud de la resultante de estas dos fuerzas el centro de la tierra describe una *elipse*, ocupando el sol uno de los focos.

El **radio** de esta órbita es la distancia al sol.

La **longitud** métrica de esta trayectoria es de 936 000 000 de kilómetros. Un cálculo fácil dará la **velocidad** de traslación con que la tierra recorre su órbita: por día recorre 2 562 000 *km* y en cada segundo avanza 29 700 *m*, siendo así que en virtud de la *rotación* cada punto del ecuador recorre 464 *m* por segundo, número que es unas 62 veces menor que el precedente. Si un vehículo

tuviese la velocidad que tiene la tierra en su traslación, podría en 20 minutos dar la vuelta al globo terrestre.

La excentricidad es $\frac{1}{60}$.

Los puntos principales son: el *perihelio*, que es la distancia menor, y el *afelio*, que es la distancia mayor; los equinoccios son los puntos en que la órbita terrestre corta el plano del ecuador. A medida que el sol *parece* recorrer los signos del zodiaco, un observador colocado en el sol vería cómo la tierra desfila en realidad delante de los signos diametralmente opuestos (véase fig. 32); el 21 de marzo, por ejemplo, la tierra está en Libra (entre el sol y la constelación Virgo). Los solsticios son efecto de la inclinación que tiene el eje de la tierra con respecto a la órbita, como se explicará en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO SÉPTIMO.

MOVIMIENTO DEL EJE DE LA TIERRA.

§ 89. PRECESIÓN DE LOS EQUINOCCIOS.

El fenómeno que designamos con este nombre, consiste en los hechos siguientes. Comparando catálogos astronómicos de épocas pasadas, por ejemplo de 1750, 1800 y 1850, con los modernos, se halla que las ascensiones rectas y las declinaciones de las estrellas varían lentamente sin modificarse sus distancias angulares. Adoptando coordenadas eclípticas y transformando la ascensión recta en longitud y la declinación en latitud astral, y comparando varios catálogos, se obtienen los dos resultados siguientes:

1. que las longitudes han ido aumentando, permaneciendo constantes las latitudes astrales;

2. que el aumento en longitud es el mismo para todas las estrellas y equivale a unos 50'' de arco al año para el ecuador. .

Este notable fenómeno fué descubierto por Hiparco en 125 antes de nuestra era y confirmado por Tolomeo, equivocándose los dos, por falta de instrumentos exactos, en el valor numérico. De este hecho se deduce que el punto vernal, que es el equinoccio de primavera, *retrograda* 50'' por año sobre la esfera celeste, en dirección del Este hacia el Oeste, porque este punto es el origen de la longitud astral: el fenómeno se denomina por esto la retrogradación de los puntos equinociales. Pasemos ahora a la explicación del hecho mencionado en conformidad con la existencia de la rotación que ejecuta la tierra en torno de su eje; por lo mismo hacemos caso

omiso de la explicación que se daría si la esfera celeste girase en torno del eje de la eclíptica.

Sabemos que la tierra es prominente en la región de la zona tórrida: en virtud, pues, de la mayor atracción que ejercen el sol y la luna sobre esta zona, el eje de la tierra, y por consiguiente el eje del mundo PP' , que es su prolongación, describe una superficie cónica en torno del eje de la eclíptica QQ' (fig. 76), con movimiento uniforme y en sentido retrógrado; la base de esta superficie es el círculo RP , indicando la flecha el sentido retrógrado. Se comprende que de esta manera el ecuador debe cambiar de posición, quedando la línea de los equinoccios siempre perpendicular al plano de los dos ejes PP' y QQ' : resulta, pues, que el punto vernal ocupará sucesivamente las posiciones Υ , Υ' , Υ'' , etc., y la longitud de una estrella m contada desde el punto vernal irá aumentando, ΥB , $\Upsilon' B$, $\Upsilon'' B$, quedando su latitud $m B$ invariable. El punto P describe un círculo completo en 26000 años.

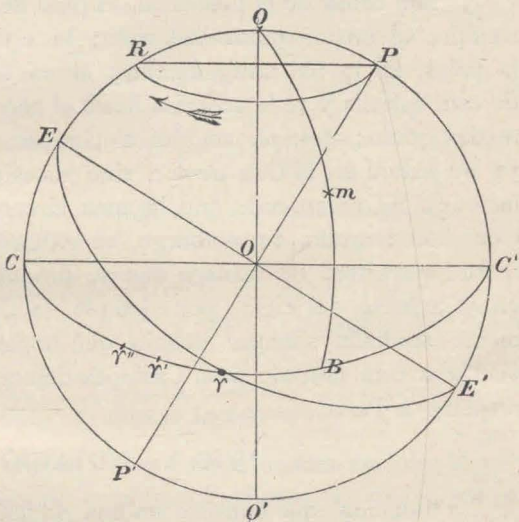


Fig. 76. Precesión de los equinoccios.

Nota. Hemos dicho que el valor anual de la precesión es de $50''$ o sea de $20^m 19^s$ en tiempo de traslación aparente del sol; pero debe notarse que este valor es para la región ecuatorial y que es diferente hacia los polos; por ejemplo, para la estrella σ del Octante es $+98$ segundos de tiempo, y para B del mismo es $+60$ segundos. Estos valores de la precesión anual se publican en las efemérides de París.

Consecuencias. El fenómeno de la precesión de los equinoccios lleva consigo varias consecuencias importantes, que vamos a indicar.

1. Por retrogradar el punto vernal resulta una diferencia entre el año trópico y el año sideral, de suerte que aquél se hace más corto que éste. Supongamos, para mejor inteligencia, que el sol pase en *este* momento por el punto vernal y que una estrella *fija* señale su posición actual. Después de un año el punto vernal no se hallará delante de la misma estrella sino algo distante en sentido retrógrado, y el sol, en su revolución aparente, vuelve a este

punto *antes de encontrarse con la estrella*: el equinoccio se realizará antes de haber concluido el sol una revolución completa en la eclíptica, lo cual motivó el nombre de precesión de los equinoccios, con que se designa la retrogradación del punto vernal: como el punto vernal camina al encuentro del sol, resulta que el año trópico es más corto que el sideral, lo que más detenidamente veremos en el capítulo 5 del libro V.

2. Resulta también que los signos del zodiaco no corresponden siempre a las mismas constelaciones ni siquiera al mismo punto de una constelación.

3. Por causa de la precesión, el polo del ecuador no corresponde siempre al mismo punto del cielo: la estrella que actualmente es la polar, no lo fué antiguamente; ahora el polo Norte dista $1^{\circ} 8'$ de esta estrella y se le acercará hasta el año 2095, distando entonces medio grado; después seguirá alejándose, de manera que el polo ya no estará en la Osa menor, sino sucesivamente en otras constelaciones. Se comprende que la zona circumpolar cambiará su posición, conservando, sin embargo, su extensión con respecto a cada latitud terrestre; de manera que se producirá también un cambio en el aspecto del cielo; por ejemplo, la Cruz del Sur, que actualmente se halla siempre debajo del horizonte de París, se hará visible a esta latitud; pero Casiopea dejará de ser circumpolar con respecto a París.

*§ 90. LA NUTACIÓN.

La nutación, que consiste en una oscilación del eje terrestre, fué descubierta por Bradley hacia el año 1740. Al decir en el párrafo precedente que el polo P describe un círculo en 26000 años, nos referimos a la posición *media* de este polo. El polo verdadero del ecuador oscila en torno de su posición *media* y describe, de izquierda a derecha, en 18 años y 8 meses una pequeña elipse, cuyo eje mayor de $19''$ se dirige hacia el polo de la eclíptica. Esta oscilación causa a su vez oscilaciones en la oblicuidad del ecuador con respecto a la eclíptica, lo mismo que en la posición del punto vernal: se llama oblicuidad *media* la que se verificaría sin la nutación; oblicuidad *aparente*, la que se verifica en realidad. Según Eratóstenes, en 250 a. d. J. C. la oblicuidad era de $23^{\circ} 46'$, y hacia el año 1000 de nuestra era fué de $23^{\circ} 34'$ conforme a los datos de un astrónomo árabe: ahora es de $23^{\circ} 27'$; pero después de algunos siglos volverá a crecer, de suerte que el ecuador nunca coincidirá con la eclíptica.

La siguiente explicación facilita la mejor inteligencia de los dos movimientos del eje terrestre (fig. 77), *suponiendo el sistema de Copérnico*. Sea

T un punto cualquiera de la órbita terrestre, TK una recta paralela al eje SQ de la eclíptica. El eje de rotación TP , inclinado $23^{\circ} 27'$ hacia TK , describe en 26 000 años un cono de revolución en sentido retrógrado; la línea de los equinoccios, que es siempre perpendicular al plano KTP , no permanece rigurosamente paralela a

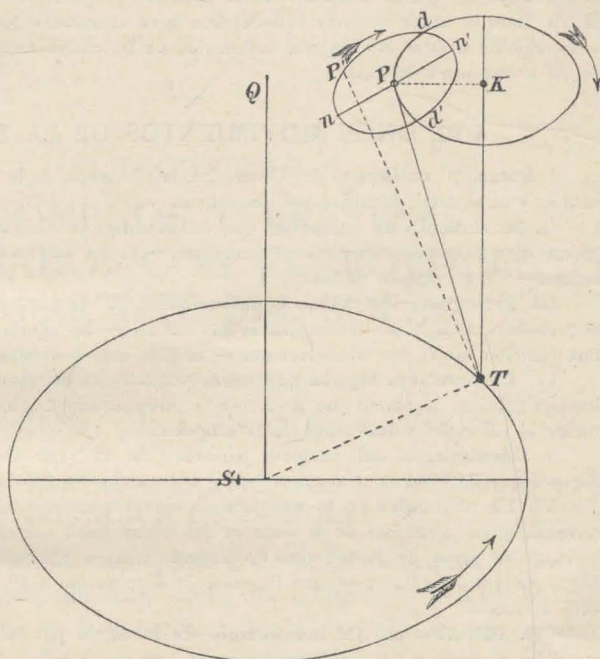


Fig. 77. La nutación.

sí misma, sino que gira con este plano en el mismo sentido y con la misma velocidad; el ángulo cambia $50''$ al año: es el fenómeno de la precesión. A este movimiento se sobrepone **la nutación**: acordémonos de que el polo P representa la posición media del polo del ecuador; el polo verdadero P' oscila alrededor de esta posición media y describe en sentido retrógrado una pequeña elipse $ndn'd'$ en 18 años y 8 meses. Con razón se compara el movimiento de la tierra al de *un trompo o peonza*: al girar éste sobre su eje, la punta traza una curva en el suelo. Observando el fenómeno con atención se nota que *el eje del trompo o peonza* tiene un movimiento cónico alrededor de la vertical (precesión); agregando un pequeño peso adicional en la parte más gruesa del trompo o peonza se obtiene la nutación.

§ 91. MOVIMIENTO DEL PERIHELIO.

Comparando las observaciones de Flamsteed, hechas en 1600, con las de Delambre, en 1800, se encontró que la longitud astral del perihelio había crecido $61''$ por año: por otra parte se sabe que el punto Aries, origen de las longitudes, retro-

grada $50''$ por año hacia el Oeste; resulta, pues, que el perihelio camina $11''$ de arco cada año, en sentido directo, del Oeste al Este, sobre la eclíptica, por lo mismo va al encuentro del punto Aries. Al volver la tierra al punto donde el perihelio estaba el año anterior, debe recorrer $11''$ de arco para alcanzarlo, gastando para ello unos 4 minutos de tiempo. *Resulta* que la duración de las cuatro estaciones no es constante, según se explicará después.

§ 92. ONCE MOVIMIENTOS DE LA TIERRA.

I. **Rotación uniforme**, del Oeste al Este. Su efecto es la sucesión de los días y noches y la rigurosa igualdad del día sideral.

II. **Movimiento de traslación**, que no es uniforme. Consecuencias: el año tiene 366,24 días siderales — las cuatro estaciones — el día solar es más largo que el día sideral — la aberración de luz.

III. **Retrogradación de los equinoccios en $50''$ por año**. Consecuencias: el año trópico dura 20 minutos menos que el año sideral — los signos del zodiaco no tienen una posición fija en las constelaciones — el polo celeste cambia de posición.

IV. **La nutación**. Síguese que sufren oscilaciones los valores de la precesión de los equinoccios, lo mismo que la diferencia entre el año trópico y el sideral, e igualmente el valor de la oblicuidad de la eclíptica.

V. **Movimiento del perigeo** (perihelio) de $11''$ por año, del Oeste al Este. Síguese que las estaciones adelantan $50 + 11$ segundos de arco al año.

VI. **La oblicuidad de la eclíptica** disminuye cada año $0,48''$, como si la órbita terrestre girase alrededor de la línea de los equinoccios, acercándose al ecuador; sin embargo el plano de la eclíptica no llegará jamás a coincidir con el del ecuador, según demostró Laplace; porque llegando la disminución a $1^{\circ} 21'$, la inclinación volverá a crecer.

VII. **Perturbación del movimiento de la tierra** por la atracción que ejercen todos los planetas sobre ella; esta atracción debe variar con la distancia, conforme que los astros estén en oposición o conjunción. Síguese que el movimiento de la tierra no puede ser perfectamente elíptico.

VIII. **La órbita de la tierra** se acerca de una manera poco sensible a la forma circular: resultará, pues, que la desigualdad entre las estaciones disminuye.

IX. **El sol tiene un movimiento de traslación**, según la opinión de los astrónomos; no está fijo en un punto, sino que atravesando los espacios cósmicos arrastra consigo a la tierra y los demás planetas, de suerte que nuestro globo nunca vuelve a pasar por el mismo punto ocupado el año precedente.

X. **Movimiento mensual** de la tierra alrededor del centro de gravedad del par de fuerzas formado por la tierra y la luna; este centro está 80 veces más cerca de la tierra que de la luna, porque ésta pesa 80 veces menos que aquélla.

XI. Mencionemos finalmente *el movimiento que*, según recientes investigaciones, *parecen tener los polos* de la tierra: el polo Norte no es un punto inmóvil en la costra exterior ni permanece en el mismo sitio, sino que tiene un cambio pequeño cuya amplitud es de unos 15 m; el efecto de esta oscilación irregular podría ser un pequeño cambio en las latitudes geográficas. Se atribuye la causa de este fenómeno al desplazamiento de las masas atmosféricas, a las corrientes marítimas, etc.

LIBRO QUINTO.

FENÓMENOS TERRESTRES RELACIONADOS CON EL MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL.

CAPÍTULO PRIMERO.

DURACIÓN DE LOS DÍAS CIVILES.

§ 93. DEMOSTRACIÓN GRÁFICA DE LA DESIGUAL DURACIÓN DE LOS DÍAS.

En virtud de la rotación aparente de la esfera celeste, el sol, al recorrer la eclíptica, describe cada día el paralelo celeste en que se halla; conforme a la magnitud de la declinación, el paralelo dista más o menos del ecuador y queda dividido por el horizonte del observador en dos arcos desiguales, exceptuando ciertos casos, que luego veremos.

Llámanse **día civil** el número de horas durante las cuales el sol está encima de nuestro horizonte: la parte del paralelo que describe el astro desde la salida hasta ponerse, se llama **arco diurno**. El tiempo que necesita el sol para recorrer lo restante del paralelo debajo del horizonte, se llama **noche** y el arco correspondiente del paralelo es el **arco nocturno**.

Daremos la explicación de este fenómeno con respecto a algunos puntos de la tierra, prescindiendo de la refracción atmosférica y del crepúsculo.

1. **El observador está en el ecuador:** en este caso su horizonte pasa por la línea de los polos y por lo mismo es perpendicular al ecuador en el centro. Basta inspeccionar la fig. 12 (esfera recta) para comprender que todos los paralelos que recorre el sol, son divididos por el horizonte en dos mitades: luego, los arcos diurnos son todos iguales a los nocturnos; por lo tanto, en todos los puntos situados sobre el ecuador, el día civil es de 12 horas durante todo el año.

En los paralelos vecinos al ecuador las diferencias en la duración de los días son poco marcadas, ya que su horizonte coincide casi con el del ecuador.

2. **Con respecto a los polos**, su horizonte coincide con el plano del ecuador: hay un día que dura seis meses. En efecto, refiriéndonos a la fig. 12 (esfera paralela), se observa con respecto al *polo boreal* que el 21 de marzo el sol describe un círculo máximo en el horizonte, quedando seis meses visible, a saber: tres para llegar al trópico de Cáncer, y tres para volver al ecuador. El 22 de septiembre el sol desaparece debajo del horizonte durante seis meses, quedando visible desde el polo austral.

Según Biot, la noche cerrada dura tan sólo 70 días, a causa de los crepúsculos. (Véase en el § 95 la duración de los días en las latitudes vecinas al polo.)

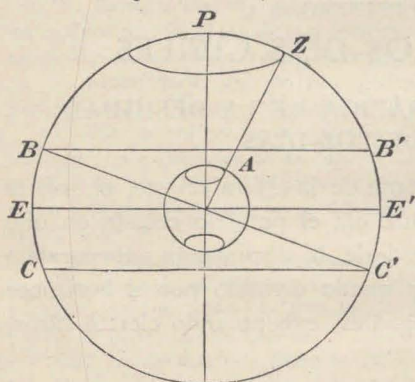


Fig. 78. El día en el círculo polar.

3. **El círculo polar boreal** tiene la latitud $\varphi = 66^{\circ} 33'$ (lo mismo que el austral): su cenit z dista $23^{\circ} 27'$ del polo. En la fig. 78 las rectas BB' , CC' , BC' son las trazas respectivas de los trópicos y de la eclíptica. El horizonte del círculo polar coincide con la eclíptica, que dista 90° del cenit.

$$\begin{aligned} ZP + PB &= 23^{\circ} + 67^{\circ} = 90^{\circ} \\ ZE' + E'C' &= 67^{\circ} + 23^{\circ} = 90^{\circ}. \end{aligned}$$

El horizonte, pues, pasa por los dos solsticios y coincide con la eclíptica. El 21 de junio el día dura 24 horas, porque el sol recorre el trópico BB' y queda encima del horizonte durante 24 horas.

En seguida los días se hacen más cortos. El 21 de diciembre la noche es de 24 horas, porque el sol recorre el trópico CC' , que está debajo del horizonte.

En el círculo polar austral el fenómeno sucede en sentido inverso.

4. Latitud 35° Sur (zona templada).

Nota. Debe el alumno formarse una idea clara de la explicación gráfica en la latitud dada: fácil le será entonces aplicarla a cualquier punto de la zona templada, esto es, situado entre uno de los trópicos y el círculo polar respectivo: para ello debe entender bien lo que representan las trazas de la figura; y que las partes de los paralelos corresponden a los arcos diurnos y nocturnos.

En la fig. 79 el círculo representa el meridiano del lugar; P' es el polo *Sur*, estando por suposición el polo Norte debajo del hori-

zonte. Las rectas son las *trazas* de los siguientes círculos; *HS* el horizonte, *EE'* el ecuador, *B'C* la eclíptica, *CC'* el trópico de Capricornio, *BB'* el trópico de Cáncer; *Z* es el cenit del lugar.

a) Principiamos la demostración considerando la posición del sol el 21 de junio, que es el solsticio de verano. En este día el sol describe el trópico de Cáncer *BB'*, que es dividido por el horizonte en dos partes desiguales: la traza del arco nocturno es notablemente mayor que la del arco diurno, porque la línea de los polos divide las trazas paralelas en partes iguales, luego $BK = B'K$, y por lo tanto $B'K + A'K > BA'$; tenemos, pues, el día más corto y la noche dura unas 15 horas, ya que el arco nocturno forma las dos terceras partes del paralelo.

b) En agosto el sol estará en *m* sobre la eclíptica recorriendo aquel día el paralelo de unos 12° , declinación austral; se ve fácilmente que ahora la traza del arco diurno es mayor que BA' : los días crecen. El 21 de septiembre el sol está en Libra y recorre el ecuador: tenemos el equinoccio, y el día dura 12 horas. Como todos los horizontes quedan divididos por el ecuador en dos semicírculos iguales, exceptuando el horizonte del polo, se sigue que en el día de los equinoccios la noche es igual al día y dura 12 horas en todos los puntos de la superficie terrestre.

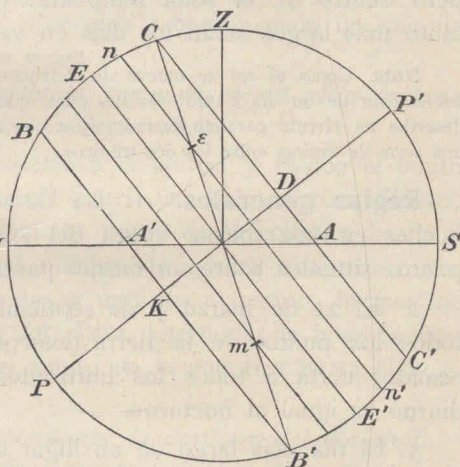


Fig. 79. Duración de los días.

c) Después del 21 de septiembre el sol está en el hemisferio austral, su declinación crece rápidamente y por lo mismo la duración de los días; a principios de noviembre, por ejemplo, describe el sol el paralelo $n'n$ y la traza del arco diurno es notablemente mayor que en el equinoccio.

d) Finalmente, el 21 de diciembre describe el sol el trópico de Capricornio *CC'* (que es su traza) y la duración del día llega a su máximo, $CD + DA > AC'$; la traza *CA* del arco diurno es igual a $B'A'$, que es la traza del arco nocturno el 21 de junio: ahora es el día el que dura unas 15 horas.

Cerca de los solsticios varía en una cantidad mínima la declinación, de donde resulta que durante unos diez días la duración de los días y de las noches es sensiblemente invariable.

Ejercicios. 1. Aplique el alumno las consideraciones precedentes en sentido inverso para explicar cómo decrecen los días desde fines de diciembre hasta el 21 de junio.

2. Aplíquese la demostración a una latitud de 35° del hemisferio *boreal*: basta cambiar las letras de los dos trópicos y poner el polo sur debajo del horizonte.

3. Hágase la explicación para otras latitudes mayores que 35° , pero dentro de la zona templada: cuanto mayor sea la latitud, tanto más largos serán los días en verano.

Nota. Como el sol se mueve sin detenerse sobre la eclíptica, debe variar su declinación de un día a otro; resulta, pues, que el sol en su movimiento diurno no describe un círculo paralelo cerrado, sino que más bien parece describir en un año una serie de espiras entre los dos trópicos.

Reglas generales. 1. La duración de los días y de las noches en una misma época del año es idéntica para todos los puntos situados sobre un mismo paralelo.

2. El 21 de marzo y de septiembre el día dura 12 horas en todos los puntos de la tierra (exceptuando los polos), porque el ecuador corta a todos los horizontes en dos mitades y el arco diurno es igual al nocturno.

3. El día más largo de un lugar corresponde al solsticio de *su* verano, el día más corto al solsticio de *su* invierno.

Ejemplo. Para todos los puntos situados sobre el paralelo $33^{\circ} 26'$ (Santiago de Chile, Sidney, etc.) el 21 de diciembre el sol sale a las $4^{\text{h}} 50^{\text{m}}$ y se pone a las $7^{\text{h}} 10^{\text{m}}$; pero el 21 de junio sale a las 7^{h} y se pone a las $4^{\text{h}} 58^{\text{m}}$.

Téngase presente que el mediodía civil no divide el arco diurno en dos mitades exactamente iguales.

4. A causa de la posición simétrica de los paralelos al Norte y Sur del ecuador, las noches de una mitad del año duran el mismo número de horas que los días *correspondientes* de la otra mitad.

Si el 21 de diciembre el día dura 14 horas, la noche dura lo mismo el 21 de junio, siendo $\phi = 33^{\circ}$.

5. La diferencia entre la duración del día y de la noche es tanto mayor, en un mismo día del año, cuanto más distante del ecuador esté el lugar.

6. En la época de los equinoccios los días crecen o decrecen respectivamente con mayor rapidez que en los solsticios, por variar la declinación del sol más rápidamente: así en 1903

Sept. 1° $D = + 8^0 33'$	Dic. 1° $D = - 21^0 42'$
» 21 $D = - 0^0 59'$	» 21 $D = - 23^0 27'$
Oct. 2 $D = - 3^0 17'$	» 31 $D = - 23^0 9'$

§ 94. PROBLEMA FUNDAMENTAL CON RELACIÓN AL DÍA CIVIL.

La hora de la salida y puesta del sol, lo mismo que la duración del día civil, se calcula con auxilio de una fórmula trigonométrica, que daremos en el apéndice. Ponemos a continuación un método empírico fácil, aunque no tan exacto.

Primer problema. *Determinar por medio de un globo la hora en que sale y se pone el sol en un lugar dado.*

Rectifico el globo con respecto a la latitud y coloco el punto de la eclíptica en que está el sol aquel día, bajo el **meridiano**; ahora, moviendo el globo, llevo el punto de la eclíptica hasta el horizonte *oriental*, contando el número de grados que pasan por el meridiano; reduzco los grados y minutos a tiempo, lo que me dará la hora de la salida del sol. Para determinar la hora en que se pone el sol, basta llevar el punto de la eclíptica hasta el horizonte occidental.

Segundo problema. *Determinar la duración del día civil.*

Rectifico el globo con respecto a la latitud dada y fijo la posición del sol en la eclíptica; este punto se pone frente al **horizonte oriental**; ahora se mueve el globo hasta que el punto mencionado esté frente al horizonte occidental. El número de grados que pasan en todo este movimiento por el meridiano, reducido a tiempo, da la duración del día civil; restándolo de 24 horas se obtiene la duración de la noche.

*§ 95. CLIMAS ASTRONÓMICOS.

Bajo el punto de vista astronómico el clima de un lugar consiste únicamente en variaciones anuales del día y de la noche con respecto a este punto terrestre; en otros términos más precisos, llámase clima astronómico la zona terrestre comprendida entre dos paralelos en donde el día más largo excede de una media hora al de la zona precedente, tomándose por origen el ecuador, donde el día más largo dura 12 horas, sin contar el crepúsculo. Desde el

ecuador hasta el círculo polar se cuentan 24 zonas, pero sus extensiones no son iguales entre sí, sino que van decreciendo para un mismo aumento de la duración del día. Damos en seguida algunos ejemplos de climas con referencia al aumento en horas enteras, y de algunos climas en meses; la primera columna indica la latitud y la segunda expresa la duración del día más largo.

0° (Ecuador) . . .	12 ^h	36° 28' . . .	14 ^h 30 ^m
8°	12 ^h 30 ^m	41°	15 ^h
16°	13 ^h	66°	24 ^h
30°	14 ^h		

Hay seis climas de meses:

Latitud 67° . . .	1 mes	Latitud 78° . . .	4 meses
» 69°	2 meses	» 84°	5 »
» 73°	3 »	Polos	6 »

Con auxilio de estos datos podemos avaluar con alguna aproximación la mayor duración del día en los puntos intermedios: en Madrid y Roma 15 horas; en Buenos Aires 14 horas 28 minutos; en Santiago de Chile 14 horas 18 minutos.

§ 96. CARÁCTER ASTRONÓMICO DE LAS ZONAS.

A semejanza de la esfera celeste se divide también la tierra en cinco zonas por medio de círculos menores y paralelos al ecuador, que son los dos trópicos y los dos círculos polares. Los puntos de los trópicos terrestres tienen su cenit en los trópicos celestes; distan, pues, 23° 27' del ecuador; uno es boreal y otro austral, y comprenden la zona tórrida. Los círculos polares terrestres tienen su cenit en los polares celestes, y su latitud es de 66° 33', una boreal y otra austral. El círculo boreal se llama ártico, el del Sur antártico; los dos casquetes esféricos limitados por ellos forman las zonas glaciales. Las dos zonas comprendidas respectivamente por los círculos polares y los trópicos se llaman zonas templadas. La denominación de las zonas se refiere a la distribución del calor; pero aquí tan sólo consideramos su carácter astronómico, tratando más tarde, en otro capítulo, de su carácter climatológico.

1. **Zona tórrida.** En la fig. 80 representa el círculo interior un meridiano terrestre, y el círculo exterior uno celeste. BB' es el trópico de Cáncer, P el polo Norte. Consideremos un punto cualquiera ϵ de la zona tórrida, a unos 15° de latitud boreal, y sea R su cenit; su horizonte, cuya traza es HK , corta todos los paralelos

descritos por el sol durante el año; luego sale y se pone el astro todos los días del año en esta zona. El cenit está comprendido entre los dos trópicos, y el sol pasa por el punto R a mediodía, al describir el paralelo celeste que corresponde al punto mencionado, lo que hace dos veces al año. En la zona tórrida el sol pasa dos veces al año por el cenit; pero en los demás días pasa por el meridiano ora al Norte del cenit, entre R y B' , ora al Sur, entre R y C' ; en esta zona la sombra, a mediodía, se dirige durante una época del año hacia el Sur, y durante otra hacia el Norte:

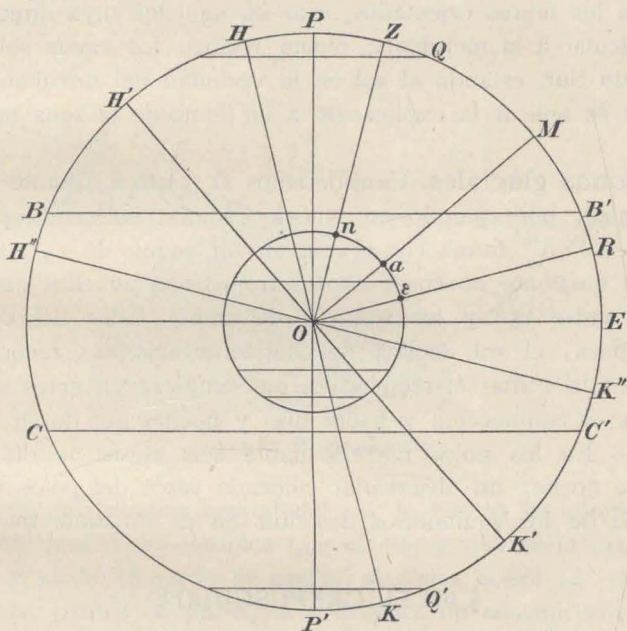


Fig. 80. Zonas.

por lo tanto a mediodía el sol puede dar al Norte o al Sur de los muros orientados.

Para un observador colocado sobre el ecuador, el sol pasa por el cenit el día de los equinoccios; la sombra meridiana se dirige al Sur desde el 21 de marzo hasta el 21 de septiembre, y en lo restante del año se dirige hacia el Norte.

2. Zonas templadas. Para concretar la explicación, consideremos un punto a de unos 34° de latitud Sur (Buenos Aires, Montevideo, Santiago de Chile, etc.), y, para aprovechar la misma fig. 80, suponemos en este caso y por excepción, que P representa el polo Sur. Los habitantes de ese lugar a tienen su cenit en M

que se halla a mayor distancia del ecuador que el solsticio B' ; la traza de su horizonte $H'K'$ corta todos los paralelos del sol, y por lo tanto sale y se pone el sol en esta zona todos los días del año; fácilmente se comprende que el sol no puede pasar por el cenit de ningún punto de las zonas templadas, ya que los trópicos son límite de los paralelos del sol: tampoco puede dar sobre las aguas de pozos profundos; los pasos del sol por el meridiano se efectúan siempre al Norte del cenit con respecto al hemisferio Sur, y la sombra meridiana se dirige siempre hacia el Sur. En cuanto a los muros orientados, esto es, aquellos cuya dirección es perpendicular a la meridiana, nunca reciben los rayos solares en el costado Sur, estando el sol en la vecindad del meridiano.

Fácil es aplicar la explicación a un punto de la zona templada boreal.

3. **Zonas glaciales.** Consideremos el punto n distante 15^0 del polo boreal, por ejemplo en Nueva Zembla: su cenit es Z ; su horizonte $H''K''$ forma con el ecuador un ángulo de 15^0 : se sigue que este horizonte no corta los dos trópicos ni aquellos que están situados entre 15^0 y los trópicos de ambos lados del ecuador: estará, pues, el sol encima del horizonte mientras recorre esos paralelos (sin contar el crepúsculo, que empieza ya antes de estar el sol en el equinoccio), y habrá días y noches que duren más de 24 horas. En los polos mismos habrá seis meses de día y seis meses de noche: un observador colocado cerca del polo, vería al sol el día de los equinoccios describir en el horizonte un círculo máximo.

§ 97. EL CREPÚSCULO¹.

Designamos con este nombre la claridad intermedia con que divisamos los objetos antes de salir o después de ponerse el sol. Decimos que este fenómeno es producido por la reflexión múltiple que experimentan los rayos solares en las capas superiores de la atmósfera terrestre, lo que vamos a explicar. En la fig. 81 sea A un punto de la superficie terrestre: al hallarse el sol en S' unos pocos grados debajo del horizonte, debería haber noche cerrada en los contornos de $AH'M$, porque ningún rayo directo puede llegar a este paraje; sin embargo, muchos rayos llegan todavía a las capas contenidas en MZA , donde se reflejan en las moléculas del aire y en partículas de cuerpos sólidos, pero débilmente, alum-

¹ La palabra es el diminutivo de la palabra latina *crepus*, oscuridad.

brando los objetos de la superficie con claridad intermedia, la que va creciendo por la mañana y apagándose poco a poco antes de principiar la noche. Sin la atmósfera la transición sería, pues, brusca; como sucede en la luna.

Crepúsculo astronómico y civil. Distínguense dos clases de crepúsculos, según la mayor o menor claridad que ofrece la atmósfera después de ponerse y antes de salir el sol.

Crepúsculo astronómico. El astrónomo árabe *Al Hazén*, en el año 1000 de nuestra era, determinó como condición del crepúsculo

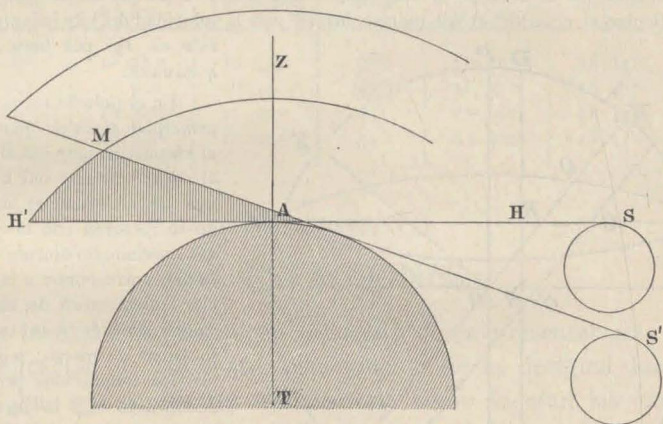


Fig. 81. El crepúsculo.

108° para la distancia cenital del sol, lo que se ha admitido hasta nuestros días. Esto significa que el crepúsculo de la mañana empieza, y el de la tarde se acaba, al distar el sol 18° debajo del horizonte. (Antes de principiar y después de concluir se distinguen las estrellas de sexta magnitud.) Este término de 18° no es riguroso, porque algunos astrónomos señalan solamente 15° .

El crepúsculo civil comienza y se acaba al estar el sol 6° bajo el horizonte y comprende los momentos en que podemos leer sin esfuerzo y al aire libre los impresos y en que las estrellas de primera magnitud son invisibles.

*§ 98. DURACIÓN DEL CREPÚSCULO.

Círculo crepuscular llámase el círculo que es paralelo al horizonte del lugar, distante de él 18° en dirección opuesta al cenit; en la fig. 82 DD' es su traza con respecto al horizonte PP' del ecuador, y RR' lo es con respecto a HH' . [La parte CK de la traza del paralelo MM' , que es interceptada entre las trazas del horizonte y del círculo crepuscular, es la representación gráfica de la duración con respecto a una latitud de 40° ; ON lo es con respecto al ecuador.]

En cuanto a la duración del crepúsculo astronómico debemos distinguir dos variaciones generales.

I. Regla general. El tiempo de la duración del crepúsculo en un día determinado cualquiera va aumentando desde el ecuador, donde es mínimo, hacia los polos, donde es máximo, como puede verse en la tabla de los crepúsculos que luego agregamos. [En la fig. 82 $CK = SO$; pero $SO > NO$, luego $CK > NO$.]

Estas diferencias tienen su causa en que cerca del ecuador los paralelos del sol son casi perpendiculares al horizonte; pero a medida que uno se aleja del ecuador, el paralelo descrito por el sol toma mayor oblicuidad con respecto al horizonte, y la parte de ese paralelo comprendida entre el horizonte y el círculo crepuscular aumenta, y por lo tanto crece la duración del crepúsculo.

Ejemplos. En el ecuador el crepúsculo dura $1^h 12^m$; porque siendo el horizonte perpendicular al ecuador, el sol recorre los 18° con la velocidad del movimiento diurno,

esto es, 15° por hora y 1° en 4 minutos.

En el polo Norte el día debe principiar el 21 de marzo; pero el crepúsculo empieza al hallarse el sol 18° distante del horizonte, que es el ecuador: estos 18° no se recorren con la velocidad del movimiento diurno, sino con la que corresponde a la declinación; una aurora de unas 5 semanas precede a la salida del sol el 21 de marzo; según Biot, los dos crepúsculos polares reducen a 70 días la duración de la noche cerrada.

En Leningrado, cuya latitud $\phi = 59^\circ 57'$, se puede leer al aire libre durante toda la noche, desde el 10 de junio hasta el 2 de julio.

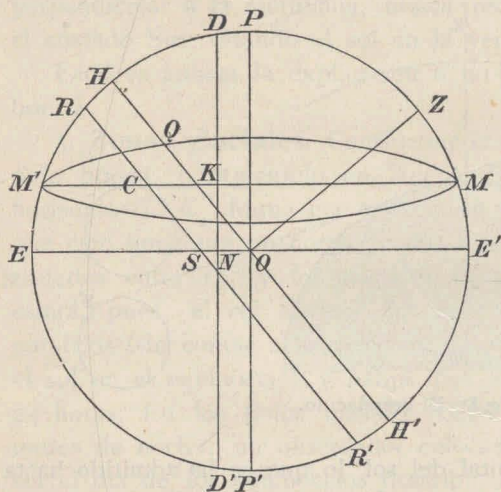


Fig. 82. Duración del crepúsculo.

El 21 de junio el crepúsculo de la tarde dura en París $2^h 40^m$, y otro tanto la aurora del 22 de junio: se juntan, pues, los dos crepúsculos y casi no hay noche cerrada.

[**Demostración.** Siendo la latitud de París $48^\circ 50'$, la una mitad del ecuador (fig. 82) dista debajo del horizonte $41^\circ 10' = HE$. El trópico MM' que el sol recorre en este día, está debajo del horizonte en la magnitud del arco $HM' = 41^\circ 10' - 23^\circ 27' = 17^\circ 43'$.

Como el círculo crepuscular dista 18° debajo del horizonte, se evidencia que desde el 21 de junio al 22 el sol permanece entre estos dos círculos, y el crepúsculo persevera durante la noche.

Aplicando el mismo raciocinio a la latitud de 60° Norte resulta que el ecuador dista 30° debajo del horizonte y por lo tanto el 21 de junio el trópico dista sólo $30^\circ - 23^\circ 27' = 6^\circ 33'$; el crepúsculo será, pues, mucho más largo que en París, como se ha indicado para Leningrado.]

II. Para un mismo punto tampoco es invariable esta duración; sobre el ecuador es mínima en los equinoccios, y máxima en los solsticios; en París el crepúsculo más largo es el 21 de junio y dura $2^h 40^m$, como ya hemos dicho; el más corto es de $1^h 40^m$, cuando el sol tiene 7° declinación austral. La causa de estas diferencias es

la siguiente: Aunque los arcos descritos por el sol tienen proyecciones iguales, sin embargo los arcos mismos ni son iguales ni tienen igual graduación. (En la fig. 82 la traza SO es igual a la traza CK ; pero CK^r corresponde a un arco del paralelo 23° y SO a un arco del ecuador de diferente longitud.) La tabla que sigue manifiesta esta diferencia para algunas latitudes.

Observación. El crepúsculo civil es evidentemente de menor duración que el astronómico, como se deduce de la definición: en el ecuador es de 21 minutos; en la latitud de 10° dura 27^m , a 35° dura 34^m , a 55° dura una hora próximamente.

Crepúsculos astronómicos.

Latitud	Solsticio de verano	Equinoccios	Latitud	Solsticio de verano	Equinoccio
0°	1 h 18 m	1 h 12 m	30°	1 h 42 m	1 h 24 m
10°	1 h 21 m	1 h 14 m	35°	1 h 52 m	1 h 28 m
20°	1 h 30 m	1 h 17 m	40°	2 h 8 m	1 h 35 m
25°	1 h 38 m	1 h 20 m	45°	2 h 30 m	1 h 43 m

CAPÍTULO SEGUNDO.

LAS ESTACIONES.

Para justificar Copérnico su hipótesis debía presentar ante todo una explicación de las cuatro estaciones y de la desigual duración de los días que fuese tan satisfactoria como lo eran las explicaciones dadas con respecto a la hipótesis de Tolomeo. Para la fácil inteligencia del fenómeno es indispensable que el alumno se forme una idea cabal de las nociones siguientes, que son la base de la explicación.

Sabemos con certeza que el eje de la tierra forma un ángulo de $66^\circ 33'$ con el plano de la órbita y que se mantiene en posición paralela a sí mismo en el movimiento de traslación durante el año, puesto que en este intervalo no se observa cambio alguno en los cuatro puntos cardinales. Además, en consideración a la gran distancia, los rayos solares son paralelos entre sí y con el radio de la órbita; finalmente en virtud de la forma esférica de nuestro globo una mitad de la tierra está en la sombra, mientras la otra mitad se halla iluminada.

Llamamos **círculo de iluminación** el círculo máximo que separa el hemisferio iluminado del hemisferio obscuro, y cuyo plano es perpendicular al radio vector que va del centro solar al centro de la tierra. Vamos ahora a manifestar cómo la oblicuidad del eje terrestre con respecto a la órbita y su posición paralela durante la traslación, es la causa verdadera de la desigualdad en la duración

de los días lo mismo que del cambio de las estaciones con respecto a la desigual repartición del calor en la superficie de nuestro globo. En la fig. 83 se representa la órbita de la tierra por la

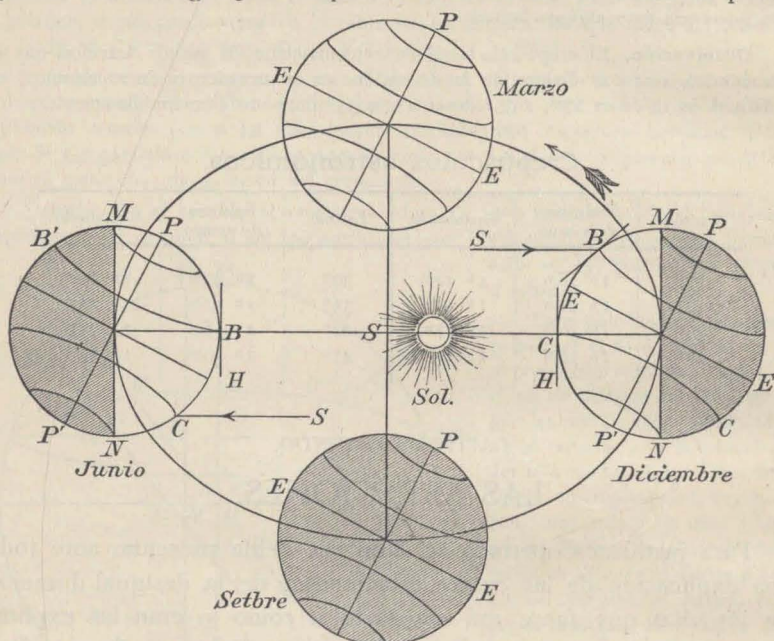


Fig. 83. Las estaciones.

elipse, los círculos respectivos son meridianos terrestres; PP' es el eje; MN es la traza del círculo de iluminación sobre el meridiano.

§ 99. DESIGUAL DURACIÓN DE LOS DÍAS.

En los equinoccios, en marzo y septiembre, el radio vector de la órbita coincide con el plano del ecuador y es perpendicular al eje terrestre; luego el círculo de iluminación pasa por los polos y coincide con un meridiano terrestre; siendo meridiano, es perpendicular al ecuador y a todos los paralelos, y como en virtud de la rotación diurna todos los puntos de la tierra describen paralelos, se sigue que el círculo de iluminación los divide en dos partes iguales, y por lo tanto el día es igual a la noche.

El 21 de marzo pasa el círculo por los polos, como se ha dicho: para el polo boreal empieza el día de seis meses, y para el austral, la noche de seis meses; pero desde este día el círculo de iluminación se aparta del polo Norte, que siempre queda iluminado, hacién-

dose cada día mayor la porción iluminada de la zona glacial. En el solsticio de verano el círculo de iluminación dista $23^{\circ} 27'$ del polo, y el ecuador forma el mismo ángulo con el radio vector, y resulta que este radio está en el plano del trópico de Cáncer BB' : en los puntos del círculo polar boreal dura el día 24 horas, y en el austral, hay noche de igual duración. El círculo MN divide los paralelos en partes desiguales: en el hemisferio Norte los arcos diurnos son mayores que los nocturnos, sucediendo lo contrario en el hemisferio Sur. Fácil es aplicar la explicación dada al solsticio de invierno.

§ 100. TEMPERATURA PROPIA DE LAS ESTACIONES.

1. Para explicar las variaciones que presentan los efectos caloríficos en estas épocas del año que llamamos estaciones, debemos recordar la ley de Física sobre la intensidad del calor: tanto mayor será la calefacción producida cuanto menor sea la oblicuidad de los rayos caloríficos con respecto a la superficie que los recibe. Tomemos por punto de partida de la explicación el solsticio de diciembre (fig. 83). En este día un punto cualquiera C del trópico austral recibe los rayos solares SC en sentido perpendicular al horizonte HC (por ser la declinación del sol $23^{\circ} 27'$), pero los puntos de los paralelos del hemisferio Norte reciben los rayos más oblicuamente que los del hemisferio Sur, siendo casi tangentes en la vecindad de la zona glacial: por lo tanto hay principio de invierno en el Norte, y de verano en el hemisferio austral.

2. La tierra se traslada hacia el punto vernal (21 de marzo) conservando el eje su posición paralela: de día en día los rayos solares serán perpendiculares con respecto al horizonte de un paralelo de menor latitud Sur, y el 21 de marzo lo serán con respecto al ecuador, de suerte que en este día la oblicuidad de los rayos solares se reparte en conformidad a la simetría: tenemos principio de otoño en el hemisferio Sur por aumentar cada día más la oblicuidad de los rayos desde esta fecha y menguar la duración de los días; en el hemisferio boreal principia la primavera.

3. En abril y mayo los rayos se reciben en sentido perpendicular en los diferentes paralelos de la zona tórrida boreal, y el 21 de junio serán perpendiculares al horizonte HB , que corresponde al trópico de Cáncer BB' : principia el verano en la zona templada boreal y el invierno en el Sur, porque en esta época los rayos solares son más oblicuos con respecto al hemisferio austral.

Por lo que precede se comprende por qué los meses de diciembre, enero y febrero son los más fríos en la zona templada boreal y los más calientes en la zona templada austral: basta recordar que el calor recibido es tanto más intenso, cuanto menor sea la oblicuidad de los rayos con respecto a la superficie receptora.

En la explicación de los fenómenos que precede, debe sin embargo agregarse otra causa de la diferencia de temperatura, la que es de igual importancia, a saber, la duración de los días y de las noches. Durante los tres meses mencionados las noches son cortas en el hemisferio Sur y los días son largos (a 60° de latitud la claridad dura 18 horas), mientras que en el hemisferio Norte sucede lo contrario; pero es evidente que la cantidad de calor recibido es proporcional al tiempo que dura la calefacción. Tenemos, pues, que dos son las causas principales del cambio de temperatura que ofrecen las estaciones: la mayor o menor oblicuidad de los rayos solares durante la época respectiva y la diferencia en la duración de la calefacción diurna. Es de notar que el máximo de temperatura media no corresponde al solsticio respectivo, sino al mes que sigue, puesto que la calefacción se efectúa paulatinamente, y a causa de la mala conductibilidad del aire, el calor necesita algún tiempo para comunicarse a la atmósfera, por cuyo medio se hace sensible para nosotros.

§ 101. DURACIÓN DE LAS ESTACIONES.

El año se divide en cuatro períodos, que se llaman estaciones y se determinan por los dos solsticios y los dos equinoccios, de manera que el nombre de estaciones se da propiamente al tiempo que necesita el sol (o más bien la tierra) para caminar de un solsticio a un equinoccio, y recíprocamente. Siendo la línea de los equinoccios perpendicular a la de los solsticios, cada estación corresponde a un cuadrante de la elipse que es la órbita de nuestro globo (o la órbita aparente del sol). Si los solsticios coincidiesen respectivamente con el afelio y el perihelio, la elipse quedaría dividida en cuatro áreas iguales por las dos líneas mencionadas; pero se sabe que el sol pasa por el perigeo diez días después de haber pasado por el solsticio de invierno, y por lo tanto hay desde el perigeo al punto vernal 80° ; síguese que la longitud astral del perigeo es igual a $360^{\circ} - 80^{\circ} = 280^{\circ}$. (Sabemos cómo se determina el punto vernal; la posición del perigeo corresponde al máximo del diámetro aparente del sol.) De este cálculo resulta que la línea de los apsidés no coincide con la de los solsticios, sino

que estas dos líneas forman entre sí un ángulo de 10° ; resulta además que la elipse queda dividida en cuatro partes desiguales, y por lo tanto la duración de las cuatro estaciones es desigual, tanto más cuanto que el movimiento del sol en longitud es irregular. La fig. 84 manifiesta esta desigualdad en la duración: *P* es el perigeo, *S* el solsticio de invierno, *A* es el apogeo, la duración se indica en

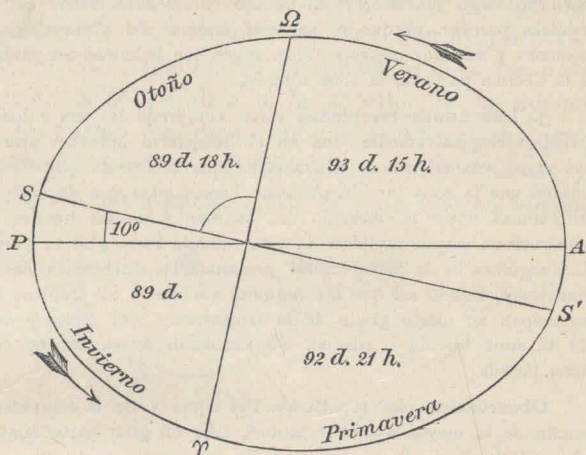


Fig. 84. Duración de las estaciones.

números redondos; por comparación se deduce que la primavera y el verano del hemisferio Norte duran unos siete días más que las mismas estaciones del hemisferio austral.

Esta duración se refiere a nuestra época, ya que es variable aunque de un modo muy lento: el punto vernal retrocede por la precesión cada año $50''$ y el perigeo se adelanta $12''$; luego van acercándose los dos puntos, y después de algunos miles de años llegará un momento en que coincidirán. En tiempo de Hiparco la primavera fué la estación más larga.

§ 102. ZONAS CLIMATOLÓGICAS¹.

Hemos visto que en las diferentes latitudes la superficie terrestre recibe los rayos solares sucesivamente bajo diferentes ángulos durante el año, variando asimismo la duración de los días y noches. Por esta causa era natural dividir la superficie del globo terrestre en zonas con respecto a la temperatura dominante. Trataremos esta cuestión con brevedad, porque pertenece propiamente a la Geografía Física.

1. La zona tórrida está comprendida entre los dos trópicos y es dividida por el ecuador en dos mitades: en ella el sol no se aparta mucho del cenit recibiendo sus rayos en sentido bastante perpendicular, y tampoco es marcada la diferencia en la duración de los días y noches. Síguese que la temperatura es elevada en ella; pero el cambio de estaciones es poco sensible. Para las regiones cercanas al ecuador los rayos solares se desvían apenas 23° del sentido perpendicular; en ellas no hay estaciones, sino un verano continuo.

¹ Pertenecen a la Geografía Física.

2. **Las zonas glaciales** están formadas por las regiones situadas *dentro* de los círculos polares; una se halla en el polo boreal y otra en el austral. Estas zonas reciben los rayos del sol siempre con gran oblicuidad y tienen dos estaciones, no más; un invierno largo y crudo, y un verano corto. Este último es más caliente de lo que pudiera parecer, porque el sol está encima del horizonte, sin ponerse, por varias semanas y aun por meses enteros, según sea la latitud del punto. Su extensión es igual a la décima parte de la zona tórrida.

3. **Las zonas templadas** están comprendidas entre los círculos polares y los trópicos respectivamente, una en el hemisferio boreal y otra en el austral: reciben los rayos solares menos oblicuamente que las zonas glaciales, pero con mayor oblicuidad que la zona tórrida. Además hemos visto que durante el año existen grandes diferencias entre la duración de los días y de las noches: por lo tanto se sigue que reciben mayor cantidad de calor que la zona glacial, pero menor que la tórrida. Las regiones de la parte central presentan las diferencias más marcadas en las cuatro estaciones, siendo así que las regiones vecinas a los trópicos o a los círculos polares participan en cierto grado de la temperatura, del clima y de la vegetación propios de la zona tórrida o glacial. Su extensión forma las 65 centésimas partes de la zona tórrida.

Observación. La repartición del clima y de la temperatura no depende únicamente de la mayor o menor latitud, sino en gran parte también de la altura sobre el nivel del mar, de la dirección de los vientos y de otras circunstancias; los pormenores sobre esta materia pertenecen al dominio de la Geografía Física. Recordamos, sin embargo, el hecho de ser la temperatura media del hemisferio austral inferior a la del hemisferio boreal, lo que se explica por las causas siguientes. 1. En el boreal predominan vastas extensiones de continentes, en el austral los grandes océanos de agua. 2. En el boreal hay mayor número de corrientes marítimas calientes que llevan el calor ecuatorial a las costas de los continentes boreales. 3. En los contornos del polo austral se acumulan mayores masas de témpanos de hielo, porque escasean los continentes.

La primera de las causas indicadas necesita una explicación más amplificada, la que se da en los textos de Física. Los cuerpos sólidos, y por lo mismo los continentes, se calientan pronto en su masa interior, aunque se haga la calefacción en la superficie superior, a causa de su buena conductibilidad, de que carece el agua; a pesar de los rayos solares las aguas del océano conservan una temperatura constante en el interior de su masa. En mayor grado proviene la temperatura inferior del hemisferio austral del enfriamiento que produce la evaporación del agua en tan enormes extensiones de los océanos australes.

CAPÍTULO TERCERO.

EL TIEMPO MEDIO.

§ 103. EL DÍA SOLAR Y EL DÍA SIDERAL.

Llamamos día solar al tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del sol por el meridiano de un lugar; este día es unos cuatro minutos más largo que el día sidereal. Omitiendo la explicación con respecto al movimiento aparente del sol, daremos la demostración genuina con respecto al movimiento de *rotación* y *traslación* que ejecuta la tierra en un día.

En la fig. 85 la traza AB representa el meridiano del punto A en el instante en que tanto el sol como una estrella pasan por él. Mientras la tierra ejecuta una rotación sobre su eje, se ha trasladado al punto C' , describiendo un arco que se proyecta sobre el ecuador según CC' ; también el meridiano AB se ha trasladado a una posición $A'B'$ paralela a la anterior, y la misma estrella se verá en el mismo meridiano en que se vió el día precedente; pero con respecto al sol el meridiano anda *atrasado* y debe describir el ángulo de rotación $A'C'D$ para que se vuelva

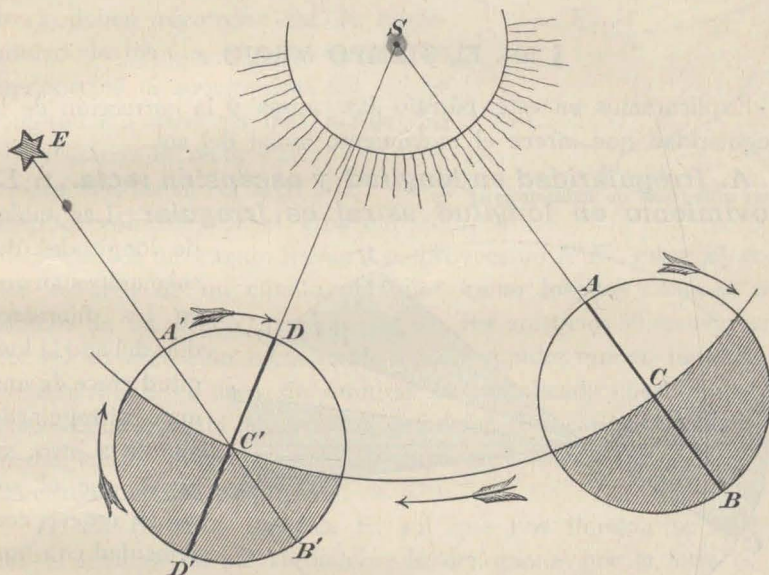


Fig. 85. El día solar.

a ver el sol en el mismo meridiano. Este ángulo es igual al ángulo $C'SC$, que se mide por el arco CC' , el cual vale sensiblemente un grado; pero hemos visto que se necesitan 4 minutos de tiempo para que en la *rotación* se recorra un arco de un grado; luego el día solar medio (que es constante, como veremos) se compone de un día sidereal, más 4 minutos. Estos 4 minutos de cada día forman en un año 24 horas en favor del tiempo sidereal: el año consta de 365,25 días solares que no son iguales entre sí; éstos son por lo tanto equivalentes a 366,25 días siderales constantes. Para obtener el valor que tiene el *día solar medio* basta dividir 366,25 por 365,25, y resulta 1 día 3 minutos 55 segundos, tiempo sidereal.

Consecuencias. 1. Síguese de la mayor duración del día solar que cada año todas las estrellas pasan dos veces un día dado por el meridiano de un mismo lugar: en las efemérides de París están apuntados los dos pasos en el día respectivo.

2. Queriendo expresar una fecha del año en días siderales, por ejemplo, el 15 de diciembre, basta recordar que el tiempo sideral adelanta cada día 4^m próximamente sobre el solar, y por lo tanto dos horas al mes; pero no se confunda este ejemplo con lo que diremos del día astronómico medio en el § 104.

§ 104. EL TIEMPO MEDIO.

Explicaremos en este párrafo las causas y la corrección de la irregularidad que ofrece el movimiento anual del sol.

A. Irregularidad en longitud y ascensión recta. 1. *El movimiento en longitud astral es irregular.* Las tablas

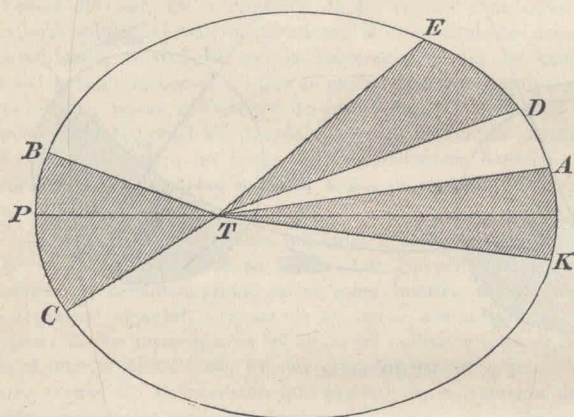


Fig. 86. Movimiento irregular del sol en longitud.

de longitudes del sol manifiestan que en los diferentes días del año la longitud crece de una manera irregular de un día a otro: síguese que el sol no se mueve con velocidad constante sobre la eclíptica y que el movimiento en ascensión recta tampoco es uniforme, por ser éste la proyección del arco de la eclíptica sobre el ecuador. El movimiento en longitud tiene su máximo el 31 de diciembre.

Esta irregularidad se deduce fácilmente de la ley de las áreas. Supongamos en la fig. 86 las tres áreas iguales, y cada una corresponda a un día de tiempo. Los tres arcos, empero, son desiguales: $CB > ED > AK$, por ser desiguales las rectas que se consideran como bases de los tres triángulos. Como el sol los recorre en tiempos iguales, se sigue que su velocidad angular es mayor en el perigeo que en el apogeo, como hemos visto; la desigualdad de los arcos manifiesta diferencias desiguales en longitud.

2. La irregularidad en ascensión recta se debe a la oblicuidad de la eclíptica. En la fig. 87 representa E el punto Aries, S'' un solsticio. Sea ES el arco de un grado en la eclíptica (exagerado), y ER su proyección sobre el ecuador, porque SR es un arco del círculo horario perpendicular al ecuador: por lo que el triángulo ERS resulta rectángulo, en que la hipotenusa ES tiene mayor longitud que el cateto ER ; mas como los dos arcos deben recorrerse en la misma unidad de tiempo, síguese que en los equinoccios el movimiento del sol en longitud ES debe ser más rápido que el en ascensión recta ER .

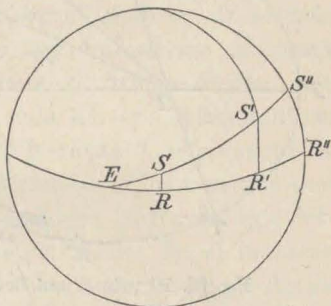


Fig. 87.

Irregularidad en ascensión recta.

En el solsticio el arco $S'S''$ de la eclíptica coincide con el arco del trópico, que es un círculo menor; su proyección $R'R''$ sobre el ecuador es arco de un círculo máximo: como los dos arcos se consideran de un grado, resulta que en los solsticios el movimiento del sol en ascensión recta es de mayor rapidez que en longitud.

Aviso. En el caso de omitirse la complicada cuestión de los soles ficticios, basta pasar a las definiciones, recordando que el sol medio es un punto geométrico cuya posición se determina con exactitud por los astrónomos.

B. El tiempo medio. El sol que nos ilumina se designa con el nombre de sol verdadero; lo denotamos por la letra S . Es mediodía verdadero en el momento en que el centro de éste pasa por el meridiano superior. Día solar es el tiempo transcurrido entre dos mediodías consecutivos; este tiempo solar se llama tiempo verdadero. Pero los días solares no son iguales entre sí y no pueden tomarse por unidad del tiempo civil, cuyo carácter ha de ser la invariabilidad, siendo el día sideral, con ser constante, incómodo para la vida práctica. Por esto se toma por unidad el día solar medio, cuya duración debe ser constante sin diferenciarse mucho del día verdadero. Para determinar, pues, el tiempo medio, se han adoptado dos soles ficticios, S' y S'' , a fin de corregir las dos irregularidades arriba mencionadas.

1. **El primer sol ficticio S' .** Se imagina que este sol recorre con movimiento uniforme la eclíptica en el mismo sentido y en el mismo tiempo total que el sol verdadero, y que pasa junto con él por el perigeo: su velocidad angular es constante, y en tiempos

iguales su radio vector describe ángulos iguales, pero no áreas iguales. He aquí la explicación (fig. 88): Los dos soles S y S'

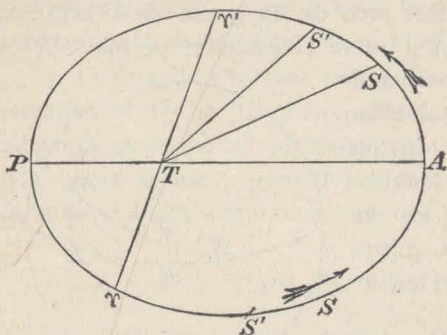


Fig. 88. El primer sol ficticio.

salen juntos del perigeo y llegan juntos al apogeo, porque la línea de los ápsides divide la órbita en dos partes simétricas: sólo en estos dos puntos P y A pueden encontrarse. La velocidad angular de S' está comprendida entre el máximo y el mínimo de la velocidad angular del sol verdadero; como su máximo es en el perigeo, S adelanta sobre S' hasta el apogeo, donde la velocidad de S tiene su mínimo; luego, desde el apogeo el sol ficticio adelanta sobre el verdadero hasta llegar al perigeo. Se comprende que no pasan juntos por los equinoccios; S pasa antes que S' por el punto vernal.

Ecuación del centro. La longitud astral del sol ficticio se llama longitud media. La longitud, pues, del verdadero será igual a la longitud media sumada a una cantidad periódica, que será unas veces positiva, y otras veces negativa.

Nota. En astronomía se llama ecuación a la diferencia que existe entre el valor de una cantidad variable y el valor que tendría si creciese uniformemente.

2. **El segundo sol ficticio S'' .** Con el primer sol ficticio se corrige la irregularidad en longitud, creciendo ésta uniformemente. Para corregir la irregularidad en ascensión recta, se ha imaginado un segundo sol ficticio con las siguientes cualidades: este sol recorre el *ecuador* con movimiento uniforme en el mismo sentido y tiempo que el sol verdadero y el primer sol ficticio; pasa por el punto vernal en el mismo instante que S' , pero no junto con S .

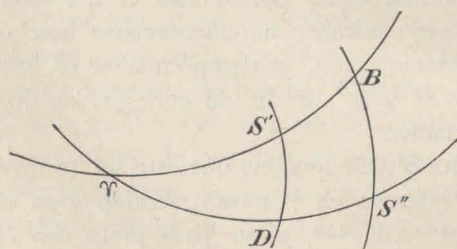


Fig. 89. El sol medio.

Resulta que su ascensión recta $\Upsilon S''$ (fig. 89) no difiere mucho de la ascensión recta ΥD del primer sol ficticio, ni de la del sol verdadero. Este segundo sol ficticio se llama *sol medio*, y su ascensión recta es la ascensión recta media del sol verdadero.

Definiciones. Se dice que es **mediodía medio** cuando el sol medio S' pasa por el meridiano superior; el **día medio** será pues, el tiempo que transcurre entre dos mediodías medios.

Tiempo medio es el tiempo determinado por el sol medio.

Ecuación del tiempo en un momento dado es la cantidad positiva o negativa que debe sumarse algebraicamente al tiempo verdadero de este momento, para obtener el tiempo medio. Esta ecuación o diferencia se publica para cada día con relación al verdadero mediodía en las efemérides astronómicas «*Connaissance des Temps*» y «*Annuaire du Bureau des Longitudes*». Una columna lleva el título: «*Temps moyen à midi vrai*», esto es, el tiempo que debe señalar un reloj regulado según el tiempo medio, en el momento en que pasa el sol verdadero por el meridiano. Luego puede decirse que la ecuación del tiempo es la cantidad en que el sol medio adelanta o retrasa su paso por el meridiano sobre el sol verdadero. Cuatro veces al año esta cantidad es cero: el 15 de abril, el 15 de junio, el 1º de septiembre, el 24 de diciembre, porque el sol medio y el verdadero pasan juntos por el meridiano. (El intervalo comprendido entre los mediodías de los dos soles puede llegar a 16 minutos.)

Conclusión. Los relojes y cronómetros tienen una marcha uniforme; deben, pues, regularse por el sol medio: como éste es invisible, se observa el paso del sol verdadero por el meridiano y se busca en las efemérides astronómicas el tiempo medio de este momento para el reloj. El paso por el meridiano se observa, o con el anteojo meridiano, o con el gnomon, o con un cuadrante solar bien construido.

Nota. *La meridiana del tiempo medio.* Si con ayuda de un buen reloj, regulado sobre el tiempo medio, marcamos durante un año cada día la extremidad de la sombra a mediodía medio y juntamos estos puntos sucesivos por un trazo continuo, obtendremos una curva que tiene sensiblemente la forma de un ocho cerrado. Esta curva se llama la meridiana del tiempo medio, y una vez determinada, puede servir en lo sucesivo para encontrar cada día el instante del mediodía medio; corta cuatro veces la recta del mediodía verdadero, porque estos dos mediodías coinciden otras tantas veces al año.

§ 105. ECUACIÓN DEL TIEMPO.

Al pasar el sol verdadero por el meridiano, un reloj arreglado según el tiempo medio debe indicar el tiempo señalado en la tabla siguiente: por ejemplo el 11 de noviembre, las 11^h 44^m, lo que significa que el sol medio pasa 16 minutos más tarde por el meridiano.

Fecha		horas	min.	seg.	Fecha		horas	min.	seg.		
Enero	{	I	0	3	58	Julio	{	I	0	3	27
		II	0	8	21			II	0	5	8
		2I	0	11	43			2I	0	6	3
Febrero	{	I	0	13	57	Agosto	{	I	0	6	0
		II	0	14	34			II	0	4	56
		2I	0	13	54			2I	0	2	54
Marzo	{	I	0	12	34	Septiembre	{	I	II	49	59
		II	0	10	12			II	II	56	30
		2I	0	7	19			2I	II	52	59
Abril	{	I	0	3	55	Octubre	{	I	II	49	57
		II	0	I	2			II	II	46	45
		2I	II	58	38			2I	II	44	41
Mayo	{	I	II	56	56	Noviembre	{	I	II	43	42
		II	II	56	9			II	II	44	12
		2I	II	55	53			2I	II	46	5
Junio	{	I	II	57	19	Diciembre	{	I	II	49	18
		II	II	59	16			II	II	53	31
		2I	0	I	23			2I	II	58	25

Observaciones. 1. Téngase presente que la ecuación del tiempo es cero en cuatro fechas del año: el 15 de abril, el 15 de junio, el 1º de septiembre y el 24 de diciembre.

2. En los cuadrantes solares bien contruídos el paso del sol verdadero por el meridiano se obtiene por medio de la sombra.

3. Tratándose de los días que no se hallan en la tabla precedente, encontraremos la hora exacta por una sencilla operación aritmética, por ejemplo para el 25 de marzo: éste se halla entre el 21 de marzo y el 1º de abril, que tienen once días de diferencia: su tiempo medio respectivo $0^h 7^m 19^s$ y $0^h 3^m 55^s$ tiene la diferencia de 204^s , que divididos por 11 dan $18,5^s$, término medio por *cada día*; este número multiplicado por 4 (días) da 74^s , los que deben restarse de $0^h 7^m 19^s$ para saber que el 25 de marzo el reloj debe marcar $0^h 6^m 5^s$ al pasar el sol verdadero por el meridiano.

§ 106. VARIAS MEDIDAS DEL TIEMPO.

Daremos en este párrafo importante y fácil un resumen de varias maneras para medir el tiempo con días y horas, dejando para otro capítulo el año trópico y civil, utilizando para ello el excelente artículo publicado en 1903 en el Anuario astronómico de Chile.

I. Día solar medio y día sidereal. En astronomía se distingue entre el tiempo medio y el tiempo sidereal, empleando como unidades respectivas el día solar medio y el día sidereal, que constan de 24 horas cada uno: he aquí sus definiciones.

1. El **día medio** es el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos por un mismo meridiano, efectuados por el *sol medio*, cuya velocidad angular es uniforme e igual a la velocidad media del sol verdadero.

2. **Día sidereal** es el intervalo que separa dos pasos consecutivos por un mismo meridiano, efectuados por el punto Aries o una estrella.

El día medio consta de 24 horas, pero medidas en tiempo medio; equivale, pues, a $24^h 4^m$ tiempo sidereal, en número redondo: por lo tanto un reloj de tiempo sidereal adelanta en cada día unos cuatro minutos sobre el reloj del tiempo medio, formando en un año el adelanto total un día entero. El reloj sidereal marca cero horas al pasar el punto Aries por el meridiano del lugar; el reloj del tiempo medio marca cero horas al pasar el sol medio por el meridiano: estos dos puntos geométricos son invisibles; pero su posición en el cielo está bien definida por el cálculo. (El punto Aries dista poco de α de Andrómeda, y el sol medio sigue o adelanta de cerca al sol verdadero.)

Una vez al año los dos puntos se encuentran en un mismo meridiano, y entonces los dos relojes mencionados de un mismo lugar deben marcar la misma hora.

Nota. Es costumbre casi general de dividir el día en dos grupos de a 12 horas cada uno, desde medianoche a mediodía, y desde éste a la medianoche siguiente, agregando a la hora la abreviación de las palabras latinas *ante meridiem* y *post meridiem*. A causa de este inconveniente, los ferrocarriles y otros servicios públicos en algunos países han adoptado el sistema de contar el día de una medianoche a la siguiente desde o hasta 24 horas: este método empieza a abrirse camino.

II. Día medio civil y día medio astronómico. Estas dos unidades tienen la misma duración con la diferencia de principiar la primera a medianoche y la segunda a mediodía; síguese que el día astronómico empieza *doce horas después del civil*; luego una fecha expresada en tiempo civil debe ser disminuída en 12 horas para expresarse en tiempo medio astronómico; al contrario, deben agregarse 12 horas al astronómico para transformarlo en tiempo civil.

Ejemplo 1º. La fecha 5 de diciembre $5^h 30^m$ p. m. se expresa en tiempo medio civil: 5 de diciembre $17^h 30^m$, y en tiempo medio

astronómico: 5 de diciembre $5^h 30^m$, sin agregar ni en uno ni en otro caso p. m.

Ejemplo 2º. La fecha 5 de diciembre $10^h 10^m$ a. m. se expresa en tiempo medio astronómico: 4 de diciembre $22^h 10^m$, y en tiempo civil: 5 de diciembre $10^h 10^m$ (fijarse en el cambio de la fecha del mes).

III. Hora en diferentes puntos, pero en un mismo instante. Los puntos situados sobre un mismo meridiano tienen siempre la misma hora, tanto solar como sideral, ya que el paso del sol y del punto vernal se refieren al meridiano entero, esto es, a todo el semicírculo de un polo al otro; pero los puntos situados sobre diferentes meridianos tienen horas distintas, como se ha explicado al tratar de la ascensión recta y de la longitud geográfica.

IV. Hora legal de un país. Con facilidad se comprende que la diferencia de tiempo entre los diferentes puntos de un país ocasiona graves inconvenientes para los ferrocarriles, los viajeros, etc.; para remediar el mal se adopta en varios países un meridiano central, y sobre éste se regulan los relojes de todas las demás ciudades, como si estuviesen situadas sobre este meridiano: tal es, por ejemplo, el meridiano de Córdoba en la República Argentina, de suerte que todos los relojes deben marcar las doce al pasar el sol medio por el meridiano de Córdoba: la hora de este meridiano es la hora legal para la Argentina en tiempo medio civil.

Mas, con esta disposición no se evita el inconveniente internacional, puesto que en las fronteras el cambio de hora es un número complejo, con fracciones. He aquí la solución propuesta: Se divide toda la tierra en 24 husos, esto es, en 24 partes comprendidas cada una entre dos meridianos, que distan 15° el uno del otro: bastará, pues, al llegar a uno de ellos, quitar o agregar una hora entera para hacer la debida transformación. Este sistema ya se ha adoptado en los Estados Unidos y en Europa; en los países que por su situación geográfica no tienen esta relación internacional de ferrocarriles, como son las Repúblicas de Sud-América, basta la hora legal establecida para obviar los inconvenientes principales.

Esta reforma ya está adoptada generalmente, siendo el meridiano de Greenwich el origen; de manera que los puntos situados dentro de 15° de longitud tienen la misma hora internacional. Al llegar al huso siguiente se cambia la hora; viajando hacia el Este se adelanta una hora; viajando al Oeste se atrasa.

Los marinos cada vez que pasan los 180° de longitud respecto a Greenwich suprimen, si viajan de Este a Oeste, un día de la semana y uno de la fecha, y si el viaje se verifica de Oeste a Este cuentan en dos días seguidos el mismo día de la semana, y la misma fecha.

CAPÍTULO CUARTO.

CUADRANTES SOLARES.

Los cuadrantes solares son unos aparatos que indican la hora verdadera por la sombra del sol. Sus partes esenciales consisten en una superficie plana sobre la cual se ha fijado un estilo o gnomon, cuya dirección es siempre paralela al eje del mundo; las líneas son las trazas según las cuales el círculo horario del sol corta al cuadrante en las diferentes horas del día. Expliquemos primero el cuadrante más sencillo (aunque se usa poco), puesto que ofrece el principio general en que se funda la construcción de todos los cuadrantes.

§ 107. CUADRANTE ECUATORIAL.

Siguiendo el estilo la dirección del eje del mundo y habiéndose colocado la tabla perpendicularmente al estilo, resulta que el plano de la tabla está en el plano del ecuador celeste, al cual representa. El círculo horario del sol, girando uniformemente en torno del eje del mundo, hace también con uniformidad su traza sobre el ecuador, de manera que describe un ángulo de 15° por hora. Por lo tanto, después de haber determinado el plano meridiano con el auxilio del gnomon, se marcará en la tabla o plancha la línea de sombra Cm a mediodía (fig. 90); del pie C del estilo como centro, con un radio conveniente, se describe un círculo que se divide en arcos iguales de 15° cada uno a partir del punto m , uniendo después el centro con los puntos de división; estas rectas serán las líneas de sombra a las diferentes horas del día, antes y después de mediodía. Es evidente que tan sólo se marcarán las horas en que el sol puede estar encima del horizonte conforme a la latitud del lugar. (Las líneas se llaman radios horarios.)

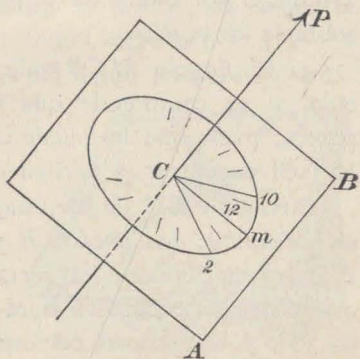


Fig. 90. Cuadrante ecuatorial.

El trazo del cuadrante ecuatorial debe hacerse en las dos caras del plano ecuatorial. En efecto, para el hemisferio *austral* el sol se halla encima del ecuador desde el 22 de septiembre hasta el 21 de marzo, y por lo tanto las horas se leen en la cara posterior del cuadrante; desde el equinoccio de primavera hasta el de otoño el sol se halla debajo del ecuador y las horas se leen en la cara opuesta a la precedente. (La declinación del sol es boreal en este caso.)

§ 108. EL CUADRANTE HORIZONTAL.

I. Consideración teórica. Este cuadrante es la proyección del cuadrante ecuatorial sobre el horizonte del punto de observación.

1. Tengamos un cuadrante ecuatorial bien construido (fig. 91),

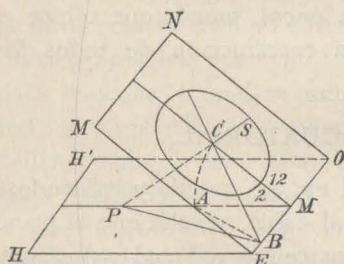


Fig. 91. Cuadrantes.

ajustado en la recta EO al horizontal bajo un ángulo que es el complemento de la latitud del lugar; supongamos CM en el meridiano; el ángulo CPM del estilo será igual a la altura del polo. Las rectas PM y CM son perpendiculares a la línea Este-Oeste en su medio, de suerte que PM es la meridiana.

2. A mediodía verdadero, el sol estará en la prolongación del plano CPM y la sombra del estilo coincide con la recta PM .

3. Prolongo un radio del cuadrante ecuatorial, por ejemplo, el que une C con la hora 2 p. m., hasta B en la recta EO ; a las 2 p. m. el sol estará en el plano CBP , y la sombra del estilo dará sobre la recta PB .

4. El ángulo MCB vale 30 grados (dos horas) por construcción, y se comprende que el ángulo MPB no vale lo mismo; parece, pues, que no puede corresponder a dos horas; sin embargo, es fácil encontrar la verdadera dirección de PB .

Sirviendo EO de eje, hagamos bajar el plano ecuatorial sobre el horizontal: los puntos B y M quedarán inmóviles, y el punto C caerá en A sobre la recta PM (que está en el mismo plano que CM): la recta AM será igual a CM y el $\angle BAM = BCM = 30^\circ$, y el punto B corresponde a las 2 de la tarde. (Lo mismo se podrá efectuar para cualquier otra hora del día.)

5. La consideración precedente proporciona un método para construir directamente el cuadrante horizontal en la plancha o el papel, sin el auxilio de un cuadrante ecuatorial.

II. **Construcción.** En la fig. 92 represente el gran rectángulo al plano del cuadrante; EO es la línea Este-Oeste; RM será la meridiana, perpendicular en el medio de la recta OE , señalando P el pie donde se colocará después el estilo.

1. Al lado del cuadrante formo el triángulo rectángulo EKH : a este efecto trazo con EH como diámetro una media circunferencia en que los ángulos inscritos son rectos; formo en H un ángulo igual a la latitud del lugar y concluyo el triángulo EKH , que representa el $\triangle CMP$ de la fig. 91. En seguida abato con el radio EK el punto K en C .

2. Hagamos ahora $AM = EC$, y desde A como centro y con un radio conveniente se traza una circunferencia que se divide de 15 en 15 grados, empezando desde la recta AM (bastan seis divisiones de cada lado): estas divisiones, que pueden hacerse con un transportador, son las horas 11, 10... 1, 2, 3... del cuadrante ecuatorial: la prolongación de los radios hasta el margen del rectángulo nos dará los puntos en que se marcarán con números romanos las horas correspondientes del cuadrante horizontal, y las rectas que los unen con el pie P , son las trazas de los círculos horarios sobre el horizonte.

Finalmente, se quita el triángulo auxiliar, se graban en la plancha las horas y las rectas necesarias, borrando lo demás; se coloca la plancha con auxilio de un nivel bien horizontal sobre la peana, se fija el estilo bajo un ángulo igual a la latitud del lugar, poniéndolo juntamente con la recta PM en el meridiano.

Las horas de la mañana deben estar al Oeste y el estilo hacia el polo del hemisferio respectivo. (Tener presente que los cuadrantes no dan la hora de los relojes públicos.)

La fig. 93 representa el cuadrante horizontal como por lo común se usa, faltando la peana.

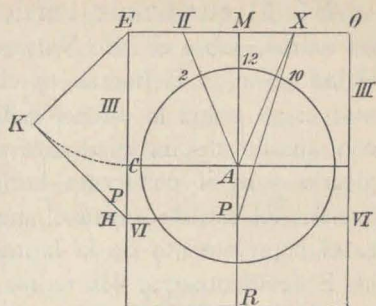


Fig. 92. Construcción.

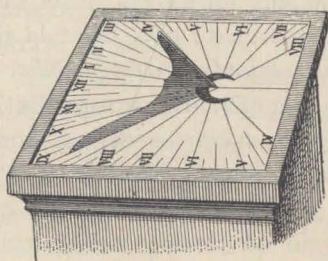


Fig. 93. Cuadrante horizontal.

III. El cuadrante vertical se aplica en el plano vertical de los muros, sobre el lado Norte en la zona templada austral, y sobre el lado Sur en la boreal. Si el muro está perfectamente orientado, esto es, si sigue la dirección Este-Oeste, será fácil la construcción con auxilio de un cuadrante ecuatorial, siguiendo el método empleado para el cuadrante horizontal. Es de notar que la prolongación del estilete hasta el muro formará con éste un ángulo que es el complemento de la latitud del lugar.

Es evidente que los radios horarios y el estilete han de tener una longitud conveniente para ser visibles a distancia.

Como los cuadrantes señalan el tiempo verdadero, será necesario agregar o quitar a la hora marcada la ecuación del tiempo que corresponde a aquel día para obtener el tiempo medio, según el cual se arreglan los relojes.

Observación. En el caso de no seguir el muro con exactitud la dirección de Este a Oeste, se debe hacer el cuadrante vertical declinante; como su construcción es muy complicada, la omitimos, tanto más que los cuadrantes han perdido hoy día su importancia, por haberse generalizado el uso de los relojes.

CAPÍTULO QUINTO.

EL AÑO TRÓPICO Y EL CALENDARIO.

§ 109. DEFINICIONES PREVIAS.

Con la palabra **año** designamos el tiempo empleado por el sol, en su movimiento aparente, en recorrer una vez la eclíptica desde el momento de salir de un punto fijo hasta volver al mismo: en conformidad con el punto elegido distinguimos tres especies de años. (Algunos pueblos determinan todavía el año por el movimiento de la luna.)

1. El **año sidereal** es el intervalo de tiempo que emplea el sol partiendo de una estrella fija hasta volver a la misma, de suerte que en el segundo encuentro, la tierra, el sol y la estrella se hallan en una línea recta de la misma manera que en el encuentro precedente. Este año tiene la duración de *365 días 6 horas 9 minutos 10 segundos, tiempo medio.*

[2. El **año anomalístico** es el tiempo transcurrido entre dos pasos sucesivos del sol por el perigeo: es unos cinco minutos más largo que el sidereal.]

3. El **año trópico**, que es el más importante, es el intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del sol por el equinoccio de primavera: su duración es de 365 días solares

medios, $5^h 48^m 50^s$; *diffiere, pues, del sideral en $20^m 19^s$* . La causa de esta diferencia es la siguiente: En virtud de la precesión de los equinoccios el sol vuelve al mismo punto vernal *antes* de haber cumplido una revolución sideral: para volver el sol a la misma estrella debe recorrer el arco de $50'',25$ debido a la retrogradación del punto vernal, para lo cual gasta $20^m 19^s$. (Nótese que aquí no se trata del movimiento diurno, en que el sol recorre 15^0 por hora, sino del de traslación, en que recorre 1^0 en 24 horas.) La duración del año trópico equivale a $366\frac{1}{4}$ días siderales, de manera que el sol ha dado una vuelta menos que las estrellas en el movimiento aparente diurno, según queda explicado.

4. **El año civil** es un período de cierto número de días que sirve para precisar las fechas históricas. Debe componerse de un número entero de días solares medios, *con exclusión de fracciones* y no puede diferir mucho del año trópico, a fin de que los fenómenos astronómicos vuelvan a coincidir con las mismas fechas.

5. **El calendario** es el catálogo de semanas y meses que determinan y dividen el año civil; su objeto es evitar que el año civil y el trópico vayan apartándose más y más entre sí; de lo contrario, la discordancia haría caer sucesivamente en la época de las diferentes estaciones el día del año nuevo y las fiestas tanto civiles como religiosas.

§ 110. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA DURACIÓN DEL AÑO TRÓPICO.

1. Los antiguos, cuyo mejor instrumento astronómico era el gnomon, observaban con mayor facilidad los solsticios que los equinoccios, siendo evidente que, para dos pasos consecutivos por el solsticio, el sol emplea un tiempo igual a la duración del año trópico referido al equinoccio. Contando el número de días transcurridos entre dos máximos o dos mínimos consecutivos de sombra, hallaron 365 días para el año trópico: era la primera aproximación.

2. Observando el mismo solsticio durante varios años consecutivos se descubre la existencia de un atraso constante, que al fin de 60 años llega a ser de 15 días; esto significa que el 61º solsticio se efectúa después de $363 \times 60 + 15$ días, de donde resulta que el año trópico tiene 365 días 6 horas o sea $365,25$ días. Es la segunda aproximación la que se conocía en la antigüedad.

3. La observación de los solsticios hecha aun con instrumentos de precisión, no puede dar suficiente exactitud, por variar muy poco de la declinación en los solsticios: los astrónomos modernos

emplean con preferencia el punto vernal, y a este fin han contado el número de días transcurridos entre dos pasos seguidos del sol por el punto vernal durante un siglo: dividiendo el número total por 100 se ha obtenido con exactitud la duración del año trópico, que es igual (en días solares medios) a *365 días 5 horas 48 minutos 50 segundos*, los que dan en fracción decimal: *365,2422166 días solares medios*.

§ 111. CONCORDANCIA DEL AÑO CIVIL CON EL TRÓPICO.

Desde el tiempo de Numa tomaron los romanos el número de 355 días para el año civil, intercalando cada dos años un mes de 21 días entre el 23 y el 24 de febrero, de donde resultaron desórdenes muy notables. Más tarde se adoptó la duración del año con 365 días (año vago), de lo cual resultó el error siguiente: es evidente que en esta duración el año civil *adelanta* sobre el trópico, porque concluye antes; en cada año el error es de 0,24 días o sensiblemente de 6 horas, y por lo tanto en cuatro años el año civil pierde 24 horas sobre el trópico.

Reforma juliana. Julio César, aconsejado por Sosígenes de Alejandría, hizo la corrección siguiente: Adoptó tres años de 365 días cada uno, y cada cuarto año de 366 días; el día complementario se intercaló entre el quinto y sexto «calendas Martias», que corresponden al 24 y 25 de febrero; este día llevaba el nombre de *bis sextus* y el año que le corresponde era bisiesto. La reforma se decretó en el año 45 a. d. J. C. (año 708 p. u. c.); pero con el fin de restablecer la concordancia entre la fecha y el equinoccio de primavera, se hizo constar el año 709 de 445 días; fué el año de confusión para los romanos.

La reforma se puso en práctica en 710 p. u. c., el mismo año en que murió César. Interpretando mal la regla de César (o tal vez por fines políticos), las autoridades hicieron bisiesto cada *tercer* año, hasta que el emperador Augusto corrigió el error en el año 753. Pero este año es el principio de la era cristiana; luego los años 1, 2, 3 constaban de 365 días, y el año 4 era bisiesto lo mismo que los años 8, 12, 16, etc., de donde se explica la regla de ser bisiestos en la era cristiana los años divisibles por 4.

El concilio de Nicea, año 325, prescribió que se adoptase en la Iglesia la reforma juliana; en este año se conoció que el equinoccio de primavera caía en el 21 de marzo, y el concilio decretó que la fiesta de Pascua de Resurrección debía celebrarse el primer domingo después del primer plenilunio de primavera.

§ 112. ERROR EN EL AÑO JULIANO: SU REFORMA.

Cerca del año 1582 se observó que el equinoccio de primavera caía según el calendario en el 11 de marzo, en vez de caer en el 21, conforme a la norma del concilio niceno: había, pues, un atraso de 10 días entre el calendario y el fenómeno astronómico. Las investigaciones científicas, ejecutadas por orden y con la protección del Papa Gregorio XIII, manifestaron el error que había en el año juliano, y el medio de reformarlo y de conservar la concordancia en lo futuro. (Gregorio XIII encargó el trabajo a una comisión, la cual adoptó la reforma propuesta por Luigi Lilio, médico calabrés, por ser la más sencilla; Lilio murió antes de ver realizado su proyecto.) He aquí el cálculo del error:

Año de Julio César	365,25	días
Duración verdadera	365,2422	»
Diferencia en un año	0,0078	días
» en 400 años	3,12	»

Luego, por cada 400 años el año civil *se atrasaba* 3 días sobre el trópico: el atraso total era, pues, de 10 días desde el año 321: así el equinoccio cayó el once, en vez del 21 de marzo, en 1582.

Reforma gregoriana. Para corregir el error pasado decretó Gregorio XIII que en el año 1582 el 5 de octubre debía denominarse 15 de octubre: así volvió el equinoccio de primavera a coincidir con el 21 de marzo.

Para evitar que se repitiese el error en adelante sirve la siguiente disposición: en el calendario juliano todos los años que enuncian un siglo, son bisiestos; basta, pues, suprimir tres bisiestos por cada cuatro siglos para normalizar el calendario. A este fin decretó el soberano pontífice que todo año correspondiente a un siglo, cuyo número de *centenares* no era divisible por 4, tampoco sería bisiesto. *Ejemplo:* los años 1700, 1800, 1900 no son bisiestos, pero el año 1600 lo fué; de esta manera se han quitado 3 días en 400 años, conservándose la concordancia entre el año civil y el trópico, y el equinoccio de primavera cae siempre en el 21 de marzo.

Los rusos y los griegos, por espíritu de oposición, no adoptaron la reforma gregoriana; siguiendo el *viejo estilo* juliano, sus fechas se atrasan actualmente en 12 días, a saber: 10 días por no haber hecho la supresión el 5 de octubre de 1582, y 2 días por haber hecho bisiestos los años 1700 y 1800.

Nota 1. En rigor la reforma gregoriana no da una concordancia absolutamente completa. El año gregoriano es de 365, 2425 días: la diferencia con el trópico es de 0,12 de día en 400 años; se necesitan, pues, 4000 años para que el error sea igual a *un día*; para hacer la corrección basta suprimir cada 4000 años un día bisiesto. Por lo mismo debe considerarse la reforma gregoriana como una obra que está en perfecta armonía con la ciencia y las exigencias de la utilidad pública. El breve resumen que precede, no permite que nos formemos una idea cabal de los trabajos, estudios y cálculos que fueron necesarios para alcanzar la hermosa sencillez y la exactitud que presenta la reforma gregoriana.

Nota 2. Los romanos principiaban el año en el mes de marzo, de donde resultaba que nuestros últimos cuatro meses eran el séptimo, octavo, noveno y décimo, denominación que todavía conservan, aunque no sea correcta.

Los francos cristianos comenzaban el año en el día de la Natividad de Nuestro Señor Jesucristo. El rey de Francia, Carlos IX, hizo fijar el 1º de enero para el principio del año civil.

*§ 113. EL CICLO SOLAR.

Se llama *ciclo solar* un período de 28 años, al cabo de los cuales los días de la semana vuelven a caer en las mismas fechas del año; de manera que si el 15 de diciembre es viernes en el tercer año de un ciclo, será viernes en todos los años terceros de todos los ciclos. Se llamó solar, no porque tuviese que ver nada con el curso del sol, sino porque servía para fijar el domingo, que se llamaba, y todavía se llama en muchas partes, día del sol; fijado este día, queda determinado el orden de los demás días de la semana en el año.

Se designan los siete primeros días de enero por una de las siete letras A, B, C, D, E, F, G, y se repite la misma serie sin interrupción. Si la letra A, por ejemplo, corresponde al primer domingo del año, corresponderá también a todos los otros domingos y se llama por esta razón *letra dominical*.

Letra dominical es la letra que indica la fecha en que cae el primer domingo del año.

Hallar la letra dominical en un año cualquiera. Se busca primero el lugar que ocupa el año dado en el ciclo solar, según la regla siguiente: se añaden al año 9 unidades, y la suma se divide por 28. El cociente indica el número de ciclos que van corridos y la resta el lugar del año en el ciclo. Si la resta es cero, el lugar del año en el ciclo es 28. *Ejemplo:* ¿qué lugar ocupaba en el ciclo solar el año de 1893? $\frac{1893 + 9}{28}$. La resta es 26. El año de 1893 era el vigésimo sexto del ciclo en curso. En el cuadro siguiente se ve que la letra dominical que corresponde al año 26 del ciclo es A.

Años del ciclo	Letras dominicales	Años del ciclo	Letras dominicales	Años del ciclo	Letras dominicales	Años del ciclo	Letras dominicales
1	ED	8	C	15	A	22	F
2	C	9	BA	16	G	23	E
3	B	10	G	17	FE	24	D
4	A	11	F	18	D	25	CB
5	GF	12	E	19	C	26	A
6	E	13	DC	20	B	27	G
7	D	14	B	21	AG	28	F

Para comprender la regla que hemos dado para hallar el lugar de un año en el ciclo solar, debe tenerse presente que el primer año de la era cristiana no coincidió con el primero del ciclo solar, sino con el décimo.

En los años bisiestos hay dos letras dominicales: una para enero y febrero, y la otra para el resto del año. Si no hubiese años bisiestos, las letras dominicales se repetirían en el mismo orden cada siete años; mas como hay un año bisiesto cada cuatro años, es necesario un período de 28 años, producto de 7×4 , para que las letras dominicales se repitan en el mismo orden.

LIBRO SEXTO. LA LUNA.

CAPÍTULO PRIMERO.

MOVIMIENTO PROPIO DE LA LUNA.

§ 114. SU MOVIMIENTO EN ASCENSIÓN RECTA Y EN DECLINACIÓN.

La existencia de un movimiento propio de la luna en ascensión recta se manifiesta por observaciones muy sencillas, que vamos a indicar. Estando la luna llena a cierta altura sobre el horizonte, basta fijar su posición con respecto a una estrella para conocer dentro de una media hora que se ha apartado de ella hacia el *Este*, recorriendo un arco igual al valor de su diámetro aparente. De una manera más completa observaremos este movimiento si lo seguimos durante quince días, empezando desde la luna nueva: dos días después el astro es visible en el Oeste muy cerca del horizonte, y en los días siguientes, *a la misma hora*, estará cada día unos 13^0 más al Oriente, y finalmente en el plenilunio saldrá en un punto del Este. Si tenemos cuidado de fijar la primera observación con respecto a una estrella, hallaremos que la luna vuelve a la misma estrella unos 27 días 7 horas 40 minutos después de la primera observación; recorre cada día unos 13^0 del Oeste al Este (en el mismo sentido que el movimiento de traslación aparente del sol). El tiempo en que la luna describe el círculo en ascensión recta es *una revolución sideral*.

El movimiento en *declinación* se puede conocer por observaciones análogas a las que hemos considerado con respecto a la declinación del sol; pero la ley de las variaciones en declinación no se ha podido establecer a causa de la irregularidad con que se presenta la declinación. Si en el Este del horizonte fijamos un punto de comparación, veremos que los puntos en que sale la luna,

varían de una manera notable; por lo mismo cambia su distancia cenital y su altura meridiana, de lo cual se sigue la variación en declinación.

§ 115. REVOLUCIÓN SINÓDICA. DÍA LUNAR.

Antes de explicar este fenómeno hemos de dar algunas definiciones indispensables.

Se dice que la luna está en **conjunción** cuando su longitud astral, que se calcula por medio de las coordenadas ecuatoriales, es la misma que la del sol; de otra manera: cuando el radio vector *terrestre* se proyecta según TS (fig. 99) en sentido directo hacia el sol.

La luna está en **oposición** cuando su longitud difiere en 180° de la del sol (posición L_4); el radio vector que va desde la tierra, se proyecta según TL_4 , en sentido opuesto a TS .

Difiriendo la longitud lunar en 90° de la del sol, se dice que la luna está en **cuadratura** (posición L_2 y L_6 , primer y último cuarto).

La conjunción y oposición llevan el nombre común de **sicigias** (del griego σὺν, *con*, y ζυγόν, *el yugo*).

El tiempo que emplea la luna en recorrer el zodiaco para volver a la estrella que se toma por punto de partida, se llama una *revolución sideral*: es de $27^d 8^h$ próximamente.

La **revolución sinódica** de la luna se refiere a su movimiento con respecto al sol, y es el tiempo transcurrido entre dos conjunciones consecutivas; en términos más generales puede decirse que es el tiempo que tarda la luna en presentar a la tierra dos fases iguales consecutivas, por ejemplo, dos plenilunios. (La palabra *sinódica* se deriva del griego συνδεύειν, *caminar junto*.) Esta revolución se llama también *lunación*, y es el *mes lunar*, que consta de $29^d 13^h$; excede, pues, en dos días a la revolución sideral; lo que vamos a explicar ahora.

En la fig. 94 sean S y A las posiciones del sol y de la luna en conjunción; los dos astros se mueven en el mismo sentido. Después de $27^d 8^h$ la luna ha recorrido 360° y vuelve a la posición A ; pero no puede haber conjunción, porque el sol se ha trasladado a S' , unos 27° al Este; por lo tanto debe la luna recorrer esos 27° para que haya conjunción, y lo hace en $2^d 5^h$. De aquí se deduce que la duración de la revolución sinódica es de $29^d 12^h 44^m$; este es el mismo tiempo que pasa entre dos lunas llenas seguidas. Por su medio se calcula fácilmente la revolución sideral, que se refiere a la órbita de 360° ; porque

$$360^\circ : 360 + 27,5^\circ = x : 29^d 12^h.$$

Día lunar es el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos de la luna por un mismo meridiano; su duración es de $24^h 50^m$ tiempo

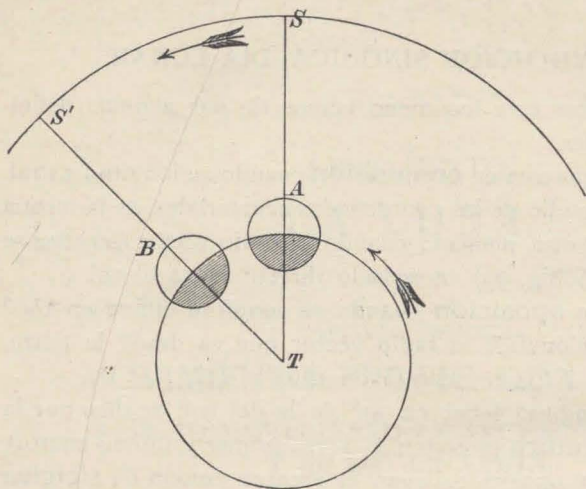


Fig. 94. Revolución sinódica.

sideral; porque la luna se aparta cada día 13^0 del meridiano hacia el Este en su movimiento de traslación, gastando unos 50^m para recorrerlos en el movimiento general diurno. No se confunda este día lunar con la duración del día en la luna misma, de que luego hablaremos.

§ 116. ORBITA DE LA LUNA. ALTURA.

I. Señalando sobre un globo celeste la posición de la luna cada vez que durante algún tiempo se han medido sus coordenadas ecuatoriales, volveremos después de unos 27 días al punto de partida: si hacemos pasar un trazo continuo por esos puntos, tendremos en el globo la órbita lunar, que en su perspectiva sobre el cielo forma un círculo máximo; para el movimiento de la luna se emplean con preferencia las coordenadas eclípticas (longitud y latitud), que se calculan por medio de las ecuatoriales. De esta manera se ha encontrado que la luna tiene un máximo de latitud boreal y otro de latitud austral, cada uno de $5^0 8'$; luego no coincide el plano de su órbita con el plano de la eclíptica, sino que forma con él un ángulo de $5^0 8'$. Estos dos planos se cortan según el diámetro NN' (fig. 95), que se llama la *línea de los nodos*. El punto N , donde la latitud empieza a hacerse boreal, se llama el nodo ascendente; el punto N' es el nodo descendente.

II. **La órbita es una elipse.** Aunque la órbita lunar se proyecte en forma circular sobre la bóveda celeste, pasando su plano por el centro de la tierra, se ha demostrado no obstante que es elíptica. El diámetro aparente de nuestro satélite varía durante una lunación entre el máximo de $33' 30''$ y el mínimo de $29' 20''$,

de donde se evidencia que sus distancias a la tierra varían. Las consideraciones hechas en el § 45 con respecto a la órbita del sol, se pueden aplicar a la órbita lunar: la curva es una elipse, uno de cuyos focos ocupa la tierra; su excentricidad es $\frac{1}{18}$. El movimiento se efectúa conforme a la ley de las áreas, y no es uniforme: *la velocidad angular es mayor en el perigeo que en el apogeo* (con esto se explica la libración en longitud).

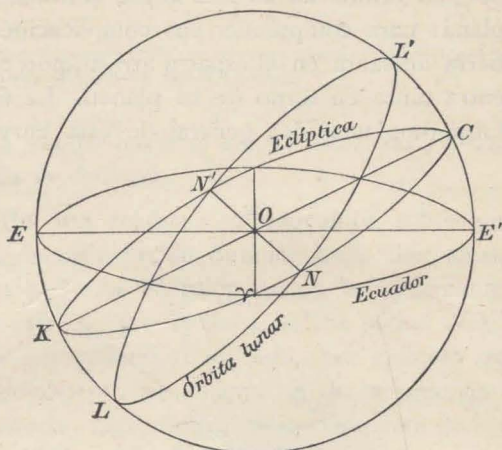


Fig. 95. Órbita de la luna.

*III. Datos numéricos (véase fig. 102).

El eje de la luna forma con su proyección sobre el plano de la órbita lunar un ángulo de $83^{\circ} 30'$ ($\angle PET$), quedando paralelo a sí mismo; en su prolongación es casi perpendicular al plano de la eclíptica, formando con TK' un ángulo de 91° (en el triángulo que resultaría, el $\angle E = 84^{\circ}$, $\angle T = 5^{\circ}$ próximamente).

IV. Altura meridiana. Determinar la mayor altura en que la luna puede pasar por el meridiano en una latitud austral.

Este punto es L' en la fig. 95, donde no está el horizonte. La mayor declinación de la luna es $23^{\circ} 27' + 5^{\circ} 8'$ (inclinación de la órbita lunar con la eclíptica). Basta, pues, sumar $28^{\circ} 35'$ con la declinación del horizonte respectivo (esto es, la altura del ecuador), para resolver el problema.

Ejemplos. En Santiago de Chile $57^{\circ} + 28^{\circ} = 85^{\circ}$ próximamente. En Buenos Aires $56^{\circ} + 28^{\circ} = 84^{\circ}$. (¿Cuál es la menor distancia cenital?)

¿Por qué en la latitud Sur de $28^{\circ} 35'$ la luna puede pasar por el cenit? (Copiapó y Salta.)

La menor altura meridiana se calcula restando $28^{\circ} 35'$ de la declinación del horizonte respectivo.

En Lima $\phi = 12^{\circ}$ Sur: la luna pasa por el meridiano a 28° al Sur del ecuador, luego en Lima a 16° al Sur del cenit, y por lo tanto a $90 - 16 = 74^{\circ}$ de altura máxima sobre el horizonte austral. (Trácese la figura respectiva.)

§ 117. COMPLICACIONES EN LA ÓRBITA LUNAR.

1. **La órbita es una curva ondulada.** La forma verdadera de esta órbita no es una elipse cerrada, ni siquiera es una curva plana: para comprender sus complicaciones, basta recordar que la tierra adelanta en el espacio arrastrando consigo al satélite que gira entre tanto en torno de su planeta. La fig. 96 sirve tan sólo para formarnos una idea general de esta curva: TR es un arco de la

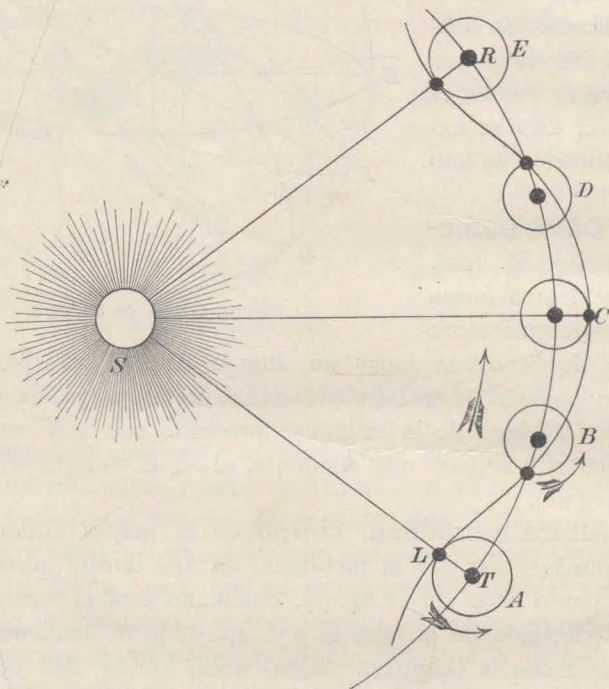


Fig. 96. Movimiento de la luna.

órbita terrestre entre dos conjunciones (para mayor claridad se ha trazado demasiado grande); las circunferencias representan la órbita aparente de la luna. Consideremos algunas posiciones principales.

En la posición A hay novilunio: la luna está entre el sol y la tierra. En B tenemos el primer cuarto: la luna está 90^0 a la izquierda del sol. En C hay oposición y luna llena. En D es el último cuarto, estando la luna a la derecha del sol. En E , luna nueva. Basta unir estos puntos por un trazo continuo para conocer que la órbita no es una curva cerrada, y se evidencia que la órbita verdadera es una *curva ondulada*, pero con una concavidad poco pronunciada, como lo indica con mayor exactitud la fig. 97. Lo

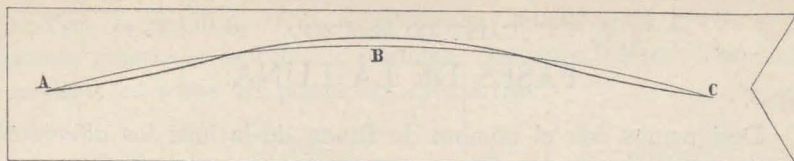


Fig. 97. Órbita del centro lunar (ABC)

notable es que esta órbita vuelve hacia el sol, *en todas sus partes*, la forma cóncava, y nunca la convexa.

2. Retrogradación de los nodos. Si marcamos sobre un globo celeste los puntos de observación durante unos dos años, hallamos que la inclinación de la eclíptica queda sensiblemente constante, notándose en cambio que la línea de los nodos NN' gira en torno del centro, en sentido retrógrado, por ejemplo de N a N'' (fig. 98). Este movimiento es análogo al de la precesión de los equinoccios, pero mucho más rápido: uno cualquiera de los nodos da la vuelta a la eclíptica en $18\frac{2}{3}$ años y $\frac{2}{3}$, período que es igual al de nutación. Para explicar esta retrogradación basta suponer que OR , eje de la órbita lunar, describe en torno del eje de la eclíptica un cono circular cuyo ángulo es de $5^{\circ} 8'$; el plano de la órbita, cambiando así de lugar, haría retroceder la línea de los nodos.

Nota. Es fácil determinar la posición de los nodos, porque en estos puntos la latitud es cero. Si las observaciones de dos pasos consecutivos de la luna por el meridiano dan dos latitudes de signos contrarios, es cierto que la luna ha pasado en el intervalo por el nodo: lo demás se consigue por cálculo.

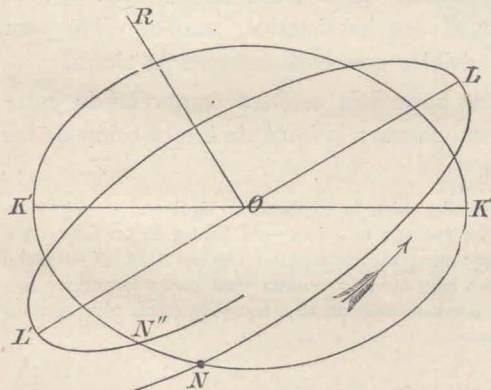


Fig. 98. Retrogradación de los nodos.

3. Una revolución sinódica del nodo es el tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos del sol por el mismo nodo ascendente: la duración es de 346,6 días, y por lo tanto se atrasa el nodo con respecto al sol cada año 18 días.

Fijándonos en la fig. 98 comprendemos que el año sideral del sol sea más largo que el año nódico, ya que el nodo se dirige al encuentro del sol. Los antiguos encontraron que 223 lunaciones forman casi 19 revoluciones sinódicas del nodo.

CAPÍTULO SEGUNDO.

FASES DE LA LUNA.

Designamos con el nombre de **fases** de la luna los diferentes aspectos que presenta nuestro satélite y que se reproducen periódicamente (φάσις de φαίνω, yo brillo). Sabemos que la luna no es luminosa por sí misma; del hemisferio que vuelve siempre hacia la tierra, no podemos ver más que aquella parte que recibe los rayos del sol. Para simplificar las explicaciones suponemos el plano de la órbita confundido con la eclíptica, por ser pequeña la inclinación; además suponemos que la tierra está inmóvil con respecto al sol y que los rayos de éste son paralelos entre sí en todas las posiciones de la luna.

Llámanse **círculo de iluminación**, la intersección circular que forma en la superficie de la luna un plano que pasa por el centro del astro y es constantemente perpendicular al radio vector solar TS (fig. 99); este círculo divide el globo en un hemisferio iluminado, y otro oscuro; su traza sobre el plano de la figura es AB , que permanece invariable durante la lunación.

Se da el nombre de **círculo de los contornos aparentes** a la intersección que forma con el globo lunar un plano que pasando por el centro es perpendicular al radio vector que va de la tierra al centro de la luna; este círculo, cuya traza es CD (fig. 99), es variable y divide el globo en dos hemisferios, uno invisible para nosotros y otro de por sí visible, que está frente a la tierra.

Huso es la parte de la superficie esférica comprendida entre dos círculos máximos que se cortan; la línea de intersección de los dos planos es un diámetro.

Advertencia. Imposible es entender bien la explicación siguiente, si el alumno no observa las fases principales durante una lunación. — Al hablar de las fases suele decirse que hay cambio en la luna; pero en realidad no cambia nada en el globo lunar: a causa de su revolución tan sólo ofrece a nuestra vista partes mayores o menores de su hemisferio iluminado; por lo mismo no se comprende cómo estos cambios podrían causar lluvias o buen tiempo.

§ 118. EXPLICACIÓN DE LAS FASES.

Vamos ahora a explicar los aspectos que ofrece la luna al observador en las posiciones principales de una lunación. Lo que nosotros vemos del disco lunar no es más que la proyección sobre un plano imaginario que pasa por el centro de la luna y es perpendicular a la recta que une el centro terrestre con el centro de la luna.

Para la explicación sirve la fig. 99, donde T es la tierra, el círculo grande es la órbita de la luna; los rayos solares se suponen paralelos en todas las posiciones del satélite.

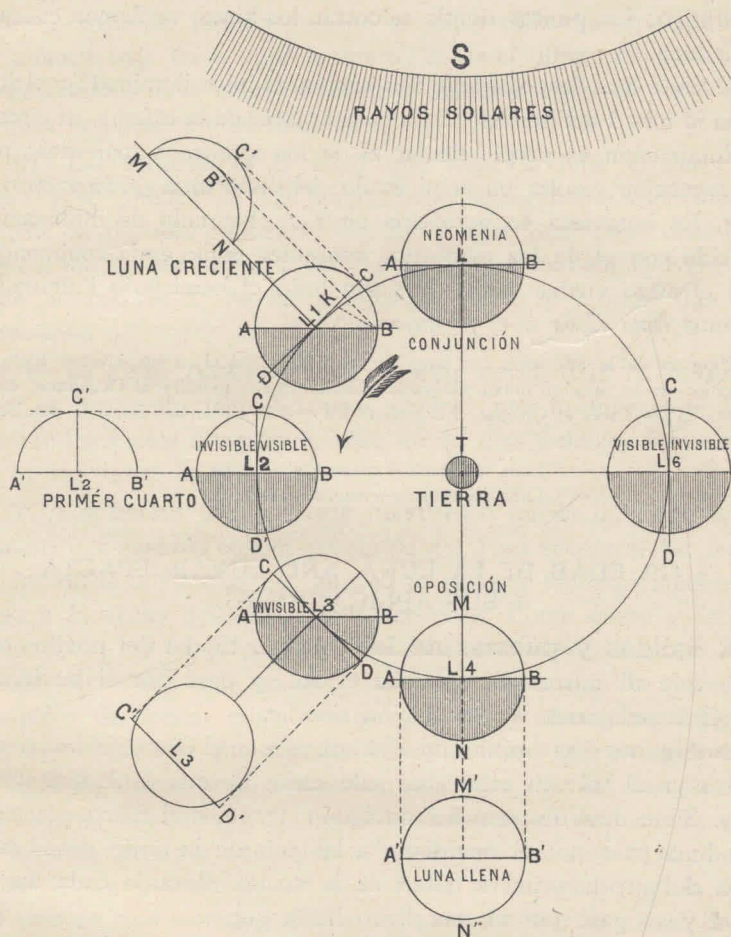


Fig. 99. Explicación de las fases de la luna.

AB es la traza del círculo de iluminación.

CD es la traza de los contornos aparentes.

1. Estando la luna en conjunción L , el hemisferio iluminado es del todo invisible para nosotros; el círculo de iluminación coincide con el de los contornos aparentes; tenemos *novilunio* (*neomenia* de los griegos).

Desde ahora la luna se aleja del sol hacia el Este y ofrece a la tierra porciones mayores de su hemisferio iluminado.

2. Pocos días después (en L_1) se hace visible un huso occidental, cuya proyección ortogonal es el sector circular CL_1B : que proyectamos en forma de hoz; el arco exterior es circular, el interior es elíptico; los puntos donde se cortan los arcos, se llaman cuernos de la luna.

3. Siete días después de la conjunción, el huso iluminado y visible forma la mitad del hemisferio (la cuarta parte de la esfera); el círculo de iluminación es perpendicular al de los contornos aparentes; por la proyección resulta un semicírculo del disco total (*primer cuarto*).

4. La luna está en oposición en L_4 ; el círculo de iluminación coincide con el de los contornos aparentes como en la conjunción; pero el astro vuelve hacia la tierra todo el hemisferio iluminado: tenemos *luna llena* o el *plenilunio*.

Después de la oposición las fases se reproducen en el orden inverso hasta el novilunio: en la primera mitad el borde circular luminoso mira al Occidente, en la segunda mitad hacia el Oriente. El período en que se hallan las fases, se manifiesta por los versos siguientes:

Luna creciente — cuernos al Oriente;

Luna menguante — cuernos adelante.

§ 119. EDAD DE LA LUNA. AÑO LUNAR. EPACTA Y SUS APLICACIONES.

I. **Salidas y puestas de la luna.** 1. El día del novilunio el astro sale al mismo tiempo que el sol, y pasa por el meridiano con él, concluyendo su revolución sinódica.

2. Algunos días después, la luna aparece en el Oeste del horizonte, puesto ya el sol: en estos días sale cada día más tarde que el sol.

3. Siete días después del novilunio, tenemos el cuarto creciente y la luna pasa por el meridiano a las seis de la tarde, alumbra la tierra durante la primera mitad de la noche. Retarda cada día su salida y su paso por el meridiano hasta que

4. en la oposición sale al Este cuando el sol se pone en el Oeste; pasa a media noche por el meridiano, quince días después del novilunio: tenemos la luna llena.

En los días siguientes la salida se atrasa 50 minutos siderales por día.

II. **Edad de la luna** es el número de días transcurridos desde el último novilunio. Observando la hora en que la luna pasa por el meridiano, se transforma la hora en minutos y se divide por 50; el resultado es la edad de la luna en días próximamente.

$$\text{Edad} = \frac{H \times 60}{50}$$

Si la luna pasa a las seis de la tarde por el meridiano, su edad es $6 \times 60 : 50 =$ siete días y cinco horas.

Explicación. El día del novilunio pasa la luna por el meridiano a mediodía juntamente con el sol, y cada día siguiente unos 50 minutos más tarde: por lo tanto, desde el último novilunio han pasado tantos días cuantas veces 50 minutos están contenidos en la hora del paso por el meridiano.

III. **La epacta** es la edad que tiene la luna el día 1º de enero y se publica en los almanaques; agregándole once días se obtiene la del año siguiente, porque el año lunar tiene once días menos que el año trópico. La epacta indica también la edad que tiene la luna el 1º de marzo, porque enero y febrero dan dos lunaciones.

IV. **El mes lunar** debería constar de 29 días 12 horas, lo cual es incómodo para los usos civiles: por lo mismo se hace constar los meses alternativamente de 29 días y de 30, formándose así el año lunar de 354 días.

V. **La fecha del primer novilunio** queda indicada por el número que sumado con la epacta da 31. Para encontrar las fechas de los otros novilunios del año basta agregar alternativamente 30 o 29 a la fecha del novilunio precedente. Como enero y febrero tienen $31 + 28 = 59$ días en los años comunes o sea dos lunaciones, y un día más en los bisiestos, resulta que la fecha del novilunio de marzo es la misma que la de enero, en los años comunes, y un día antes en los bisiestos. Con esto se comprende la regla siguiente para conocer en cualquier día del año la edad de la luna, aunque no con exactitud científica: se hace la suma de los tres términos siguientes: 1º la epacta del año; 2º el número de meses enteros transcurridos desde el 1º de marzo; 3º la fecha del mes en que estamos. (Si la suma es superior a 30, el exceso marcará la edad de la luna.)

Ejemplo. ¿Cuál es la edad de la luna el 25 de mayo, siendo VIII la epacta? Sumo 2 meses $+ 25 + VIII$, lo que da 35: la edad será de 5 días. — Del *ciclo lunar* se tratará en el § 126.

VI. **La luz cenicienta.** Estando la luna cerca de la conjunción y presentando una media luna muy delgada y luminosa, el resto del disco lunar no está completamente obscuro, como debería suceder; lo vemos alumbrado con una luz débil, que se llama luz cenicienta, cuyo origen es el siguiente. Los rayos solares que van directamente a la tierra, son reflejados en ésta y alumbran la luna por esta

reflexión. Estando la luna cerca de la conjunción, la tierra vuelve su hemisferio alumbrado por el sol hacia el satélite, en donde esos rayos sufren una segunda reflexión y vuelven a la tierra; pierden, pues, mucho de su intensidad, porque atraviesan dos veces la atmósfera terrestre.

El disco de la luna, alumbrado por la luz cenicienta, parece tener un radio algo más pequeño que la media luna luminosa; esto es debido al fenómeno de la irradiación, porque el brillo de la luz que emite un objeto rodeado de un fondo negro, agranda un poco la imagen. (Véase sobre esta materia un tratado de Óptica).

CAPÍTULO TERCERO.

ROTACIÓN Y LIBRACIONES DE LA LUNA.

§ 120. ROTACIÓN DE LA LUNA.

Es un hecho conocido desde los tiempos más remotos que la luna presenta invariablemente el mismo hemisferio a la observación de los habitantes de la tierra. A simple vista, se descubren ciertas manchas negras distribuidas de manera que la imaginación popular asemeja el aspecto del disco lunar al de un rostro humano. Estas manchas guardan su respectiva distancia entre sí y con las orillas del globo sin que se haya alterado jamás ni su forma ni su posición, de donde se evidencia que *la luna vuelve hacia nosotros*

siempre el mismo hemisferio. Los antiguos explicaban este hecho suponiendo que la luna no tenía movimiento de rotación; pero es fácil deshacer la equivocación, demostrando que el fenómeno es debido a la rotación del astro en torno de su eje ejecutada con la misma velocidad angular que la de la traslación; en otras palabras: *una rotación se efectúa en el mismo tiempo que una vuelta alrededor de la tierra.*

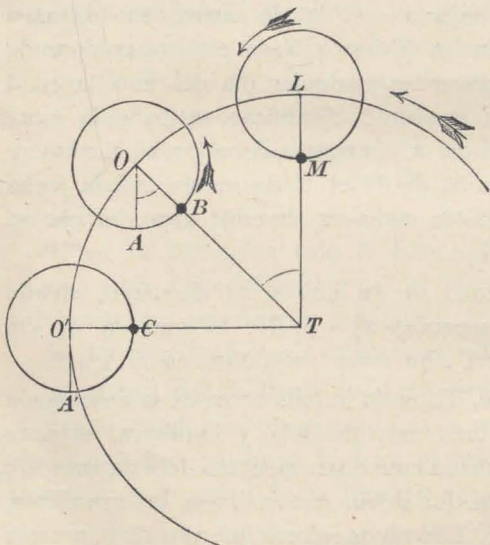


Fig. 100. Rotación de la luna.

Sea en la fig. 100 T la tierra, la curva $A'L$ parte de

la órbita lunar; L la posición en el plenilunio. Determinemos una mancha M , de forma característica, en un paralelo que representa la circunferencia, y que se proyecte en el centro. Si la luna no tuviese rotación, la mancha conservaría en el paralelo su posición invariable, de suerte que después de haber recorrido un arco de 45° en la órbita, la mancha debería verse en A y proyectarse hacia los bordes: pero en realidad se proyecta siempre hacia el centro, lo que prueba que la mancha y este punto del paralelo se han movido según el arco AB , esto es, el radio OA ha descrito el ángulo AOB , que es igual al ángulo OTM de traslación; lo mismo resulta en las demás posiciones de una lunación. Se deduce que la luna tiene movimiento de rotación y que ésta se ejecuta con la misma velocidad *media* que el movimiento de traslación; su duración es de $27^d 8^h$ próximamente.

Esta igualdad entre las dos duraciones debe ser rigurosamente invariable; si existiese una diferencia ligera entre la velocidad de rotación y la velocidad angular media del radio vector, nuestro satélite nos habría presentado sucesivamente diferentes partes de la superficie; las descripciones muy antiguas de este aspecto prueban lo contrario.

Nota. La demostración dada con respecto a una mancha puede aplicarse a un huso del globo lunar, manifestando cómo veríamos nuevos sectores en el disco, si el astro careciera de rotación, ya que el círculo del contorno aparente cambia de posición.

El *día sideral* de la luna es el tiempo transcurrido en una rotación, y dura 27 días y 8 horas terrestres; el día solar es el tiempo transcurrido entre dos pasos del sol por el mismo meridiano y dura 29 días 12 horas¹.

Hay **noche y día** en la luna por lo mismo que hay rotación, pero sus duraciones ofrecen pequeña variación, porque la línea de los polos tiene con la eclíptica una inclinación pequeña.

La noche lunar dura 13 días 16 horas; la claridad del día tiene la misma duración.

§ 121. LIBRACIONES DE LA LUNA.

Se ha dicho en el capítulo precedente, que desde la tierra no vemos más que la mitad del globo lunar y siempre el mismo hemisferio: el fenómeno ofrece, sin embargo, algunas modificaciones, que forman el objeto del presente párrafo.

¹ No se confunda este día con el día lunar terrestre, que consta de 24 horas 50 minutos.

La palabra *libración* deriva del latín *libra*, la balanza; en efecto, designamos con el nombre de libraciones el fenómeno de aparecer y desaparecer algunas partes polares y ecuatoriales de la superficie lunar, como si el globo tuviese un balanceo. Existe una libración en longitud y otra en latitud.

I. Libración en longitud. El movimiento de rotación es uniforme y sus velocidades son exactamente iguales al *valor medio* de la velocidad angular de traslación, pero no lo son en todos los instantes, porque el último movimiento no es uniforme; es mayor en el perigeo que en el apogeo; de lo cual resulta que el ángulo

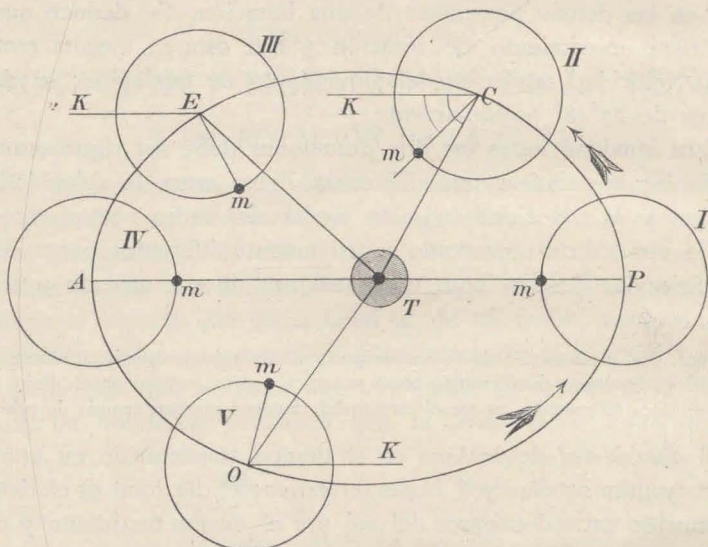


Fig. 101. Libración en longitud.

de rotación es unas veces más pequeño y otras veces más grande que el ángulo descrito en el mismo tiempo por el radio vector.

La elipse de la fig. 101 representa la órbita lunar; en uno de sus focos, T (la tierra), suponemos el observador mirando a la luna. Consideremos una mancha que se proyecta en el centro del disco tanto en el perigeo P como en el apogeo A . En la posición II, pocos días después de haber dejado la luna el perigeo, la mancha debía proyectarse en la dirección TC ; pero siendo la velocidad de traslación mayor que la de la rotación, la mancha no puede caer sobre TC , sino más bien a la izquierda, según Cm , porque el ángulo $KCT = CTP$ debe ser mayor que KCm .

En la posición III la velocidad de traslación empieza a menguar: la mancha caerá dentro del ángulo KET acercándose al

radio vector, y en el apogeo A se proyecta de nuevo sobre el centro.

El ángulo de rotación se hace ahora mayor que el de traslación.

En la posición V la mancha caerá fuera del ángulo $TOK = ATO$, a la derecha del radio vector, porque $mOK > TOK$. Lo mismo sucede en otras posiciones desde el apogeo hasta el perigeo, acercándose poco a poco la mancha al radio vector y volviendo a coincidir con él en el perigeo. Este movimiento de oscilación aparente se comunica a todos los puntos de la superficie lunar; pero se hace

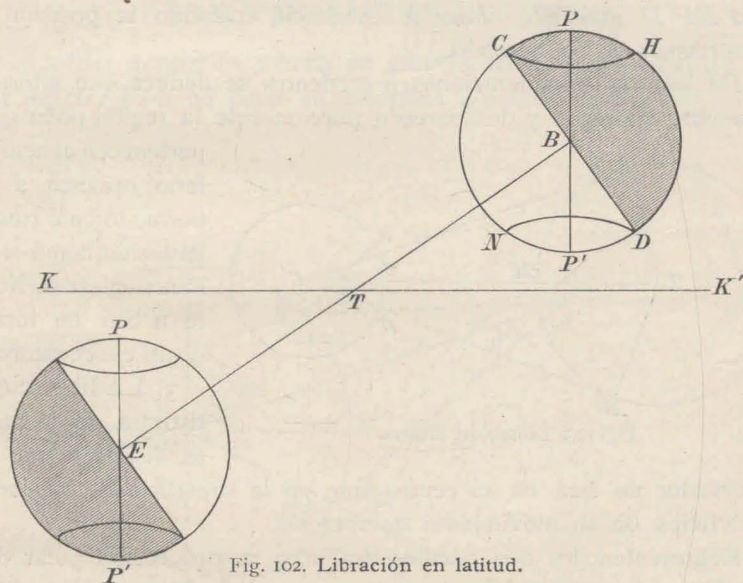


Fig. 102. Libración en latitud.

más sensible en las orillas ecuatoriales, donde el desvío puede llegar a 8° , de manera que de una y otra parte del hemisferio (de por sí invisible en el apogeo y perigeo) alcanzamos a descubrir en otras épocas un huso cuyo ángulo forma 8° : la amplitud total de esta libración corresponde a $\frac{1}{7}$ del diámetro aparente.

2. Libración en latitud. Esta libración consiste en el fenómeno de aparecer y desaparecer alternativamente manchas o husos situados en la vecindad de los polos, de manera que la luna parece columpiarse alrededor de un eje paralelo a la eclíptica; es pues un movimiento aparente oscilatorio en dirección perpendicular a la libración longitudinal.

En la fig. 102 representa T el centro de la tierra, los círculos B y E son meridianos de la luna; KK' es la traza del plano de

la eclíptica, BE la del plano de la órbita lunar; CD la traza del círculo de los contornos aparentes, perpendicular a TB .

1. Estando la luna en B , su mayor latitud boreal, CD no puede coincidir con el eje; la porción polar boreal CPH se hace invisible, pero la porción austral $NP'D$ es visible.

2. En la mayor latitud austral la porción boreal mencionada se vuelve visible, la del Sur invisible.

3. Estando el centro lunar en la eclíptica, por ejemplo en K' , el círculo de los contornos aparentes CD pasa por el eje, siendo perpendicular a TK' ; en este caso el huso CBP se hace visible, pero $BP'D$ invisible, como se evidencia trazando la posición y conservando el eje paralelo.

De las tres consideraciones precedentes se deduce que alternativamente aparecen y desaparecen porciones de la región polar que

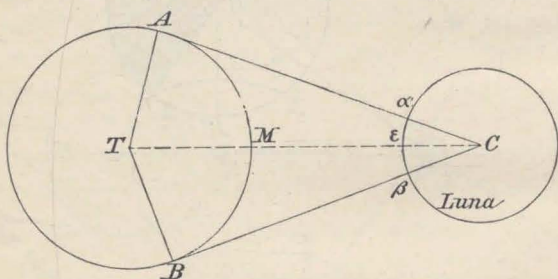


Fig. 103. Libración diurna.

pertenecen al hemisferio opuesto a la tierra, lo cual causa la ilusión como si la luna oscilase de Norte a Sur en torno de un eje ecuatorial.

3. La libración diurna de la luna es debida a que el

observador no está en el centro sino en la superficie de la tierra y participa de su movimiento de rotación.

Representen los dos círculos (fig. 103) la proyección polar del ecuador o de un paralelo de la tierra y de la luna y adoptemos en la explicación una noche de plenilunio.

1. Cerca de las siete de la tarde el observador en A proyecta la mancha α al centro, teniendo las manchas ϵ y β hacia el Oeste; β es casi invisible.

2. A media noche el observador en M proyecta la mancha ϵ al centro, α está al Este, β al Oeste.

3. Hacia las seis de la mañana el observador en B proyecta β al centro, las otras dos están al Este.

Estas alternativas producen la ilusión como si la luna tuviese una oscilación en longitud, de Este a Oeste, haciéndose visible un huso estrecho del hemisferio que sin esta circunstancia sería invisible.

Si el observador estuviese en el centro de la tierra, se comprende que las tres manchas quedarían visibles durante toda la

rotación de la tierra, guardando siempre la misma posición respectiva. Esta libración es de escasa importancia por ser tan sólo de un grado.

Por el conjunto de las tres libraciones resulta que tan sólo las tres séptimas partes del globo lunar quedan siempre invisibles.

CAPÍTULO CUARTO.

ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE LA LUNA.

§ 122. PARALAJE DE LA LUNA.

¿Cómo desde la tierra se puede medir la paralaje de un astro? Para no dejar en completa ignorancia sobre este punto

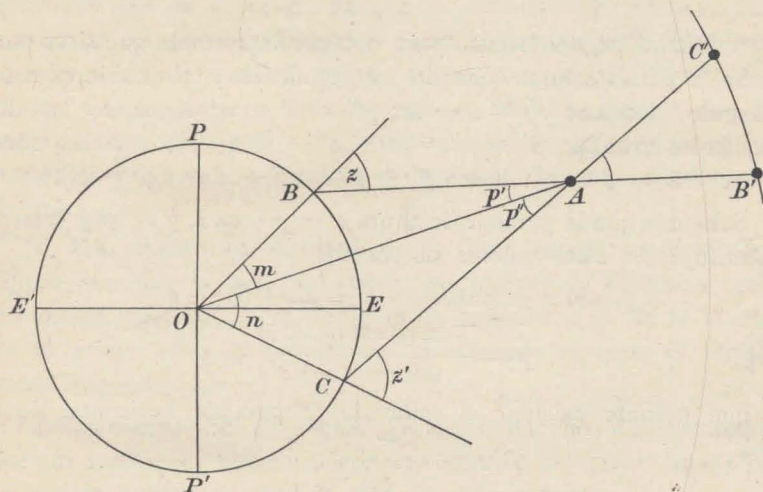


Fig. 104. Paralaje de la luna.

a los alumnos, daremos con toda la sencillez posible la idea fundamental del método que sirve para determinar la paralaje de la luna.

En la fig. 104 representan el círculo un meridiano terrestre, el punto A el centro de la luna, B y C dos puntos de observación, situados sobre el mismo meridiano, en distintos hemisferios y a gran distancia el uno del otro. Como la luna pasa por el mismo meridiano, se miden sus distancias cenitales a la misma hora (z y z'); las latitudes $\angle BOE + COE = \varphi + \varphi'$ son conocidas; p' y p'' son las paralajes de altura que se buscan.

Construcción. Trazo la circunferencia y el ecuador OE ; formo con las dos verticales el ángulo $BOC = \varphi + \varphi'$; en B y en C

aplico las distancias cenitales z y z' , que son ángulos conocidos, los lados no verticales se cortarán en A ; finalmente unimos O con A . Midiendo el $\sphericalangle p' = BAO$ con el transportador obtenemos la paralaje de altura: la paralaje horizontal es $p = p' \cdot \sin z$.

Valor medio: $57'$. (Máximum $61' 24''$; mínimum $53' 34''$.)

Téngase presente que las dos normales OB y OC en realidad no se cortan en el centro terrestre; por lo mismo los astrónomos usan este método perfeccionado para determinar la paralaje de los planetas.

Nota. En 1903 dos astrónomos norteamericanos, establecidos en el cerro San Cristóbal, cerca de Santiago de Chile, determinaron la paralaje de la luna en combinación con un observatorio de los Estados Unidos situado sobre el mismo meridiano. En 1756 hicieron esta medida Lalande y Lacaille, aquél en el cabo de Buena Esperanza, éste en Berlín.

*[Cálculo trigonométrico para obtener la fórmula que sirve para medir la paralaje lunar. Siendo los ángulos z y z' exteriores a un triángulo, tenemos $p' = z - m$; $p'' = z' - n$; sumando las dos igualdades resulta: $p' + p'' = z + z' - (m + n)$; pero la suma de $m + n = \varphi + \varphi'$, luego $p' + p'' = z + z' - (\varphi + \varphi')$.

Sabemos que la paralaje de altura $p' = p \cdot \sin z$, y $p'' = p \cdot \sin z'$. Substituyendo estos valores obtenemos

$$p (\sin z + \sin z') = z + z' - (\varphi + \varphi');$$

$$\text{luego} \quad p = \frac{z + z' - (\varphi + \varphi')}{\sin z + \sin z'},$$

lo que permite calcular el valor de la paralaje horizontal de la luna.]

§ 123. DISTANCIA Y DIMENSIONES DE LA LUNA.

1. **La distancia** del centro de la luna al centro de la tierra se calcula por medio de la paralaje, adoptando por valor $p = 60' = 3600''$ (valor aproximado); $d = \frac{206\,265}{3600} R' = 57$ radios terrestres; éstos forman unas 90000 leguas de a 4 *km*. Las distancias varían entre 56 y 63 (apogeo) radios terrestres.

Nota. Esta distancia de los centros depende solamente de la posición que ocupa la luna en su órbita; pero la distancia del centro de la luna a un punto de la superficie terrestre es variable en virtud de la rotación diurna. Para un observador colocado en A (fig. 103) la luna C está en el horizonte y la distancia es próximamente igual a la de los centros; pero si la luna está en el cenit del observador M , la distancia es de un radio terrestre menor que la de los centros.

2. **El diámetro aparente.** Practicando las medidas en la fase de plenilunio de la manera como se ha indicado relativamente al sol, resulta que el disco de la luna es circular y el globo sensiblemente esférico. Si el observador está en B (fig. 104) y el centro lunar en A , debe la medida del diámetro aparente reducirse a la relación de AB con AO para obtener este diámetro medido desde el centro de la tierra. Su valor medio es de $31' 30''$; pero los valores reales varían entre $29' 26''$ y $33' 34''$; estos últimos no difieren mucho de los valores obtenidos para el sol; el valor medio es inferior al diámetro aparente medio del sol.

Sabemos que el disco lunar nos parece mayor en el horizonte que en el cenit. Esta ilusión no corresponde a la variación del diámetro aparente, puesto que éste en realidad es menor en el horizonte que en el cenit, ya que la distancia del observador es mayor: la disminución alcanza a medio minuto de arco. Hemos explicado esta ilusión en el tratado sobre la atmósfera terrestre, diciendo que se debe a la comparación con los objetos que hay entre nuestra vista y el astro, cuando éste se encuentra en el horizonte; mientras que, hallándose el mismo en el cenit, no hay puntos de comparación.

3. **La distancia cenital** de la luna puede medirse, cualquiera que sea la fase del astro: se obtiene la distancia cenital del centro observando la de la orilla superior o la de la inferior; en el primer caso se agrega, en el segundo se resta el semidiámetro aparente.

4. **Tamaño de la luna.** Para calcular las dimensiones de nuestro satélite es necesario conocer el *radio del globo lunar*; para lo cual la unidad de medida será el radio terrestre.

Cuando dos astros se ven desde la *misma* distancia, sus diámetros y por lo tanto sus radios verdaderos son sensiblemente proporcionales a sus diámetros o radios aparentes. Sabemos que el semidiámetro aparente de la luna es $15'$; el radio terrestre aparente o paralaje lunar es de $57'$, luego $R' : R = 15 : 57$. Simplificando por 5 la razón $15 : 57$, se obtienen $\frac{3}{11}$. Luego el radio de la luna es las $\frac{3}{11}$ partes del de la tierra, o un poco más que su cuarta parte.

De donde se sigue que los volúmenes son entre sí como $3^3 : 11^3$, lo que da próximamente $\frac{1}{50}$; en otras palabras: 50 globos del tamaño de la luna equivalen al volumen del globo terrestre.

CAPÍTULO QUINTO.

CONSTITUCIÓN FÍSICA DE LA LUNA.

§ 124. ASPECTO DE LA LUNA.

Por ser la distancia de la luna relativamente pequeña se ha podido examinar la configuración del hemisferio visible con ayuda de poderosos telescopios, como si el astro estuviese a 15 leguas de distancia. Para la orientación hemos de recordar que al pasar nuestro satélite por el meridiano, en el hemisferio austral el punto más cercano al

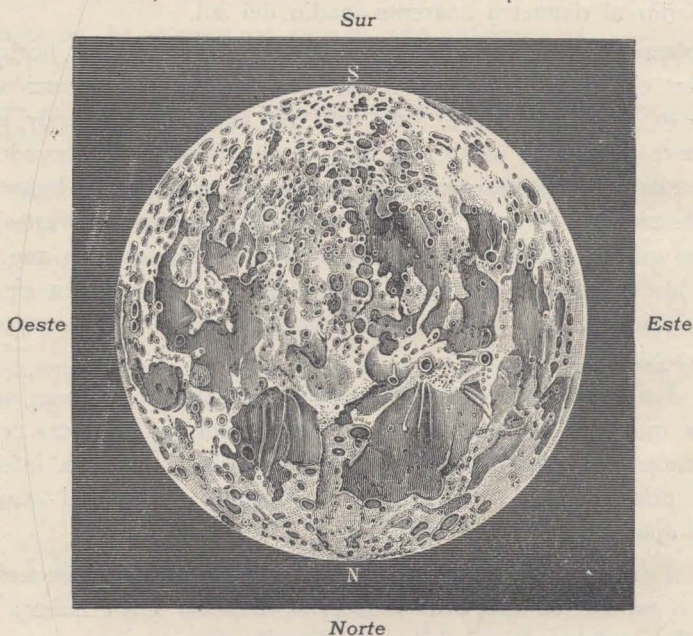


Fig. 105. La luna.

cenit es el Sur, el más lejano es el Norte, hallándose el Este a nuestra derecha y el Oeste a la izquierda; pero en los telescopios se ofrecen invertidos estos puntos y lo mismo sucede en aquellos mapas lunares que suelen dar la proyección ortográfica del hemisferio sobre el plano del disco tal como se presenta en los anteojos. Estos mapas tienen meridianos y paralelos *lunares* a semejanza de los mapas del globo terrestre, divididos en grados que corresponden a las longitudes y latitudes geográficas de la luna.

1. **Llanuras.** A simple vista descubrimos en el disco lunar unas manchas oscuras de variadas dimensiones y más numerosas en el hemisferio boreal (fig. 105).

Los primeros selenógrafos creyeron que las manchas eran mares y lagos, considerando las partes más luminosas como continentes; este es el origen de los nombres: mar del frío, mar de la serenidad, etc., con que designaban las manchas.

Pero esta opinión está refutada y abandonada conservándose sin embargo las denominaciones: veremos en otro párrafo que la existencia del agua es imposible en la luna.

Las manchas no son mares sino grandes *llanuras*, mientras que las partes brillantes en su derredor se deben a las *montañas*, cuyas cúspides reciben los rayos solares. Las manchas guardan siempre el mismo sitio y la misma forma: lo cual prueba que están adheridas a la parte sólida del globo y no son nubes. Las desigualdades en la claridad que ofrecen, manifiestan la diferencia y variedad del terreno que forma la envoltura del satélite. Finalmente subsisten las manchas en el plenilunio, y si fuesen efecto de las sombras que proyectan las montañas, deberían desaparecer en el momento de ser vertical la proyección de la montaña. Las llanuras forman las $\frac{3}{5}$ partes del disco visible.

El mar de las crisis es una mancha casi circular y aislada, situada al Oeste, un poco al Norte, rodeada de un fondo luminoso: después del novilunio es la primera en aparecer y, después del plenilunio, la primera en desaparecer.

El océano de las tempestades se halla cerca de la orilla oriental, y es la última mancha que aparece y desaparece con las fases.

El mar del frío está situado cerca del polo Norte.

El mar de la serenidad, al Este del de las crisis, se encuentra algo hacia el Norte y es de bastante extensión.

2. Montañas en la luna. Cuando nuestro satélite tiene la forma de media luna, se ve, con ayuda de un anteojo, que la línea interior de la media luna, en vez de ser tersa como la línea exterior, presenta partes dentadas que acusan desigualdades en las alturas del terreno. En la parte oscura, a corta distancia de la línea de iluminación, se distinguen puntos brillantes aislados; éstos son cimas de montañas, alumbradas todavía por los rayos del sol, mientras que la llanura circundante está en la sombra.

Examinando con un anteojo la parte iluminada del disco lunar se distinguen las sombras proyectadas por las montañas; tienen la forma de manchitas negras dirigidas en sentido de la parte opuesta al sol, y son tanto más oblongas, cuanto más oblicuamente caen los rayos solares sobre la luna: por medio de la longitud de las sombras, que se mide con el retículo micrométrico del anteojo, se

calcula en general la altura de la montaña. *Galileo* fué el primero que reconoció y midió las montañas lunares. En nuestro planeta el término de comparación para las alturas es el nivel del mar; pero en la luna éstas pueden referirse tan sólo a la llanura de la cual se destacan los picos. En la luna no hay cadenas de montañas; los montes son aislados, sea en medio de la llanura, sea que se hallen situados sobre sus contornos, lo que sucede en el mayor número de los casos.

El monte de Leibniz y el de Dörfel tienen 8000 *m* de elevación cada uno, o sea la 227ª parte del radio lunar; siendo así que el Gaurisancar en las Indias Orientales tiene solamente la 420ª parte del radio terrestre, se sigue que las alturas relativas de las montañas en la luna son mayores que las terrestres.

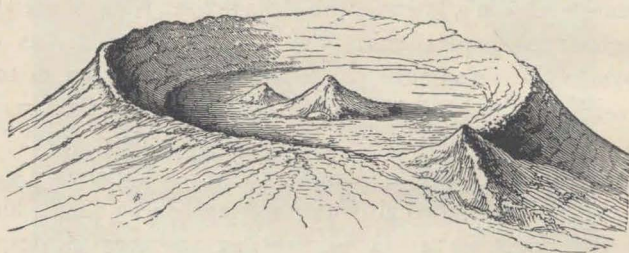


Fig. 106. Un cráter de la luna.

3. **Volcanes.** Las montañas son muy numerosas en nuestro satélite, pero la mayor parte presentan el carácter volcánico y se parecen a los volcanes apagados de la Auvernia; sin embargo en el hemisferio visible para nosotros, no se descubre ninguna montaña que dé señales de erupciones volcánicas. Su constitución geológica es en gran número de casos la siguiente: Son montañas cónicas en cuyo centro se abren cráteres anchos y profundos; en el cráter se ve la sombra proyectada por el borde situado del lado del sol, lo que prueba la existencia de una *excavación*.

El fondo del cráter es más bajo que el nivel de la llanura exterior, y el anillo de la circunvalación del cráter tiene una masa tanto mayor cuanto más profunda es la excavación, lo que permite suponer que la circunvalación es debida a las lavas vomitadas por el cráter. Los volcanes lunares presentan la particularidad de que del fondo de los cráteres más anchos se eleva ordinariamente un pequeño cerro de forma cónica, que ha surgido en el centro del volcán primitivo (fig. 106). Los volcanes de la luna son en general mucho más grandes que los volcanes terrestres.

El volcán Tycho tiene un cráter de 85 000 *m* de diámetro; su profundidad es de 5000 *m* y en su centro se eleva un cono de 1500 *m* (el Etna en Sicilia no tiene más que 3500 *m* de diámetro). El cráter Bernoulli tiene 26 000 *m* de abertura y 5800 *m* de profundidad.

§ 125. AUSENCIA DE LA ATMÓSFERA.

1. El mejor argumento para probar que la luna está desprovista de una atmósfera, se deduce *de la ocultación de las estrellas*. Pasando la luna por delante de una estrella nos oculta la estrella durante algún tiempo. Si la luna carece de atmósfera, la ocultación comienza y se acaba exactamente en el momento en que el disco de la luna toca la recta que va de la vista del observador a la estrella; la duración de la ocultación, calculada por medio del movimiento lunar, correspondería exactamente a la observada. Al contrario, si existe una atmósfera alrededor del globo lunar, el tiempo de la ocultación resulta disminuído; porque los rayos luminosos que, viniendo de la estrella, tocan la orilla lunar, son refractados por la atmósfera y nos llegan algún tiempo después de comenzada la ocultación teórica y algo antes de concluída. Ahora bien: las observaciones más exactas manifiestan que la ocultación se efectúa siempre conforme al tiempo teóricamente calculado; luego carece la luna de atmósfera, o si la tiene, puede asimilarse al vacío producido en las mejores máquinas neumáticas.

2. Un observador mirando desde la luna a la tierra vería una parte iluminada por el sol y otra en la obscuridad; pero de por medio, entre las dos partes, habría una porción en que la luz disminuiría gradualmente a causa del crepúsculo, que es efecto de la atmósfera. En el disco lunar se ve que la parte luminosa y la oscura se juntan *bruscamente* siguiendo una línea sinuosa; luego no hay crepúsculo y por lo tanto tampoco atmósfera.

Consecuencia. Si no hay atmósfera en la luna, tampoco existen agua ni cerros cubiertos de nieve: porque si los hubiera, el agua se evaporaría formando nubes, cuya presencia se manifestaría fácilmente; se sigue también que la vegetación es imposible.

Es por lo tanto muy fundada la opinión de que nuestro satélite carece de selénitos, esto es, habitantes lunares (*selene* en griego significa la luna).

*§ 126. CICLO LUNAR; EL ÁUREO NÚMERO.

Sabemos que entre muchos pueblos la base del calendario era el movimiento de la luna; por ejemplo, en la antigüedad entre los

judíos y los griegos, y en nuestros tiempos entre los turcos y árabes. Metón de Atenas fué el primero que 423 años antes de la era cristiana hizo conocer el hecho de que 225 lunaciones formaban 19 años trópicos, siendo la duración de cada lunación 29,53 días. (El año de 12 lunaciones se compone de 354,46 días.) Este descubrimiento fué escrito en letras de oro sobre una columna de mármol en Atenas (*áureo número*). *El ciclo lunar o período de Metón significa, pues, que cada 19 años las fases de la luna se reproducen en los mismos días del año.* Si por ejemplo el 20 de marzo hay plenilunio, éste volverá a caer en el 20 de marzo después de 19 años.

Para tener un punto de partida del áureo número se estableció por convenio que el primer año del ciclo era aquel en que la luna nueva coincidió con el 1º de enero, lo cual sucedió un año antes de nuestra era; de suerte que el segundo ciclo principió el año 18, y el tercero el año 37. Para encontrar *el áureo número, esto es, el número que indica el año del ciclo en que estamos*, para un año cualquiera, se agrega 1 a este año, v. gr. $1920 + 1 = 1921$; este número se divide por 19 y el residuo es el áureo número: 2 para el año 1920; después de 17 años o sea en 1938 comienza el primer año de otro ciclo y las fases vuelven a coincidir con las fechas del año 1918.

La epacta se ha explicado en el § 119.

§ 127. PASCUA DE RESURRECCIÓN.

Los judíos celebraban su fiesta conmemorativa de la salida de Egipto el sábado que seguía al primer plenilunio después del equinoccio de marzo. Refieren los santos Evangelios que Nuestro Señor Jesucristo resucitó el primer día después de este sábado. Por esta razón, el Concilio de Nicea dispuso que la fiesta de la Pascua de Resurrección se celebrase en toda la Iglesia católica el primer domingo después del plenilunio que sigue inmediatamente al equinoccio de Aries.

Lo más temprano que puede caer la Pascua es el 22 de marzo; lo que sucederá si, teniendo lugar el equinoccio el 20 de marzo, el 21 cae en plenilunio y el 22 es día domingo. Lo más tarde que puede caer es el 25 de abril; lo que sucederá si el 20 de marzo cae en plenilunio, en cuyo caso hay que aguardar la lunación siguiente, que es el 18 de abril, y si este plenilunio cae en día domingo, hay que aguardar hasta el domingo siguiente, que es el 25. Esto fué lo que sucedió el año 1887.

Fiestas movibles. Las fiestas movibles son las que no caen siempre en las mismas fechas del año. Entre las fiestas movibles, la más importante es la Pascua. Determinada la Pascua, quedan determinadas todas las otras, teniendo presente que:

El domingo de Septuagésima cae	63 días antes.
Miércoles de Ceniza	» 45 »
Ascensión	» 40 días después.
Pentecostés	» 50 »
Santísima Trinidad	» 57 »
Corpus Christi	» 60 »

Nota. Como la muerte del divino Redentor aconteció la víspera de la gran fiesta mencionada de los judíos, es evidente que las tinieblas de que hace mención el Evangelio no pueden atribuirse a un eclipse natural de sol, que es imposible en la época del plenilunio.

LIBRO SÉPTIMO.

FENÓMENOS DEBIDOS AL MOVIMIENTO DE LA LUNA.

Explicaremos en este libro los eclipses de sol y de luna, que son originados por el movimiento de traslación de la tierra en torno del sol y de la luna alrededor de la tierra. En segundo lugar explicaremos el fenómeno de las mareas, debido a la rotación de la tierra y al movimiento real de la luna.

CAPÍTULO PRIMERO.

ECLIPSES EN GENERAL Y ECLIPSES DE LUNA.

§ 128. CONDICIONES GENERALES.

Designamos con la palabra «eclipse» el fenómeno de hacerse invisible el sol o la luna por una causa extraordinaria. También las estrellas se hacen invisibles al pasar la luna delante de ellas; pero en este caso se usa más bien la palabra «ocultación».

Hay eclipse de luna cuando ésta no puede recibir rayos solares por la interposición de la tierra entre el sol y la luna, dejando el satélite de ser visible para nosotros: este eclipse tiene lugar en las épocas de la *oposición*.

Hay eclipse de sol cuando la luna se interpone entre este astro y la tierra, ocultando a nuestra vista el disco solar total o parcialmente: este eclipse sólo puede efectuarse en las épocas en que la luna se halla en *conjunción*.

Si la órbita lunar coincidiese con el plano de la eclíptica, los centros del sol, de la tierra y de la luna se hallarían en línea recta cada vez que hubiese sicigias, y tendríamos eclipse solar en cada conjunción y eclipse de luna en cada oposición. En realidad la órbita lunar no coincide con el plano de la eclíptica, sino que forma con este plano un ángulo de $5^{\circ} 8'$, de donde resulta la menor frecuencia de los eclipses. Para que tenga lugar un eclipse

no basta, pues, que la luna esté en una de las sicigias: es necesario además que se halle cerca de la eclíptica y por consiguiente a poca distancia de uno de sus nodos. Veremos más adelante las condiciones particulares de esta distancia para cada uno de los dos eclipses: por ahora recordaremos tan sólo que habitualmente la luna entra en conjunción u oposición a alguna distancia del nodo, pero que a veces en el momento de las sicigias la luna está en un nodo o a lo menos tan cerca de él, que los centros de los tres astros se hallan sensiblemente unidos por la línea de los nodos, de suerte que un eclipse se hace posible.

§ 129. ECLIPSES DE LUNA. CONO DE SOMBRA,

En la fig. 107 sea S el sol, T la tierra y la circunferencia M la órbita lunar. Si la tangente BC , común al sol y la tierra, da

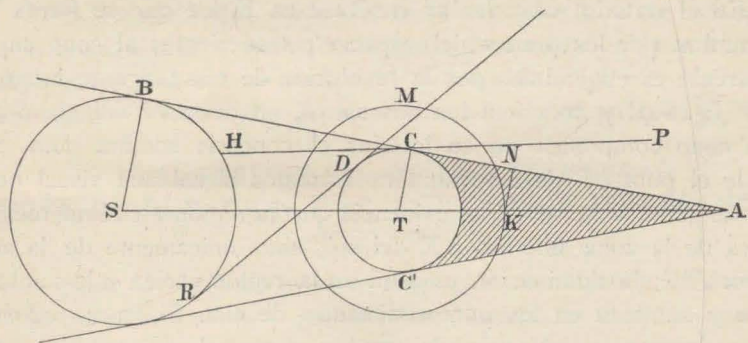


Fig. 107. Eclipse de luna.

vuelta en torno del eje SA , formará un cono de base circular cuya cúspide es A ; la interposición de la tierra es la causa porque los rayos solares no pueden penetrar en la sección CAC' del cono: este es el cono de sombra. Si la luna penetra por completo en esta sombra en tiempo de la oposición, se hace invisible, por no estar iluminada por los rayos del sol.

Siendo el radio de la órbita lunar igual a 60 radios terrestres, y la longitud del cono de sombra unos 216 radios terrestres, es evidente que la inmersión de la luna en esta sombra es posible. Por otra parte, el radio de una sección del cono de sombra a una distancia igual al radio de la órbita lunar, mide $\frac{8}{11}$ partes del radio terrestre, y el radio de la luna sólo $\frac{3}{11}$ partes: luego cabe toda la luna en esta parte de la sombra, esto es, es posible un eclipse total.

[1. *Cálculo de la longitud $AT=l$ del cono de sombra (fig. 107).* La distancia $ST=d$ entre el sol y la tierra es conocida; siendo

BC la tangente común, los ángulos en B y C son rectos; luego el triángulo ABS es semejante al ACT y por lo tanto: $\frac{R}{R'} = \frac{d+l}{l}$;

componiendo por diferencia $\frac{R-R'}{R'} = \frac{d}{l}$;

luego
$$l = \frac{d}{R-R'} \times R' = 216 R'.$$

2. A la distancia $TK = d'$, que es el radio de la órbita lunar, hago pasar un plano paralelo a la base del cono, denotando con x el radio de esta sección. La longitud $AK = l - d'$; por ser NK paralela a TC , tenemos que $\frac{x}{R'} = \frac{l-d'}{l}$; $x = \frac{156}{216} R' = \frac{8}{11} R'$.]

§ 130. ECLIPSE PARCIAL. LA PENUMBRA.

En el tratado sobre la luz enséñase en Física que se forma la penumbra por los puntos del espacio pertenecientes al cono cuya superficie es engendrada por la revolución de una tangente interior RD (fig. 107) y común a los dos astros, en derredor del eje ST : este cono comprende en su interior el cono de sombra pura. Si desde el punto P de la penumbra trazamos al sol una visual que sea tangente a la tierra, se evidencia que la región PCA no recibe rayos de la zona inferior HR del sol, sino únicamente de la superior HB ; la iluminación es débil en la región vecina a la sombra pura y aumenta en los puntos distantes de ella. Si, pues, todo el globo lunar se sumerge en la sombra pura, el eclipse es total; pero si en virtud de circunstancias particulares sólo una porción del disco se oculta en la sombra, quedando la otra parte en la penumbra, el eclipse es parcial; mas tanto en uno como en otro caso la luna penetra primero en la penumbra perdiendo poco a

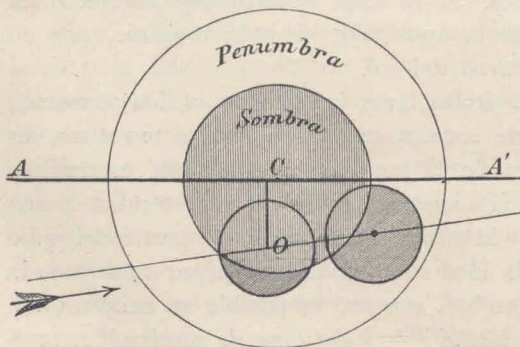


Fig. 108. Eclipse parcial de luna.

poco su brillo, y al salir del cono de sombra lo recobra al estar fuera de la penumbra. Por esta causa se comprende que es muy difícil observar con exactitud el principio y el fin del fenómeno; de donde resulta que los eclipses de luna no sirven para determinar exactamente la

longitud geográfica. Como la luna se mueve del Oeste al Este en su órbita, se sigue que la orilla oriental del satélite es la que primero entra en la sombra.

La fig. 108 manifiesta la relación que hay entre la distancia OC de la órbita lunar al eje AA' del cono de sombra con la sección del cono y el radio de la luna para el caso de un eclipse parcial o total.

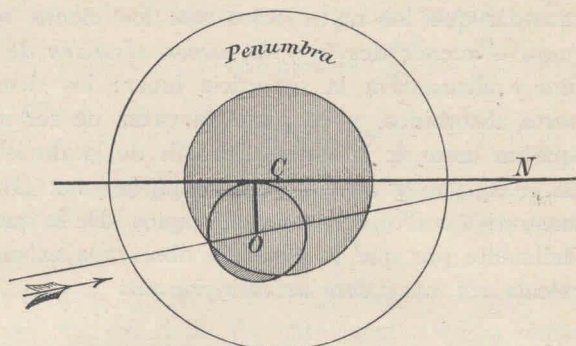


Fig. 109. Eclipse total de luna.

Si la distancia más corta OC es menor que la suma del radio de la sección más el radio de la luna, ésta entra en la sombra y habrá eclipse; el eclipse será total cuando $OC < R - r$ (fig. 109), denotando por R el radio de la sombra y por r el radio de la luna.

§ 131. INFLUENCIA DE LA ATMÓSFERA SOBRE LA DURACIÓN Y EL ASPECTO DE LOS ECLIPSES DE LUNA.

A pesar de hallarse la luna sumergida en el cono de sombra conforme a los cálculos precedentes, sucede en realidad que el disco lunar permanece algo visible presentando un aspecto rojizo oscuro; además, la duración observada no corresponde a la que teóricamente se calcula. Veamos ahora cómo este fenómeno es debido a la refracción atmosférica terrestre.

Sabemos que el cono de sombra proviene de la interposición del núcleo sólido del globo terrestre; pero es evidente que multitud de rayos solares atraviesan nuestra atmósfera en todo el contorno de la tierra. Sucede, pues, que estos rayos, tanto en su entrada como en su emergencia, sufren una refracción desviándose cada vez más hacia el eje del cono de la sombra, como es fácil evidenciarlo trazando una figura conforme al principio fundamental de la refracción: de esta manera se reduce notablemente la longitud del cono de sombra, y parte de los rayos solares encuentran el hemisferio de la luna. Por efecto de esta refracción un observador colocado en la luna podría ver todavía gran parte del disco solar a pesar de la inmersión completa del satélite. La iluminación es muy débil, porque los rayos solares, habiendo atravesado capas espesas de

nuestra atmósfera, han perdido mucho de su intensidad. Para explicar *el aspecto rojizo* que presenta la luna en un eclipse, basta recordar que los rayos rojos son los menos refrangibles: sufren, pues, el menor desvío y *la menor absorción* de parte de la atmósfera y alcanzan a la superficie lunar; los demás colores son en parte absorbidos, y en parte, a causa de ser más refrangibles, se apartan tanto de la normal al salir de la atmósfera, que se pierden en el espacio y no alcanzan hasta la luna. (Hágase la figura demostrativa conforme a estos principios.) De lo que precede se deduce fácilmente por qué la duración observada es menor que la que se calcula *sin hacer caso de la refracción*.

CAPÍTULO SEGUNDO.

ECLIPSES DE SOL.

§ 132. SOMBRA PROYECTADA POR LA LUNA.

Al interponerse el globo lunar entre el sol y la tierra, proyectará un cono de sombra cuya cúspide se dirige hacia la tierra: en

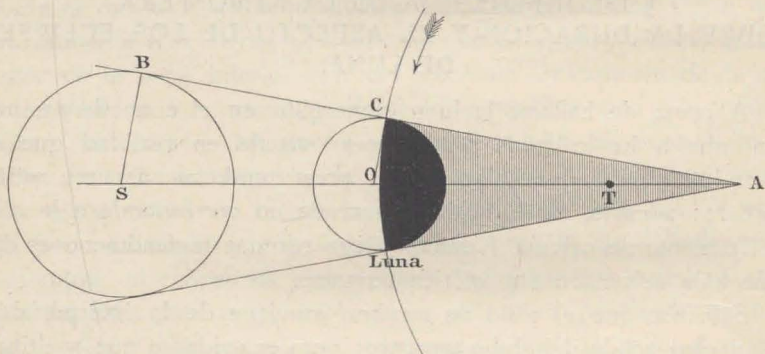


Fig. 110. Sombra proyectada de la luna.

el caso de tener esta sombra suficiente longitud, producirá en alguna zona limitada de la tierra una especie de mancha, desde cuyos puntos interiores el rayo visual del observador no puede ver el disco solar, porque lo impide el globo lunar interpuesto. Manifiesta un cálculo sencillo que esta longitud de la sombra varía entre 57 y 59,6 radios terrestres: comparando estos números con las distancias de la luna a la superficie de la tierra se comprende que la sombra no llegue siempre hasta la tierra: debemos, pues, estudiar algunas variaciones de este fenómeno peregrino.

[Calcular la longitud de la sombra. En la fig. 110 sea O el centro lunar; BC la tangente común; $OA = x$ la longitud de la sombra; $OS = d$ es la distancia entre los dos centros: R'' el radio lunar. Por ser $\triangle ABS \sim \triangle ACO$ tenemos que $\frac{AS}{AO} = \frac{R}{R''}$; luego $\frac{AS - AO}{AO} = \frac{R - R''}{R''}$; $\frac{d}{x} = \frac{R - R''}{R''}$; luego $x = \frac{d}{R - R''} \times R''$.

La longitud x de la sombra depende, pues, de la distancia variable de la tierra al sol y es máxima estando la tierra en el afelio y la luna en el perigeo.

Ejemplo. Poniendo $d = 23\,340$ y $R = 108$, será $x = 216 R''$; multiplicando 216 por $\frac{3}{11}$ del radio terrestre, será $x = 59$ radios terrestres: la sombra alcanza la tierra.]

§ 133. ECLIPSE TOTAL, PARCIAL Y ANULAR.

Supongamos que la tierra esté en el afelio y la luna en el perigeo; la sombra formará en la tierra una zona oscura ac (fig. 111);

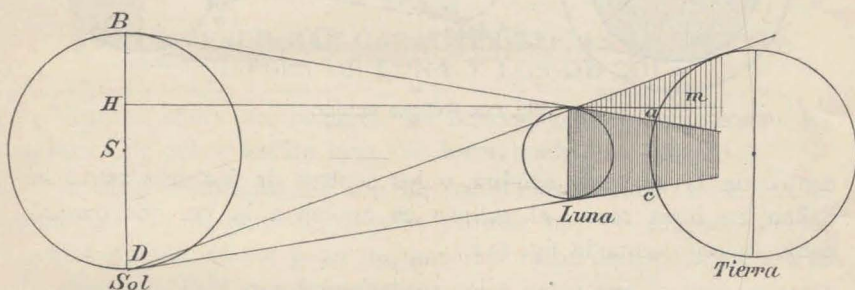


Fig. 111. Eclipses de sol.

por ser en este caso el diámetro aparente de la luna mayor que el del sol, habrá eclipse total, pero tan sólo para los habitantes de esta zona. (Se comprende que para un habitante de la luna habría eclipse de tierra en este caso.) Si formamos por medio de dos tangentes interiores la penumbra, habrá eclipse parcial en los puntos situados dentro de ella; por ejemplo: desde un punto m situado en la penumbra, tracemos la tangente Hm ; resulta que toda la parte del disco solar que corresponde a BH es visible desde m , haciéndose invisible el resto del disco. Cuando la tierra no es alcanzada por el cono de sombra sino tan sólo por la penumbra, habrá eclipse parcial de sol en los puntos situados dentro de la penumbra; en este caso el eclipse deja de ser total, pero puede resultar anular, según veremos.

Eclipse anular. Estando la luna en su apogeo y la tierra en el perihelio, el diámetro aparente de la luna tiene su *mínimum* y el del sol llega a su *máximum*; pero en esta posición también la distancia de la luna al sol es *mínima*. Ahora bien: puede suceder que la sombra misma no alcance a la tierra, pero puede llegar a ella su prolongación *Cab* (fig. 112), la que forma en la tierra una zona oscura *ab*.

Tomemos un punto *m* situado en el interior de la zona *ab* y formemos desde *m* un cono circunscrito a la luna; habrá en el disco solar un círculo interior *MN* negro e invisible desde *m*, pero rodeado de un anillo más o menos ancho visible y de gran brillo: este es el *eclipse anular*, de tanta importancia para el estudio de la constitución física del sol. Si el punto *m* está situado en el

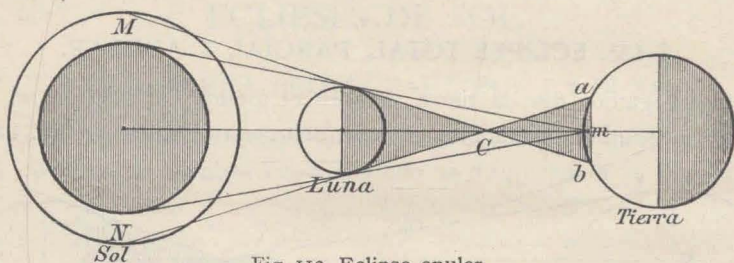


Fig. 112. Eclipse anular.

centro de la zona de sombra y los centros de los tres astros se hallan en línea recta, el eclipse es anular a la vez que *central*, como lo representa la fig. 112.

§ 134. ¿POR QUÉ NO HAY ECLIPSE DE LUNA EN CADA OPOSICIÓN, NI ECLIPSE DE SOL EN CADA CONJUNCIÓN?

Hemos visto que la órbita lunar forma con el plano de la eclíptica en que se mueve el sol, un ángulo de $5^{\circ} 8'$. Por lo tanto la luna se aparta igual número de grados en latitud astral tanto al Norte como al Sur de la eclíptica y origina habitualmente las sicigias a cierta distancia del nodo. En este caso sucede que en el momento de la conjunción el cono de sombra lunar pasa por encima o por debajo de la tierra, haciéndose imposible un eclipse de sol; de igual manera, en el momento de una oposición, la luna puede pasar por encima o por debajo de la sombra proyectada por la tierra y permanecer iluminada por los rayos solares. Por el contrario, si en el momento de las sicigias la luna está en uno de

los nodos o a lo menos tan cerca de él que los centros de los tres astros se hallen sensiblemente unidos por la línea de los nodos, resulta posible un eclipse. He aquí el resultado de los cálculos que determinan las condiciones de posición de la luna.

1. *Eclipse de luna.* Si en el momento de la oposición la latitud de la luna es menor que $52' 24''$, el eclipse es seguro; si es mayor que $1^{\circ} 1'$, el eclipse es imposible; dentro de estos límites es dudoso.

2. *Eclipse de sol.* Si en el momento de la conjunción la latitud de la luna es menor que $1^{\circ} 24'$, el eclipse es posible; si es mayor que $1^{\circ} 32'$, es imposible; dentro de estos límites es dudoso.

Estas mismas condiciones se expresan también en los siguientes términos: Si la distancia angular del sol a la línea de los nodos es menor que $7^{\circ} 41'$, hay eclipse de *luna*; si es mayor que 13° , es imposible. Un eclipse de *sol* es posible, si esta distancia es menor que 13° ; pasando de 19° se hace imposible. Estas condiciones manifiestan que los eclipses de sol se realizan con mayor facilidad y por lo mismo con mayor frecuencia que los de luna.

§ 135. DIFERENCIAS CARACTERÍSTICAS ENTRE LOS ECLIPSES DE LUNA Y LOS DE SOL.

Veamos ahora en resumen las diferencias que caracterizan los eclipses de sol y los de luna (Se recomienda este párrafo.)

1. Los eclipses de sol son de por sí más frecuentes que los de luna: en un período de 18 años 11 días hay 70 eclipses, de los cuales 41 son de sol y 29 de luna. La razón de esta diferencia es la siguiente. Para que haya eclipse solar basta que la luna penetre en el tronco de cono circunscrito al sol y a la tierra por una tangente común, siendo así que los eclipses de luna se deben a la inmersión del satélite en el cono que es *la prolongación* del anterior. Se comprende que las dimensiones transversales del tronco de cono existente entre el sol y la tierra son mayores que la sección que corresponde a un eclipse de luna, de donde se deduce la mayor frecuencia de los eclipses de sol. Esta verdad se evidencia aun más por las condiciones numéricas de latitud y longitud celeste que hemos visto en el párrafo anterior, con respecto a la posibilidad de un eclipse de sol o de luna.

En un año puede haber a lo más siete y a lo menos dos eclipses; en este último caso serán siempre de sol.

2. A pesar de la mayor frecuencia absoluta de los eclipses de sol, se observan *en un mismo paraje terrestre* con mayor frecuencia

los eclipses de luna; la causa de este fenómeno la constituye otra diferencia marcada que vamos a explicar.

Los eclipses de luna son independientes de la posición del observador en la superficie del hemisferio correspondiente, ya que el mismo satélite se vuelve invisible por estar en el cono de sombra; se pueden observar desde todos los puntos de la tierra para los cuales la luna está sobre el horizonte; también la fase es la misma para todos los puntos, puesto que el fenómeno es debido a una verdadera pérdida de luz: comienza y acaba en un mismo tiempo *absoluto* para todos los observadores. Los eclipses de sol

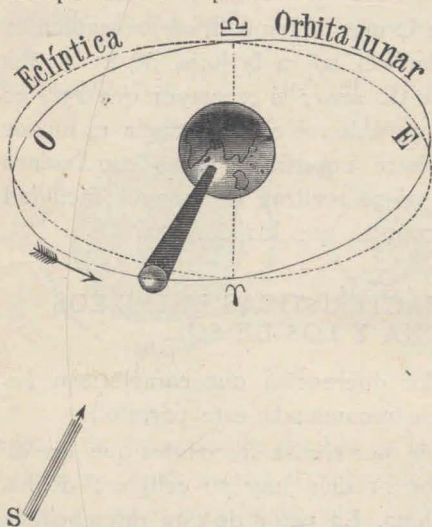


Fig. 113. Eclipse de sol.

no se deben a la proyección de una sombra sobre el disco solar sino a que esta superficie se oculta parcial o totalmente por la interposición de un globo opaco que es mucho más pequeño que el sol. El fenómeno producido por este impedimento debe, pues, variar con respecto a la posición del observador, del sol y de la luna. El eclipse no se produce en un mismo tiempo para los parajes de un mismo hemisferio sino *sucesivamente* en diferentes puntos de una zona, a medida que la sombra y la penumbra se desplazan

en la superficie de la tierra. Como en una llanura se ve moverse la sombra proyectada por una nube que lleva el viento, así a causa del movimiento rápido de la luna la mancha proyectada por la sombra sobre nuestro globo se traslada y el eclipse de sol pasa de una región a otra; para un sitio determinado la duración de un eclipse total es a lo más de unos ocho minutos. Siendo el movimiento propio de la luna mucho más rápido que el del sol, la mancha se mueve del Oeste al Este, lo que puede observarse desde un punto muy elevado; luego para los puntos del Occidente el eclipse principia antes que para los del Oriente (fig. 113).

§ 136. PERIODICIDAD DE LOS ECLIPSES.

Los antiguos designaban con el nombre de *saros* un período de 18 años y 11 días, en el cual se efectúan 70 eclipses (41 de sol

y 29 de luna). Estos eclipses se reproducen durante el siguiente período en igual número y en idénticas épocas. Por este medio los antiguos podían predecir la fecha de un eclipse; hoy día existen tablas astronómicas que hacen inútil el uso de los saros.

Nota. Deben distinguirse tres ciclos diferentes que se relacionan con el movimiento de la luna: *el período de los saros* se refiere a la posición del sol y la luna con respecto a los eclipses; *el período de la revolución de los nodos* se refiere al movimiento del nodo que facilita los eclipses; *el ciclo de Metón* (áureo número) se refiere a la reproducción de las fases en los mismos días del año.

CAPÍTULO TERCERO.

LAS MAREAS.

Todos conocen el fenómeno que se designa con el nombre de mareas, o flujo y reflujo del mar, su importancia para la entrada de los buques en los puertos y su salida de ellos, asimismo su influencia bienhechora sobre la salubridad de los puertos y de las costas, porque arrastran mar adentro las materias cuya putrefacción ocasionaría graves epidemias; será, pues, útil dar alguna explicación, aunque breve, sobre la causa de este notable fenómeno.

§ 137. FENÓMENO Y CAUSA DE LAS MAREAS.

En las riberas del océano y estando el tiempo tranquilo obsérvese un cambio periódico en el nivel del mar: se puede observar

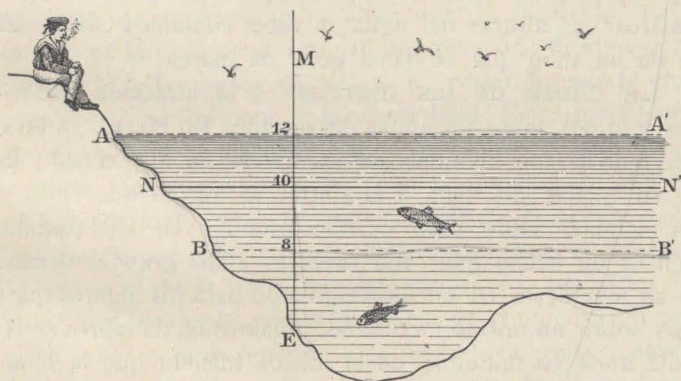


Fig. 114. Alta y baja marea.

que por cada $24^h 50^m$ (que forman un día lunar) sube dos veces y baja dos veces el agua con respecto a una altura intermedia.

I. Descripción de la marea. Consideremos en la orilla del mar un terreno *ANB* (fig. 114) algo inclinado, de suerte que las

aguas no lleguen nunca al punto en que se halla el observador, teniendo en E suficiente profundidad para no quedar al descubierto, cuando el nivel desciende.

Observemos con mucha paciencia durante $24^h 50^m$ en un terreno de esta naturaleza las variaciones que se producen, y descubriremos que el nivel ha oscilado entre dos límites extremos A y B , pasando por una posición intermedia N . Llamamos *pleamar* la posición máxima AA' que alcanza el nivel del agua, y *bajamar* la posición mínima BB' . Como en $24^h 50^m$ hay dos veces pleamar y dos veces bajamar, resulta que por cada $12^h 25^m$ hay dos pleamares consecutivas.

La subida de las aguas de B hasta A se llama *el flujo*, la bajada es *el reflujo*; la parte AB que las aguas cubren y dejan al descubierto alternativamente es *la playa*, que tiene una extensión en conformidad con la inclinación del terreno, pero que no existe en una orilla formada por rocas cortadas a pico.

La amplitud de la oscilación del océano no es la misma todos los días ni tiene el mismo valor en un mismo día para todos los puertos, según se explicará más adelante. La medida de esta amplitud se hace con auxilio del mareómetro, que es una escala EM , vertical y graduada, en que se puede leer en cualquier momento la altura del nivel: a este objeto se coloca hoy día el *mareógrafo* en los puertos: consta (en lo esencial) de un cilindro vertical en que sube y baja con la marea un flotador provisto de una disposición para marcar las alturas del agua; a veces comunica con el mar por medio de un tubo que se llama pozo de marea.

II. La causa de las mareas es la atracción que ejercen la luna y el sol sobre las aguas del océano. En efecto, es un hecho que las mareas son máximas en las épocas en que el sol y la luna tienen su menor distancia a la tierra, lo mismo que en la época de las sicigias, sobre todo cuando estamos en los equinoccios; también es un hecho que, con respecto a los grandes océanos, la marea se manifiesta en un mismo tiempo para los lugares que están situados sobre un mismo meridiano; finalmente, la marea se retarda cada día unos 50 minutos, de la misma manera que la luna pasa cada día unos 50 minutos más tarde por el meridiano de un lugar: síguese que es natural atribuir este fenómeno a la acción combinada del sol y de la luna.

III. Explicaciones. 1º Consideremos primero *el efecto de la atracción que ejerce la luna* (fig. 115) y supongámosla en el cenit de A , que sea un punto del océano. Sabemos que la distancia media

de la luna al centro de la tierra es de unos 60 radios terrestres; cualquier masa de océano que se halle debajo de la luna en la misma vertical, dista del satélite un radio terrestre menos que el centro de nuestro globo, y sufre por lo tanto una atracción más fuerte que el centro. Esta parte del océano tiene, pues, la tendencia a *acercarse* a la luna, y todo el paraje líquido se levantará formando una especie de montaña cuya cúspide *A* se dirige hacia la luna: esta es *la marea alta*. En los

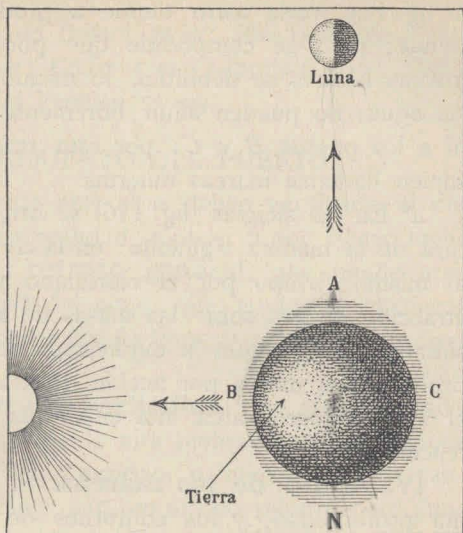


Fig. 115. Mareas.

puntos *B* y *C*, desde los cuales el agua corre hacia *A*, se formará una especie de valle, produciendo *la marea baja*. Estas dos mareas se llaman la marea cenital: a ella corresponde una doble marea en el nadir *N*, porque este paraje dista de la luna un radio terrestre más que el centro, y más aún que los puntos *B* y *C*. El centro de la tierra tiene, pues, una tendencia a caer hacia la luna con mayor energía que las aguas situadas alrededor de *N*, de lo cual resulta un cambio en la posición del centro de gravedad: disminuye la atracción sobre *N*, y las aguas se alejan del centro formando una marea alta: en *B* y *C* se formará una marea baja. Estas mareas no se detienen en un mismo meridiano, sino que siguen el movimiento aparente de la luna, en conformidad con la rotación de la tierra.

2º Considerando de una manera análoga la acción aislada del *sol*, podría parecer que es insignificante, ya que el sol dista unas 386 veces más de la tierra que la luna; pero, según las leyes de Newton, lo que pierde por la distancia se compensa en parte por su masa, que es muy superior a la de la luna. Supongamos, pues, en la fig. 115 el sol colocado en el cenit de *A* en lugar de la luna: provocará, según se comprende, a mediodía y a medianoche mareas altas en *A* y *N*, pero de menor altura que las producidas por nuestro satélite.

3º Estando el sol en el horizonte con respecto a los puntos *A* y *N* que tienen la luna en el cenit (cuadratura), tal como está en

la fig. 115, cada astro tiende a producir la marea que le corresponde; pero se comprende que por esta acción combinada las mareas lunares se debilitan, lo mismo que las solares, puesto que las aguas no pueden fluir libremente ni hacia los puntos *A* y *N* ni a los puntos *B* y *C*: por esta razón las mareas en cuadratura suelen llamarse mareas muertas.

4º En las sicigias (fig. 116) se originan las mareas de mayor altura de la manera siguiente: en la conjunción, los dos astros pasan al mismo tiempo por el meridiano y juntan simultáneamente su atracción directa sobre las masas de agua en *A*, y la reacción resultante en *N*, según la explicación dada. En la oposición la luna produce alta marea por acción directa en *A* y por reacción en *N*; el sol produce marea alta en *N* por acción directa, y en *A* por reacción."

IV. **Altura de las mareas.** Si los océanos tuviesen la misma profundidad, y los contornos de los continentes fuesen uniformes, la marea solar sería de 59 *cm* y la lunar de 120 *cm*, según cálculos astronómicos. El fenómeno se hace complejo por varias circunstancias que alteran la uniformidad de la altura. Se comprende que la acción del sol y de la luna es más enérgica sobre las grandes

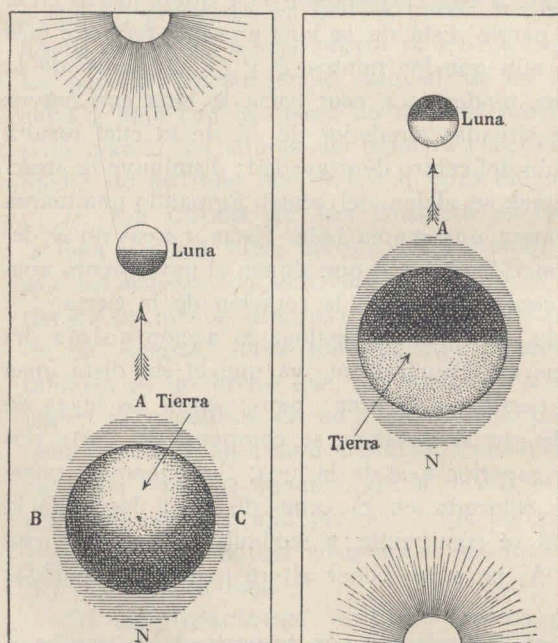


Fig. 116. Marea en las sicigias.

masas de agua: la diferencia de nivel entre alta y baja marea llega a 3 *m* en el océano libre, es pequeña en el Mediterráneo y nula en el Mar Caspio. Se modifica la altura también por las corrientes submarinas, la acción de los vientos, la configuración de las costas, y sobre todo se aumenta en los canales abiertos en dirección del flujo y reflujo. He aquí algunas alturas máximas: en la bahía de Fundy (Norte-

América) 30 *m*; en el canal de Bristol 21 *m*; Río Gallegos (Patagonia) 18 *m*; San Maló 12 *m*; Cádiz 5 *m*; Gibraltar 1 *m*; Tolón 30 *cm*; en la costa austral del Pacífico 50 *cm*.

§ 138. ESTABLECIMIENTO DEL PUERTO.

Hemos visto que las mareas más altas deben verificarse el día mismo de las sicigias; pero en realidad se observa que tienen lugar 36 horas después: este es el **retraso general**, que puede atribuirse a la inercia de la masa del agua, que no puede obedecer en un solo instante a la atracción de la luna, y al roce que sufren las ondas.

Más importante es el **retraso particular**, que afecta a cada puerto: sábase por experiencia que la alta marea se atrasa (después de pasar la luna por el meridiano superior o inferior) en una cantidad de tiempo que es constante para un mismo puerto, pero muy variable para distintos puntos de observación. La causa de esta variación es, sin duda, la configuración de las costas y la abertura de las bahías en dirección del oleaje.

Establecimiento del puerto es el número de horas o minutos que transcurren entre el paso de la luna por el meridiano del puerto, y el momento en que suele verificarse la alta marea en este puerto: si el establecimiento es de 3 horas, la entrada de la pleamar se verifica 3 horas después del paso de la luna por el meridiano. Para conocer este número constante, basta observar la hora de la pleamar en una de las sicigias: la hora en que se verifica la pleamar después de pasar la luna por el meridiano, es el establecimiento de este puerto; esta hora *establece* el momento favorable para la entrada y la salida de los buques en los puertos que no tienen suficiente profundidad en el estado de baja mar. Agregamos este establecimiento de algunos puertos de España y América:

Santander	3 ^h	Buenos Aires	6 ^h 40 ^m
Coruña	2 ^h 40 ^m	Valparaíso	9 ^h 30 ^m
Lisboa	2 ^h 30 ^m	Callao	6 ^h
Cádiz	1 ^h 15 ^m	Panamá	2 ^h 40 ^m
Málaga	2 ^h 30 ^m	Vera Cruz	2 ^h 30 ^m
Nueva York	8 ^h	Río de Janciro	3 ^h
Habana	8 ^h		

LIBRO OCTAVO.

PARTICULARIDADES SOBRE LOS PLANETAS Y COMETAS.

Después de haber visto en el libro III las propiedades generales de los planetas y estudiado la tierra con su satélite, daremos algunas nociones sobre las propiedades más notables de los otros planetas. Siendo muy difícil recordar los números absolutos de sus distancias y magnitudes, pondremos una tabla con cuyo auxilio será fácil al alumno aprender de memoria estas medidas.

CAPÍTULO PRIMERO.

PLANETAS.

En el cuadro siguiente la unidad de medida de los volúmenes es T , esto es, el volumen de la tierra: decir que el volumen de Marte es un cuarto de T significa que el volumen de Marte equivale a la cuarta parte del volumen de la tierra. Las distancias medias se expresan según la ley de Bode.

Planeta	Radio	Vo- lumen	Dis- tancia al sol	Ro- tación	Revo- lución	Masa
Mercurio . . .	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{20}$	0,4	88 ^d	88 ^d	0,06
Venus . . .	0,9	$\frac{4}{5}$	0,7	23 ^h ?	224	0,79
Marte . . .	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{6}$	1,6	24 ^h	687	0,1
Júpiter . . .	11	1300	5,2	9 ^h	12 ^a	310
Saturno . . .	9	800	10	10 ^h	29	92
Urano . . .	4,2	70	19,6	12 ^h	84	14
Neptuno . . .	3,7	60	30	?	165	16

Siendo la unidad de medida el radio terrestre, se obtiene, por ejemplo, el radio de Júpiter multiplicando por once la longitud del radio de la tierra. Multiplicando por once elevado al cuadrado o al cubo la superficie o el volumen de la tierra, se obtiene la superficie o el volumen de Júpiter, aunque no con exactitud rigurosa.

§ 139. MERCURIO.

Este planeta, que es el menor de todos, brilla con una luz blanca y muy viva; pero sin el auxilio de un buen antejo es raras veces visible a causa de la vecindad del sol. (Copérnico murió sin haber podido alcanzar a verlo.) La *elongación* máxima de Mercurio es sólo de $27^{\circ} 52'$, de suerte que es visible únicamente en tiempo de los crepúsculos y cerca del horizonte, por lo cual se pierde su luz en los vapores de nuestra atmósfera y en el brillo de los rayos solares; puede verse durante las dos horas que preceden la salida y que siguen a la puesta del sol.

1. La *órbita* de Mercurio es notable por su gran excentricidad: el planeta dista del sol en el perihelio 40 000 000, y en el afelio 60 000 000 *km*; pero su distancia a la tierra varía entre 79 000 000 y 218 000 000 *km*.

2. Mercurio es el menor de los ocho planetas; su *diámetro* verdadero tiene 4800 *km* ($\frac{1}{3}$ del terrestre); su *volumen* es $\frac{1}{20}$ del volumen de nuestro globo (57 000 millones de kilómetros cúbicos).

3. Su pequeñez y su proximidad al sol impiden descubrir manchas sensibles en su superficie y por consiguiente determinar el tiempo de su rotación: las observaciones de Schiaparelli de Milán parecen demostrar que Mercurio ejecuta una rotación sobre su eje en el mismo tiempo en que describe una revolución en torno del sol, esto es, en 88 días.

Mercurio presenta el fenómeno de las *fases* de la misma manera que Venus.

§ 140. VENUS.

De todos los astros que adornan la bóveda celeste, este planeta tiene el mayor brillo (exceptuando el sol y la luna) y álumbra en ciertas latitudes con su luz blanca y clara en tal grado, que a veces en noche sin luna se puede leer sin dificultad, y los objetos algo grandes proyectan sombras sensibles. Estando Venus en su mayor brillo, la intensidad de su luz es 40 veces mayor que la de Vega y 900 veces menor que la de nuestro satélite. Su *elongación* máxima llega a 48° , por lo cual es visible sólo durante tres horas antes de salir el sol y después de haberse puesto. Los nombres con que suele designarse Venus son los siguientes: Lucífero, Afrodite (en griego), Héspero (estrella vespertina), Stella Matutina (estrella de la mañana), Lucero del alba, etc.

1. La *órbita* de este planeta se diferencia poco de la circular: la *distancia* máxima al sol es de 108 000 000 *km*, la mínima de

106000000; ejecuta una *revolución* en $224^d 17^h$, que es la duración de un año de Venus. Sus distancias a la tierra ofrecen diferencias grandes: en la conjunción superior dista 257000000 *km*, y en la inferior sólo 40000000; no sorprende, pues, la notable variedad de sus diámetros aparentes siendo el valor máximo de $67''$ y el mínimo de $10''$.

El tiempo de su *rotación* no se ha podido averiguar; algunos astrónomos la estimaban en 24 horas; pero el célebre astrónomo Newcomb afirma que la rotación de Venus no se ha podido observar por falta de manchas permanentes.

2. El *diámetro* verdadero de Venus tiene 12600 *km*, que es próximamente el valor del de la tierra; en cuanto a las dimensiones, la masa y la densidad, no existe una diferencia notable entre Veñus y nuestro planeta.

Observaciones exactas manifiestan la existencia de una *atmósfera* cuya densidad es sensiblemente igual a la terrestre; la claridad y obscuridad de esta atmósfera fué sin duda la causa de los errores que sufrieron varios astrónomos en sus afirmaciones sobre la rotación y la existencia de montañas.

3. Venus presenta *fases* análogas a las de la luna; *Galileo* fué el primero (en 1610) que las descubrió, gracias al anteojo por él perfeccionado. Las fases de Venus, lo mismo que su movimiento retrógrado, se han explicado en el libro III. En la conjunción inferior hay Venus nueva y el planeta debería ser invisible; pero el plano de su órbita tiene una inclinación de $3^0 24'$ con la eclíptica, por lo cual el planeta se halla a veces al Norte o al Sur del sol, siendo visible.

4. El ecuador de Venus tiene una notable inclinación sobre el plano de la órbita; debe, pues, haber en el planeta una desigualdad excesiva de las *estaciones* con ausencia de zonas templadas: durante una mitad del año cada hemisferio está vuelto casi directamente hacia el sol.

§ 141. MARTE. LOS ASTEROIDES. EROS.

I. El más cercano a la tierra entre los planetas superiores es Marte, que también es el planeta que ofrece mayor semejanza con el nuestro. Fácilmente se le conoce en la bóveda celeste a causa de su luz rojiza; pero entre los cuerpos celestes no hay ninguno cuya intensidad de brillo esté sujeta a iguales cambios, si prescindimos de las estrellas fijas variables: desde el brillo de primera

magnitud puede bajar al de tercera; en su distancia media su brillo es muy superior al que presenta la estrella Capella.

1. La *órbita* de Marte es muy elíptica: en el perihelio el planeta dista del sol unos 206 000 000 *km* y en el afelio 248 000 000. El *tiempo de la revolución* es de 687 días terrestres, siendo el año de Marte casi el duplo del terrestre. En cuanto a sus *distancias a la tierra*, es mayor la diferencia, porque la mínima es de 57 000 000 *km* (en la oposición perihélica) y la máxima de 396 000 000 *km* (en la conjunción). A estas distancias corresponde el valor del diámetro aparente, que varía entre 3 y 24 segundos de arco.

2. El *diámetro verdadero* de 6700 *km* es próximamente igual al radio terrestre y el *volumen* es más de seis veces *menor* que el de la tierra. Su *densidad* es $4\frac{1}{2}$ con relación al agua y por lo tanto la atracción es inferior a la terrestre: lo que pesa 1 *kg* en la tierra pesaría 818 *g* en la superficie de Marte. El ecuador tiene una inclinación de $24^{\circ} 50'$ con el plano de la órbita y por consiguiente las estaciones son análogas a las terrestres.

3. En la superficie de Marte se observan *manchas* claras y oscuras, que han sido objeto de prolijas investigaciones y discusiones, sin que se haya llegado a tener noticia cierta sobre su naturaleza. La existencia de una *atmósfera* bastante densa con aire semejante al terrestre y con vapor de agua, se ha comprobado suficientemente.

En cuanto a las manchas claras y oscuras se ha observado que algunas cambian pronto de aspecto, por lo cual se atribuyen a la formación de nubes; pero hay otras manchas que son permanentes, y que deben pertenecer al núcleo sólido, por cuya observación se ha encontrado que el tiempo de la *rotación* de Marte es de $24^h 27^m$, tiempo que difiere poco del de una rotación de nuestro globo: puede afirmarse que para ningún otro planeta se ha podido determinar este fenómeno con igual precisión y certidumbre.

Las manchas más notables que se observan en Marte, son unas blancas y brillantes que existen *en los dos polos*, y es de notar que su extensión decrece durante el verano del planeta y crece durante el invierno: según la opinión unánime de los astrónomos deben atribuirse al *hielo* y a la aglomeración de *nieves*. En el polo Sur la mancha es más pequeña en verano y mayor en el invierno que sobre el polo Norte. Las estaciones son más marcadas en Marte que en la tierra, porque la inclinación del ecuador es mayor y el año es dos veces más largo: en el hemisferio boreal sucede un invierno corto y moderado a un verano largo y templado;

en el hemisferio austral el invierno es largo y crudo, y el verano corto y muy caliente (fig. 117).

4. **Satélites.** En 1877 descubrió *Hall* en Wáshington dos satélites muy pequeños: el primero describe su órbita en $7^h 38^m$; el otro en 30^h . Esta velocidad manifiesta que su distancia al planeta es muy corta; se estima en 7000 *km*.

II. **Los asteroides.** En sus investigaciones sobre las distancias planetarias sospechaba Képler la existencia de un planeta intermedio entre Marte y Júpiter; esta sospecha se confirmaba aun más por la irregularidad que ofreció la serie en la ley de Bode. A fines del siglo XVIII formaron los astrónomos el convenio de entregarse

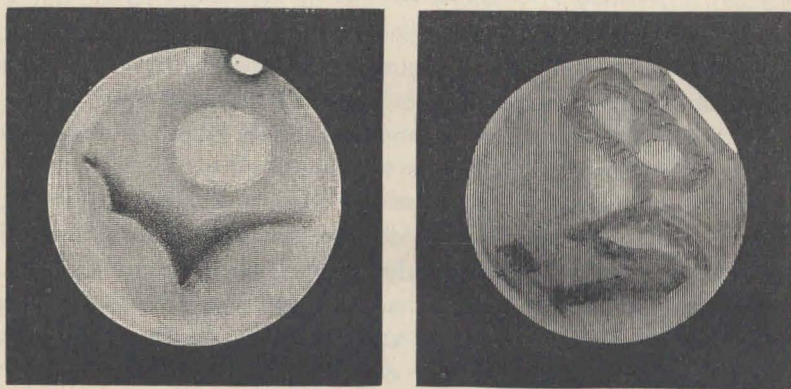


Fig. 117. Aspectos de Marte.

«unitis viribus» a la observación de esta región excepcional; pero estando ocupados en los preparativos de la obra tuvo el astrónomo *Piazzi* de Palermo la dicha de descubrir el planeta misterioso precisamente el primer día de 1800: le dieron el nombre de *Ceres*, diosa de los cereales, a causa de la gran fertilidad de Sicilia en trigos. El célebre matemático *Gauss* se encargó de los cálculos y halló que la órbita de *Ceres* ocupa la distancia media entre Marte y Júpiter, llenándose de esta manera la laguna tanto tiempo deplorada. En la misma región descubrió, dos años después, *Olbers* de Bremen el segundo planeta (*Pallas*), en 1804 se descubrió *Juno*, y en 1807 *Vesta*. Durante 40 años no se descubrió ningún otro pequeño planeta; pero desde 1845 el número de estos planetas telescópicos que se han descubierto, llega a unos 700: por ser pequeños se llaman *planetoides* o *asteroides*.

Su *volumen* y por lo mismo su *diámetro aparente* es insignificante; nuestra luna equivale a 500 del tamaño de *Ceres*, que es el

mayor de todos; el diámetro de los pequeños llega a unos 40 *km*. El tiempo de sus *revoluciones* respectivas varía entre tres y ocho años terrestres.

Olbers, que conocía sólo la existencia de pocos asteroides, opinaba que estos eran fragmentos de algún planeta despedazado; pero esta opinión está del todo abandonada hoy día.

III. **Eros**. Haremos una mención particular de este pequeño asteroide, porque es desde algunos años el objeto en que más de treinta observatorios fijan su atención y sus estudios, a causa de ofrecer este pequeño astro facilidad para determinar la paralaje del sol. El 13 de agosto de 1898 el Sr. Witt, director del observatorio de Berlín, publicó su descubrimiento de un pequeño asteroide de la 11ª magnitud que forma el número 433 en el catálogo de los asteroides, y le dió más tarde el nombre de *Eros*, sin darse cuenta, tal vez, de la nombradía que había de alcanzar este enano entre los planetas. Haciendo estudios retrospectivos se descubrieron rastros de Eros en fotografías sacadas en los años de 1893, 1894 y 1896. He aquí los elementos principales para su ubicación y su caracterización, notando que en las distancias la unidad es la distancia media de la tierra al sol.

Longitud del perihelio $121^{\circ} 9' 50''$.

Nodo ascendente $305^{\circ} 30' 37''$.

Inclinación $10^{\circ} 49' 32''$.

Movimiento medio al día 2015''.

Distancia media al sol = 1,458 (la de Marte es 1,6).

Revolución en torno del sol en 643 días (Marte en 687 días)

La distancia mínima a que puede acercarse a la tierra es 0,149 con respecto a la unidad arriba mencionada.

§ 142. JÚPITER.

Este planeta es el más grandioso de todos, siendo su volumen mayor que el conjunto de todos los demás; brilla en el cielo con una luz de color amarillo claro, que es notable en todas las posiciones del planeta, de suerte que tan sólo el brillo de Venus le es superior.

1. Su *distancia* al sol varía entre 740 000 000 y 814 000 000 *km*, siendo su órbita poco diferente de la circular; pero sus distancias a la tierra varían entre 580 000 000 (oposición) y 960 000 000 *km*, de lo cual resultan cambios notables en su diámetro aparente. El tiempo que transcurre en *una revolución* es de unos doce años terrestres;

de aquí se deduce que su movimiento de traslación es muy lento, siendo esta velocidad más de dos veces menor que la de la tierra y cuatro veces menor que la velocidad de Mercurio. En cambio, el movimiento de *rotación* sobre su eje parece increíble considerando la magnitud del planeta; puesto que se realiza en menos de diez horas, de donde se sigue que la velocidad angular de un punto ecuatorial de Júpiter es 28 veces mayor que la de un punto del ecuador terrestre. (Los planetas *exteriores* tienen en general una velocidad de traslación pequeña; pero su rotación es rápida.)

2. El *diámetro verdadero* medio de Júpiter es de 11 radios terrestres, siendo el diámetro ecuatorial igual a 141 000 km; su

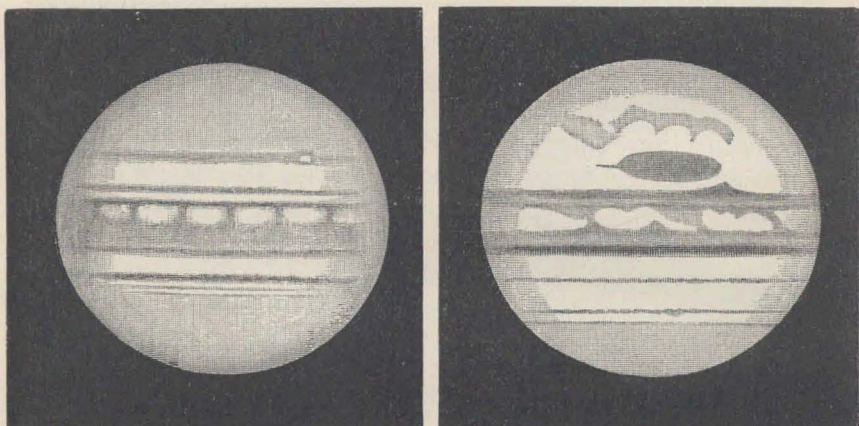


Fig. 118. Aspectos de Júpiter.

volumen enorme equivale a 1300 globos terrestres; 960 globos de Júpiter equivalen al volumen del sol; pero con respecto a su *masa* tan sólo podrían hacerse de este planeta 310 globos que tuviesen *el peso* del terrestre cada uno; su *densidad* es cinco veces menor que la de la tierra.

Recordando la rapidez de su rotación no es tan extraño el *aplanamiento* enorme que presenta este planeta, porque se ha calculado en $\frac{1}{16}$; únicamente Saturno tiene un aplanamiento mayor.

3. Cuando se estudia la superficie de Júpiter con el anteojo, causa sorpresa el observar con cuánta rapidez y variedad cambia el aspecto de este planeta gigantesco. A primera vista se notan unas fajas, que se llaman *bandas*, claras y oscuras, que rodean el globo en sentido paralelo al ecuador; se ha reconocido que estas zonas son desigualmente alumbradas y se asemejan a nubes (stratus

y cúmulus), que a menudo cambian de forma y color en pocas horas. Además se observan *manchas* igualmente variables (fig. 118).

La banda ecuatorial suele ofrecer variaciones de los colores siguientes: gris oscuro, amarillo, anaranjado y aun rosado.

La existencia de una atmósfera de vapores no es dudosa. Se deduce de la misma mutabilidad de las bandas y manchas, que éstas no pueden ser inherentes al globo sólido, tanto más cuanto que las manchas no guardan entre sí la misma velocidad en su movimiento del Oeste al Este. La ocultación de las estrellas supone igualmente una atmósfera; porque antes de hacerse invisible una estrella se oscurece poco a poco y aun parece penetrar algo en el mismo disco.

En la atmósfera de Júpiter se observan una especie de huracanes que abarcan en poco tiempo regiones inmensas; en una hora deben de trasladarse masas enormes por miles de leguas. Tales efectos no pueden atribuirse al calor del sol, ya que su intensidad es 30 veces inferior a la intensidad con que actúa sobre el globo terrestre. En este fenómeno, pues, se funda la opinión de los astrónomos cuando afirman que el núcleo del planeta se halla en un estado semifluido y muy caliente, y aun dotado de alguna luz propia.

4. **Satélites.** En 1610 descubrió Galileo cuatro satélites de Júpiter, encontrando así un apoyo en favor del sistema de Copérnico; porque ofrecían una prueba directa de que no todos los astros giraban en torno de la tierra. Estos satélites serían visibles a simple vista, a no ser la luz viva radiada por el planeta, porque tienen dimensiones considerables: el diámetro verdadero del menor de entre ellos no difiere mucho del diámetro de la luna, y el diámetro del mayor (que es el tercero contado desde Júpiter) tiene unos 1000 *km* más que el de Mercurio; sin embargo el planeta sobrepasa 6000 veces a estos cuatro satélites juntos en masa y peso: esto explica la enorme velocidad con que los satélites recorren sus órbitas respectivas. El primero y más cercano ejecuta una revolución en 42 horas, el segundo en tres días y medio, el tercero en siete, el cuarto en diecisiete días; pero cualquiera de las órbitas tiene una longitud que es mayor que la órbita de nuestra luna. La distancia del primero excede en 34000 *km* a la distancia que guarda la luna a la tierra, y el último dista casi cinco veces más que el primero.

Por ser poco inclinadas estas órbitas resultan eclipses muy frecuentes: en *un año de Júpiter* hay 4400 eclipses de luna y otros

tantos de sol; si uno de los satélites entra en el cono de sombra proyectado por Júpiter, se oscurece el satélite por completo (eclipse de luna); pero al colocarse entre el sol y el planeta, su sombra cae sobre éste y se observa un pequeño disco negro que atraviesa el disco brillante de Júpiter (eclipse de sol). Estos fenómenos demuestran que el planeta central no brilla con una luz propia algo viva.

En 1892 comprobó Barnard la existencia de un quinto satélite, que es el más cercano al planeta y debería ser nombrado el primero. Su distancia máxima es igual a 2,7 diámetros aparentes de Júpiter y su revolución dura $11\frac{3}{4}$ horas.

En la actualidad Júpiter tiene ocho satélites conocidos: los tres últimos han sido descubiertos por medio de la fotografía.

5. Velocidad de la luz. Con auxilio de los eclipses del segundo satélite de Júpiter determinó Olaf Römer en 1670 esta

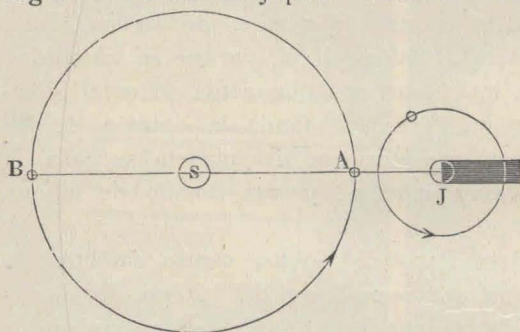


Fig. 119. Velocidad de la luz.

velocidad. Por tener este satélite cada 42 horas una inmersión en la sombra proyectada por Júpiter, es fácil calcular de antemano el día y la hora de un eclipse del satélite.

Supongamos la tierra en *A* (fig. 119), en oposición con Júpiter, y calculado el momento de un eclipse para seis meses después; al llegar la tierra a la vecindad de su conjunción *B*, el momento del eclipse se *atrassa* en $16^m 44^s$; pero al volver hacia la oposición *A*, la inmersión se *adelanta* en $16^m 44^s$. Es evidente que la luz gasta este tiempo en recorrer el diámetro *AB* de la órbita terrestre; por lo tanto, para recorrer $150\,000\,000\text{ km}$, que es el radio de la órbita, gasta $8^m 22^s = 500^s$. Dividiendo el primer número por este último, se obtiene que la luz recorre en un segundo $300\,000\text{ km}$ próximamente.

§ 143. SATURNO.

Este planeta es, sin duda, el que despierta mayor interés y admiración; porque no solamente está acompañado de diez satélites, a semejanza del sol, sino que se distingue de todos los astros conocidos por el hermoso sistema de anillos concéntricos que le rodean. A simple vista se nos presenta en el cielo como una estrella de

primera magnitud. La luz de su brillo es pálida y blanco-amarillenta; y su claridad varía no solamente en conformidad con la distancia a la tierra sino también según la extensión de los anillos, como veremos más adelante.

1. Saturno *recorre su órbita*, que es sensiblemente circular, en 29 años terrestres y medio, por lo cual su movimiento parece muy lento, pues en quince días describe un arco igual al diámetro aparente de la luna; en realidad recorre tan sólo 10 *km* por segundo, mientras que la tierra anda 30 *km*.

Su *distancia media al sol* es 10 veces mayor que la terrestre, y un observador vería desde Saturno el sol como un disco unas 90 veces menor que desde la tierra. El *mínimum* de su distancia a la tierra es de 1 180 000 000 *km*.

El tiempo de su *rotación* se ha calculado por Herschel y Hall en $10^h 15^m$ por la observación de una mancha algo permanente; pero estos resultados no son del todo seguros, ya que esas manchas podían pertenecer a la atmósfera de Saturno y estar dotadas de movimiento propio.

2. En *magnitud*, Saturno es el segundo planeta; en *volumen*, equivale a 800 globos terrestres; pero en *peso*, solamente a 92 globos, cada uno del peso de la tierra. Su *densidad* es menor que la de cualquier otro planeta, y su materia es 10 veces menos densa que la terrestre; no carece, pues, de fundamento la opinión de que en su superficie no existen océanos que tengan aguas tan densas como nuestro globo.

Notable es la magnitud de su *aplanamiento*; su valor es $\frac{1}{9}$ y por lo tanto excede en mucho al de Júpiter, y es 30 veces mayor que la depresión del globo terrestre. Por tener el eje del globo una inclinación de 64° con el plano de la órbita, hay desigualdades en la duración de los días y de las noches; las diferencias en las estaciones deben ser aun más marcadas que en la tierra.

3. Si examinamos la superficie de Saturno con un buen telescopio, descubrimos bandas y manchas que son análogas a las de Júpiter; pero no se distinguen tantos pormenores: las zonas alternan entre sí con matices de colores claros y oscuros y tienen límites regulares y bien definidos. La existencia de una atmósfera bastante densa se ha comprobado, y se admite que es semejante a la de Júpiter.

4. **Satélites.** Saturno ejerce su imperio sobre diez¹ satélites,

¹ El décimo fué descubierto en 1905 por el profesor *W. Pickering*; el noveno fué descubierto por el mismo sabio en 1899; es $3\frac{1}{2}$ veces mayor que Japeto, el octavo satélite, y tiene movimiento de traslación retrógrado.

así como al sol están sujetos ocho planetas: son menores que los satélites de Júpiter y no tan fácilmente visibles como éstos; sus dimensiones son más pequeñas que las de nuestra luna.

§ 144. LOS ANILLOS DE SATURNO.

Cuando en 1610 Galileo, el sabio infatigable, examinó a Saturno, le parecía ver un globo inmenso rodeado de otros dos globos pequeños, los cuales comparó a dos criados (satélites) que debían sostener y acompañar al viejo Saturno; pero éstos se mostraron muy infieles: dos años después habían desaparecido por completo. Otros sabios vieron a Saturno en formas variadas, caprichosas y

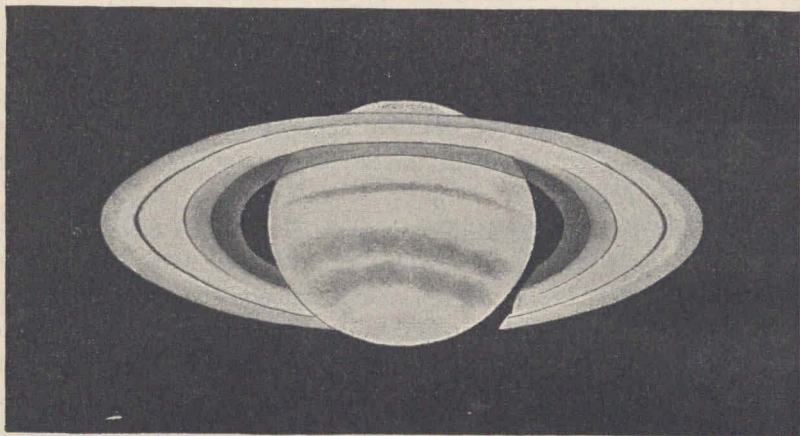


Fig. 120. Saturno con los anillos.

fantásticas, hasta que el célebre *Huyghens*, con el anteojo perfeccionado, pudo descubrir en 1656 que el planeta estaba rodeado de un anillo plano que no le tocaba. «*Anulo cingitur tenui, plano, nusquam coherente, ad eclipticam inclinato*», son las palabras del sabio. Demos ahora la breve descripción de este apéndice maravilloso del planeta.

En el plano del ecuador, Saturno está rodeado de un sistema de tres anillos, cuyo conjunto es más luminoso que el planeta: el anillo exterior está separado de los demás por un espacio vacío que se llama la línea de Cassini: este anillo es bastante oscuro; sigue el intermedio, el más brillante, cuya luz es amarillenta; contiguo a él se halla el interior, poco luminoso, transparente y separado del planeta por un espacio vacío que mide un radio terrestre (fig. 120). Todo el sistema tiene una anchura de 22 diámetros

terrestres, pero el espesor es solamente de 200 *km*, de manera que, visto de canto, el anillo se presenta a la observación como una

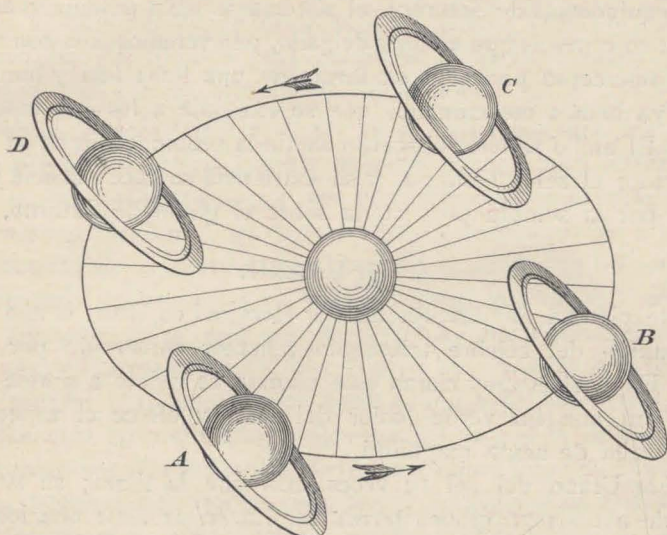


Fig. 121. Traslación de Saturno.

línea delgada (fig. 122). Consideremos ahora los diferentes aspectos que debe presentar este sistema, iluminado por el sol, durante una revolución del planeta, recordando que *el observador se halla entre el sol y la órbita de Saturno*. (Véase la fig. 121, en que falta la órbita terrestre.) Cualesquiera que sean las posiciones del planeta y de la tierra en sus órbitas, el anillo siempre se presenta oblicuamente al observador, siendo su contorno aparente una elipse; el plano del anillo, lo mismo que el eje del globo, permanecen siempre paralelos a sí mismos durante la traslación en torno del sol, siendo así que las direcciones en que los vemos, van cambiando continuamente; por consiguiente el sol ilumina alternativamente una y otra cara del sistema. Cuando la prolongación del plano en que yace el anillo deja a un lado

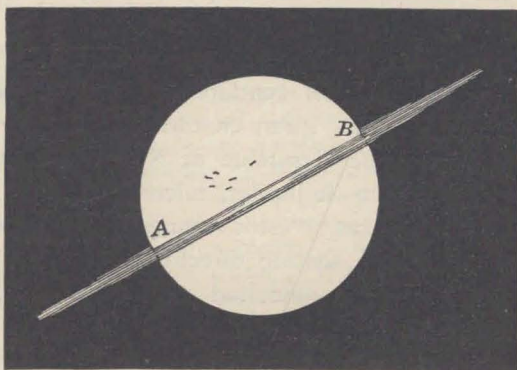


Fig. 122. El anillo de Saturno visto de canto.

el sol y la tierra, veremos su superficie iluminada a lo ancho (*B y D*) Estando el sol en el plano del anillo, lo que sucede cada quince años (equinoccios de Saturno), el sistema se halla iluminado en sentido de su espesor, que es muy delgado, y lo veremos sólo con ayuda de un telescopio poderoso en forma de una línea fina y luminosa, como ya hemos mencionado, que se extiende a los dos lados del globo. El anillo se hace obscuro cuando la prolongación de su plano pasa entre el sol y la tierra, y su existencia se hace sensible únicamente por la sombra proyectada sobre el globo de Saturno.

§ 145. URANO.

Este planeta fué descubierto por Hérchel en Bath, el año 1781, con auxilio del célebre telescopio reflector construido por dicho sabio. En noches muy claras este planeta es visible a simple vista: brilla con una luz verde (color del mar) y ofrece el aspecto de una estrella de sexta magnitud.

Dista Urano del sol 19 veces más que la tierra; su *volumen* equivale a unos 70 globos terrestres. La *órbita* tiene una longitud de 17 000 millones de kilómetros, y es recorrida por el planeta en 84 años terrestres: por lo tanto su velocidad de traslación es cuatro veces menor que la terrestre. El sol, visto desde Urano, se presentaría al observador con el tamaño aparente de Venus.

A causa de la gran distancia y por ser relativamente pequeño el planeta, no se pueden descubrir manchas en la superficie, por lo cual no hay datos fijos sobre su *rotación*; algunos astrónomos opinan que se efectúa en 12 horas.

Satélites. Sobre el número de los satélites de Urano había divergencia de opiniones desde que Hérchel los descubrió, hasta que en 1876 los astrónomos de Wáshington los fijaron definitivamente en *cuatro*; los dos extremos son el objeto más difícil de la investigación astronómica, a causa de su pequeñez y gran distancia. Cosa extraña: el sentido de *su movimiento de traslación es retrógrado*, esto es, giran en torno de Urano de Oriente a Occidente, lo mismo que el satélite de Neptuno, el noveno de Saturno y quizás el octavo de Júpiter, mientras que los restantes satélites de los demás planetas, y éstos mismos, giran en torno de su cuerpo central respectivo en sentido directo, del Oeste al Este. Esta notable excepción es una dificultad seria (pero no la única) en contra de la hipótesis de Laplace sobre el origen de la formación del sistema solar, «tanto más cuanto que una de sus bases es el sentido del movimiento de los planetas y satélites».

§ 146. NEPTUNO.

El descubrimiento de este planeta, hecho en 1846 por *Leverrier*, es uno de los triunfos más hermosos de la inteligencia humana, como lo indicaremos brevemente en la nota.

Neptuno es *invisible* a simple vista: brilla con una luz azulada, pero pálida, como una estrella de octava magnitud; su existencia sólo se ha manifestado por las perturbaciones que ocasionaba al movimiento de Urano. Su *distancia* media al sol equivale a 30 veces la distancia de la tierra al sol. Recorre su *órbita* en 165 años; su movimiento de traslación es aun más lento que el de Urano, porque adelanta *en un año* sólo dos grados, que equivalen a cuatro diámetros aparentes de la luna. Como su *distancia a la tierra* es tan enorme, por ser de unos 4400 millones de kilómetros, ofrece un diámetro aparente muy insignificante; de ahí la dificultad para determinar sus dimensiones y de obtener datos sobre su constitución física. Algunos opinan que su *volumen* equivale a 60 globos terrestres; según otros el volumen es mucho más considerable: lo cierto es que su *densidad* es muy pequeña. Hay indicios de una atmósfera. La acción luminosa y calorífica del sol en las regiones neptúnicas es 900 veces menor que sobre la tierra y por lo tanto la existencia de seres orgánicos, análogos a los que nosotros conocemos, es imposible.

Satélite de Neptuno. Este satélite fué descubierto en 1846, poco después del descubrimiento del planeta, por Lassell de Liverpool, fabricante de cerveza, que fué al mismo tiempo un célebre aficionado a la astronomía. La distancia del satélite es la misma que guarda la luna a la tierra; la revolución en torno del planeta se efectúa en 5 días y 21 horas; pero *el sentido es retrógrado*, del Este al Oeste, según se ha dicho en el párrafo anterior.

Nota histórica. En 1834 encontró *Airy* que el radio vector de la órbita de Urano se diferenciaba de los valores anteriores en una longitud igual a la distancia de la luna. *Boward* demostró que la causa de esta diferencia no podía provenir de las perturbaciones que ocasionaría la atracción de Júpiter y Saturno. En 1841 escribió *Mädler* en su *Astronomía popular*: «Hay sospecha fundada de que existe un planeta más distante que Urano y que es causa de las perturbaciones del movimiento de éste; es de esperar que el análisis matemático obtenga el triunfo de penetrar hasta donde no llega la vista corporal.» Este triunfo lo alcanzó *Leverrier*, que supo por medio de combinaciones y cálculos ingeniosos determinar la posición de un planeta que nadie había visto, y como no disponía de un anteojo suficientemente poderoso, comunicó sus cálculos al astrónomo *Galle* de Berlín, el 23 de septiembre de 1846. Éste descubrió el planeta en un punto del cielo que se diferenciaba solamente en *un grado* de la posición calculada por medio de combinaciones ingeniosas,

cuya base eran *pequeñas perturbaciones* ejercidas sobre Urano: llamaron *Neptuno* al nuevo planeta. Leverrier murió en París el 23 de septiembre de 1877, exactamente 31 años después de su glorioso descubrimiento; este sabio astrónomo era un cristiano piadoso, lo mismo que los PP. *Piazzi*, de *Vico*, *Secchi* de Italia, *Lamont* y *Heis* de Alemania, astrónomos contemporáneos de Leverrier. El astrónomo inglés Adams estudió el problema al mismo tiempo que Leverrier, obteniendo análogo resultado; pero este último fué el primero en dar a conocer su trabajo.

CAPÍTULO SEGUNDO.

COMETAS.

§ 147. PARTES COMPONENTES DE UN COMETA.

La opinión popular designa con este nombre todo astro errante que está provisto de una cola larga, ancha y muy luminosa; su aparición en esta forma (fig. 123) no es un fenómeno tan raro como vulgarmente se cree, ya que en el curso de la era cristiana se encuentran 500 que fueron observados a simple vista. Con el auxilio del anteojo se han encontrado tantos que el espacio cósmico parece materialmente poblado de ellos.

En los cometas más brillantes se distinguen tres partes: el *núcleo* planetoidal, una *atmósfera* que lo rodea, y la *cola*.

La *parte constitutiva* de todo cometa es la *cabeza*, que se compone del núcleo y de la atmósfera: a ésta se dió el nombre de *coma*, palabra griega (κόμη) que significa *cabellera*, y de ella deriva el nombre *cometa* (κομήτης), astro con cabellera. La *coma* tiene mucha semejanza con una nebulosa. A menudo aumenta el brillo de la cabeza hacia el interior, sin manifestar un centro de brillo máximo; a veces también una coma circunda dos o más condensaciones centrales que tienen la forma de un disco circular o semicircular. El núcleo se forma no pocas veces en el período en que el astro es visible, y aun sucede que se divide en el mismo período.

El fenómeno más notable que presentan los cometas algo brillantes, es la *cola*, que el astro arrastra cual larga cabellera luminosa. Es de notar que esta cola se desarrolla, saliendo de la coma, cuando el cometa se acerca al sol: entonces aparece, en dirección opuesta al sol, como un río luminoso y blanco, que se ensancha, perdiendo su brillo en intensidad, a medida que aumenta la distancia al núcleo; generalmente la cabeza es más brillante que la cola, y en ésta los bordes presentan mayor claridad que las partes centrales. Se han observado cometas que tenían varias colas: el de 1744 presentaba siete (fig. 124) y el de 1807 dos.

La intensidad con que brillan los cometas, es muy variada: la mayor parte de ellos sólo son visibles con buenos anteojos; en cambio algu-



Fig. 123. Aparición de un cometa.

nos, como el cometa de 1843, eran visibles en pleno día. En general alcanzan su mayor brillo después de haber pasado el perihelio.

Muy diferente del aspecto de los cometas ordinarios es la forma de los cometas telescópicos, que no son visibles a simple vista;

habitualmente están desprovistos de la cola y a menudo carecen de un núcleo marcado; muchos parecen masas nebulosas de formas más o menos regulares, que siguen trayectorias determinadas. La fig. 125 representa los varios aspectos que ofreció el cometa de 1835 observado por Hérscchel.

§ 148. PORMENORES SOBRE LOS COMETAS.

I. **La magnitud** aparente de la cabeza de los cometas es muy variada, siendo siempre inferior al disco aparente de la luna;

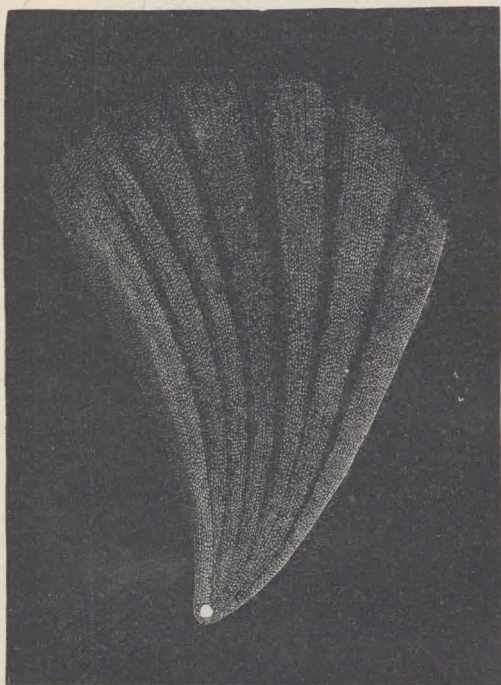


Fig. 124. Cometa de 1744.

sin embargo, sus dimensiones verdaderas son muy grandes, lo que se comprende en consideración a sus distancias enormes. *Ejemplo:* se calculó que la cabeza del célebre cometa de 1811 tenía un diámetro de dos millones de kilómetros (el diámetro del sol no alcanza a un millón y medio). Debe notarse que la dimensión de la cabeza de varios cometas disminuye a medida que el astro se acerca al sol.

Con respecto a las dimensiones de la cola hay diferencias notables: unos cometas tienen un penacho luminoso ape-

nas visible; la cola de otros tiene dimensiones verdaderamente asombrosas. El cometa de 1861 ocupaba en el cielo una extensión de 97° , de suerte que, estando la cabeza en la culminación, la extremidad de la cola se hallaba todavía debajo del horizonte. El cometa de 1680 abarcaba en el cielo más de 100° . Se comprende que a tales diámetros aparentes debe corresponder una longitud a primera vista increíble. Se ha calculado que la cola del cometa de 1843 tenía una longitud de 250000000 km , excediendo en 100000000 la distancia de la tierra al sol. La cola del cometa de 1811 tenía

110000000 *km.* Lo que más extrañeza causa es el hecho de que no pocas veces un cometa llegue a dimensiones tan enormes en el término de pocos días y aun de pocas horas durante el período de su vecindad del sol.

II. **Trayectorias.** Los cometas presentan, además, movimientos y órbitas excepcionales y en parte misteriosas, con lo cual ofrecen su marcada diferencia con los planetas. *Los cometas no se encierran en una zona determinada, como lo es el zodiaco, sino que atraviesan*

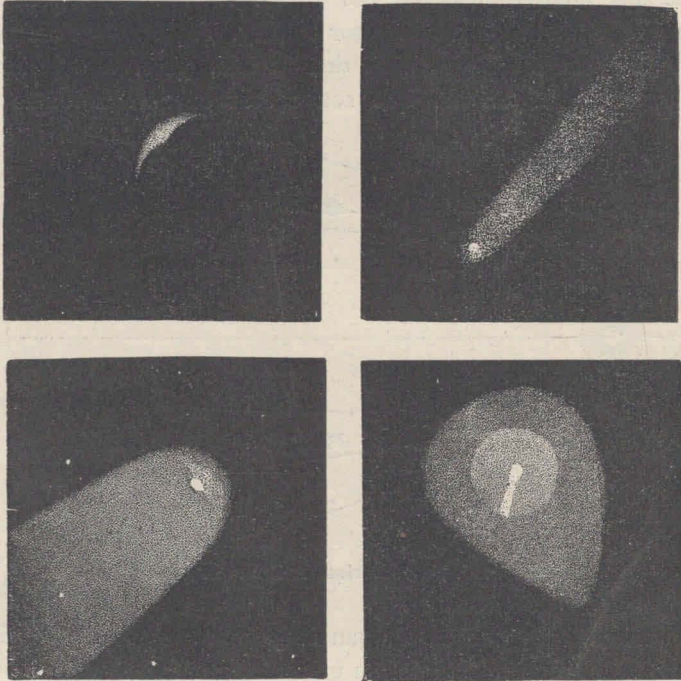


Fig. 125. Varios aspectos del cometa de 1835.

la esfera celeste en todas las direcciones, y sus trayectorias cruzan la eclíptica bajo todos los ángulos posibles.

Estos hechos prueban que no son hijos del sol, sino astros verdaderamente errantes, que, volando libremente por los espacios del Universo, entran en la esfera de la atracción solar y se ven a veces obligados a sujetarse al dominio del sol y a formar parte de nuestro sistema planetario. Muchos de entre ellos se retiran otra vez a la inmensidad del espacio; pero otros siguen girando alrededor del sol en órbitas determinadas, por lo cual llevan el nombre común de **cometas periódicos**.

En cuanto a la forma de sus trayectorias existe una notable diferencia con las órbitas planetarias: habiéndose calculado las trayectorias de unos trescientos cometas, se ha encontrado que su forma afecta una de las tres siguientes: o es elíptica, o parabólica, o hiperbólica, pero nunca se acerca a la circular. (La fig. 126 representa estas tres curvas.)

III. **Los cometas periódicos** describen siempre *elipses* muy alargadas, esto es, de suma excentricidad, de suerte que el perihelio guarda una notable distancia del afelio. La fig. 127 representa la órbita del cometa observado por Halley. Aquellos cometas cuya vuelta al sistema solar no está demostrada, parecen describir una *parábola* o una *hipérbola*, que son curvas cuyas dos ramas no se

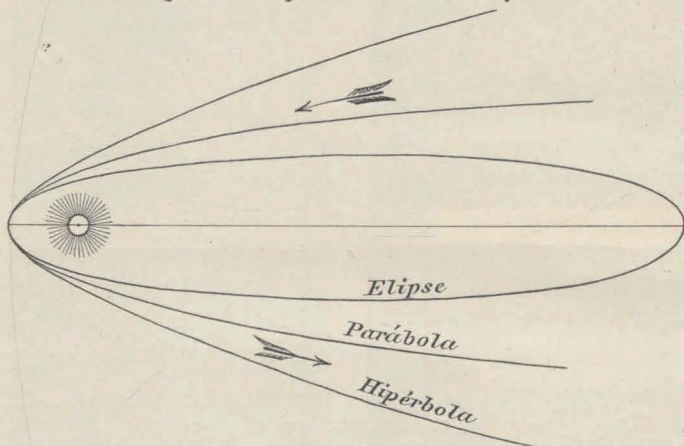


Fig. 126. Trayectorias de los cometas.

cierran nunca, sino que se alargan indefinidamente. En ciertas circunstancias la trayectoria, que era una parábola, puede transformarse en una elipse: entrando el cometa en el sistema solar, se acerca a los planetas y entonces experimenta los efectos de la atracción que sobre él ejerce cada uno de ellos, y en su virtud la velocidad del intruso se acelera o se retarda. Ahora bien: si el efecto resultante hace retardar el movimiento del cometa, la curva se cierra y el astro, aprisionado por el sol y los planetas, no vuelve más a los espacios cósmicos.

IV. **La velocidad** de un cometa periódico ofrece notables variaciones entre el máximo y el mínimo, puesto que depende, como sabemos, de la mayor o menor distancia al centro de atracción. Basta recordar un ejemplo para manifestar esta irregularidad en el movimiento cometario: el cometa de 1680 tenía en el peri-

helio una velocidad de 390 *km* por segundo, y en el afelio era solamente de 4 *m*. Comparando este pequeño valor con la enorme longitud de la órbita, podemos a priori suponer que el tiempo transcurrido en una revolución ha de ser grande: se conocen diecinueve cometas solamente, cuyo tiempo de revolución es inferior a cien años (el cometa de Encke gasta solamente tres años y medio), pero la mayor parte necesita centenares y aun miles de años para recorrer una vez su órbita, según los cálculos efectuados por Encke; el mencionado cometa de 1680 recorre su órbita en unos 8800 años.

V. Cometas periódicos.

Sólo se conocen unos diez de esta clase, cuyos elementos son bien definidos. Mencionemos los cuatro principales.

1. *Cometa de Halley*, descubierto en 1662; su revolución dura 76 años; la fig. 127 representa la forma de su notable órbita¹.

2. *Cometa de Encke*: revolución cerca de tres años; este tiempo se hace poco a poco menor, acortándose el eje mayor de su órbita, por lo cual se supone que finalmente se precipitará sobre el sol.

3. *Cometa de Faye* (1843) revolución en siete años.

4. *Cometa de Biela*, ya no existe; fué descubierto por el oficial austriaco Biela en 1826 y ejecutaba su revolución en seis años y nueve meses. En 1846 apareció dividido en dos, pero cerca uno de otro; en 1852 reaparecieron ambos, pero separados el uno del otro por unos dos millones y medio de kilómetros; desde entonces han desaparecido, ignorándose la causa.

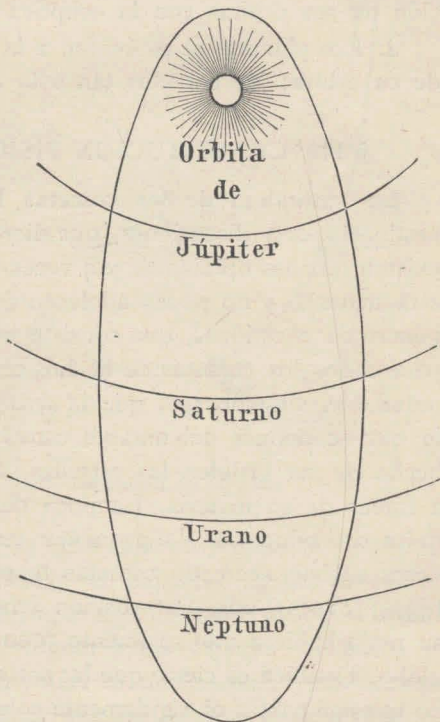


Fig. 127. Órbita del cometa de Halley.

¹ A fines de abril de 1910 muchos de nuestros lectores habrán visto este cometa: ¡ojalá pudiesen verlo por segunda y última vez en 1986!

VI. Diferencias entre cometas y planetas.

1. La *forma* y las *dimensiones* de un planeta son constantes, las de un mismo cometa muy variables (fig. 125).
2. Las *órbitas* de los planetas, aunque elípticas, difieren poco de la forma circular; las de los cometas son elipses de gran excentricidad o parabólicas (fig. 126).
3. Los planetas se mueven dentro de la zona del *zodiaco*; los cometas vienen de todas las partes de la esfera celeste, y la inclinación de sus órbitas con la eclíptica varía desde 0 hasta 90 grados.
4. Los planetas se presentan a la *observación* en cualquier punto de su órbita; los cometas tan sólo en la vecindad del sol.

§ 149. CONSTITUCIÓN FÍSICA DE LOS COMETAS.

La naturaleza de los cometas ha sido objeto de prolijas investigaciones y discusiones, que dieron escasos resultados positivos; existen muchas opiniones, y a veces nada más que conjeturas, sobre esta materia, y no pocas adolecen del defecto tan frecuente en este género de cuestiones, que consiste en sacar consecuencias generales para todos los cometas de hechos observados en uno u otro. Parece indudable, sin embargo, que la *densidad* de los cometas es pequeña, lo que se deduce del notable cambio que sufren sus formas, y del hecho de ser visibles las estrellas, aun las de pequeña magnitud, a través de su materia. La poca densidad de sus partículas materiales se deduce de la pequeñez relativa de su *masa*; no pocas veces se han acercado cometas tanto a la tierra que hubiesen debido provocar una perturbación sensible en la órbita terrestre, si su masa hubiera sido solamente 5000 veces menor que la de nuestro globo. También es cierto que las *materias* de que constan los cometas, no son compactas ni rígidamente coherentes. Sobre la naturaleza del núcleo en particular no hay más que conjeturas: unos le atribuyen la densidad de los metales, otros opinan que son globos en estado líquido, compuestos de agua y de combinaciones hidrocarbúricas; algunos los consideran como enjambres de meteoritos.

En cuanto a la constitución y a la formación de la *cola*, proponemos las explicaciones que siguen y que hoy día son generalmente admitidas, aunque no formen una teoría sólidamente establecida. Es indudable que la cola no puede considerarse como un apéndice fijamente coherente con el núcleo, porque en este caso debería separarse y deshacerse a causa de la enorme velocidad con que el núcleo se mueve en el perihelio. Lo más natural es

admitir que las materias del núcleo se evaporan en la cercanía del sol, formándose una columna de vapor, a semejanza de lo que observamos en una locomotora, recordando sin embargo que la comparación no es completa. Se dirá que en esta suposición los núcleos de los cometas periódicos deben perder en masa todas las veces que se acercan al sol. Efectivamente *parece* que esto sucede. El cometa de Halley tenía antes una cola más brillante y más voluminosa. Los cometas que frecuentemente llegan a la vecindad del sol, están aún desprovistos de un penacho sensible, como lo está el cometa de Encke.

Veamos finalmente cómo se explica *la forma y la dirección de la cola*, que se dirige en sentido opuesto al sol. Acercándose el

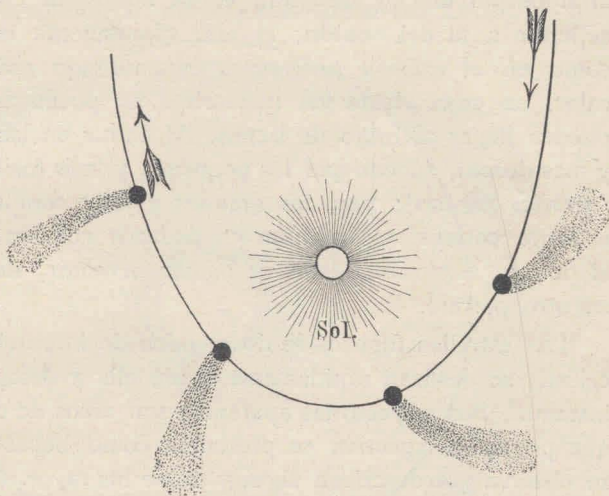


Fig. 128. Dirección de la cola.

cometa al astro hay radiación de una materia luminosa desde el núcleo, primero hacia el sol; luego el penacho da media vuelta con tendencia a apartarse del sol, apareciendo como una cola arrasada por el cometa. ¿Por qué toman estos vapores tal forma y dirección en vez de rodear y envolver al núcleo como una atmósfera? Para explicarlo basta suponer que los vapores al desarrollarse forman electricidades del mismo nombre que la acción eléctrica emanada del sol, de suerte que estos vapores enrarecidos y electrizados toman una posición como si fuesen repelidos por el sol, según lo indica la fig. 128.

CAPÍTULO TERCERO.

METEOROS CÓSMICOS.

§ 150. ESTRELLAS FUGACES.

En noches serenas se observa a menudo el fenómeno que nos causa la ilusión como si cayesen del cielo una o muchas estrellas,

cual ráfagas luminosas, dejando en pos de sí una estela, para apagarse en seguida. El fenómeno es conocido desde tiempos muy remotos; pero sólo desde hace unos cien años se conocen su origen y su naturaleza. La palabra «meteoritos» (o meteoros) se deriva del griego μετά, *cambio*, y αἶψα, *yo elevo*, y se designan con este nombre general unos pequeños cuerpos cósmicos, dotados de un movimiento rápido, que en su curso se acercan a la tierra y son atraídos por ella, y penetran en la atmósfera con una velocidad superior a la del sonido; el aire rápidamente comprimido actúa como en el *eslabón neumático*, engendrando gran intensidad de calor, en cuya virtud los meteoritos se ponen incandescentes, y pueden llegar al brillo de Venus. Al entrar en las capas inferiores y más densas, sucede que los pequeños y más fusibles se evaporan (*estrellas fugaces*); pero los grandes y muy compactos, o caen en la tierra enteros, o revientan en pedazos con un ruido semejante al de una explosión: éstos se llaman *aerolitos*; de ellos se tratará en otro párrafo.

Las estrellas fugaces se desprenden de improviso de la bóveda celeste, se deslizan rápidamente sobre ella y desaparecen en pocos instantes. Sus trayectorias aparentes son arcos de círculos máximos, que por la perspectiva se presentan como líneas rectas. A veces se observa que describen zigzags como los rayos. (Existen métodos especiales para calcular la distancia del punto donde el fenómeno se verifica: por medio de los resultados obtenidos se ha podido determinar con aproximación la altura de la atmósfera.)

Su *número* es mayor de lo que parece: un observador puede ver unos cuatro de estos meteoros por hora, y con razón se admite que muchos miles penetran cada día en nuestra atmósfera. Con respecto al número que por hora son visibles, las variaciones pueden ser regulares y extraordinarias. Las primeras se distinguen en tres categorías:

1ª Las variaciones diurnas: porque el número horario es mayor hacia el fin de la noche.

2ª La variación azimutal: observamos por hora un número mayor en la dirección al Este que no hacia el Oeste.

3ª La variación anual: el número horario es mayor desde el 1º de julio hasta el 1º de enero, que en lo restante del año.

(Estas variaciones encuentran su explicación en la rotación de la tierra; pero la omitimos en consideración del destino del texto presente.)

La variación irregular se manifiesta por grandes *enjambres* en dos épocas del año: el uno aparece hacia el 13 de noviembre, aunque no con la misma intensidad cada año, pero formando un período de unos 33 años, en que vuelve a producirse de igual manera; el otro enjambre aparece hacia el 10 de agosto (lágrimas de San Lorenzo).

Los meteoros del enjambre de noviembre se llaman Leónidos, porque parecen desprenderse de la constelación del León; los me-

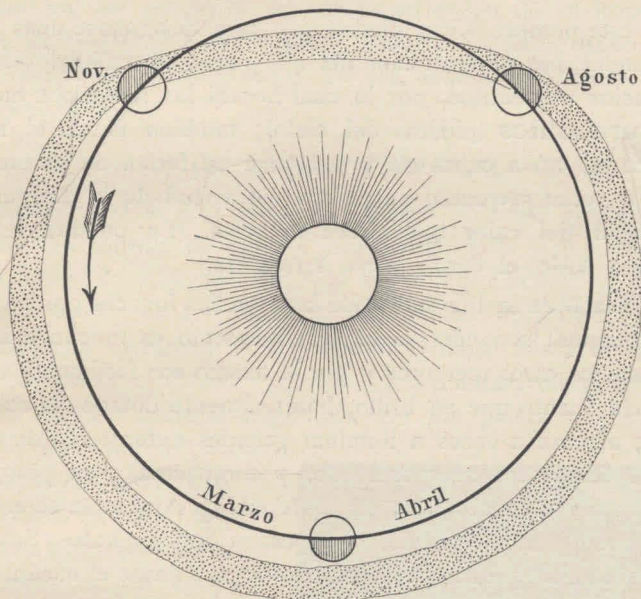


Fig. 129. Órbita del enjambre de meteoritos

teoritos del enjambre de agosto se llaman Perseidos, porque salen de un punto de la constelación de Perseo.

No se ha podido hallar la velocidad de las estrellas fugaces aisladas o esporádicas, que sin duda se asemejan a los cometas y parecen pertenecer a los espacios cósmicos. En cuanto a los enjambres de noviembre y agosto, se puede determinar su órbita, porque se conoce el foco, que es el sol, un punto y la tangente en este punto. De los Perseidos sábese que su órbita pasa por el punto que la tierra ocupa el 10 de agosto (fig. 129) y que la tangente a este punto se dirige hacia Perseo. En cuanto a los Leónidos, se sabe que su órbita pasa por el punto que ocupa la tierra el 13 de noviembre, y que la tangente se dirige hacia el

León, y, aun más, que la duración de su revolución es de unos 33 años, de suerte que se admite con razón la forma elíptica de esta órbita.

Nota. Según Schiaparelli, la órbita de los Perseidos coincide sensiblemente con la del cometa de 1862; según Péters, la órbita de los Leónidos coincide próximamente con la del cometa de 1866 descubierto por Témpel.

§ 151. AEROLITOS.

Con este nombre (λίθος, piedra, ἀήρ, aire) designanse unas *piedras* muy grandes que parecen caer del aire; pero en realidad vienen de los espacios planetarios, por lo cual Secchi las llama con más propiedad **uranolitos** (piedras del cielo); también llevan el nombre de **bóldos**, no a causa de presentarse en forma de globos, sino porque a veces revientan en el aire en virtud de la desigual conductibilidad del calor que ofrece su masa. (La palabra se deriva del griego βολίς, el dardo, arma arrojadiza.)

Los aerolitos se diferencian de las estrellas fugaces por caracteres bien marcados: son cuerpos cuyo movimiento es mucho más lento que el de los otros meteoros y por lo mismo son fácilmente visibles, tanto más cuanto que su brillo, habitualmente dotado de calor rojo o verde, alcanza a veces a iluminar grandes extensiones de una comarca. Además son cuerpos sólidos y compactos, y su peso puede llegar a unos 100 quintales; en la República Argentina se encontró, ciento y veinte años ha, uno que pesaba 300 quintales. Sus apariciones, sin embargo, son relativamente raras: desde el nacimiento de Nuestro Señor Jesucristo, las crónicas han apuntado 1500 casos de aerolitos caídos del aire; y aunque admitamos algunos miles, cuya aparición pasaba sin que se consignara por escrito, con todo el número sería insignificante en comparación con los miles de estrellas fugaces que se pueden observar en una sola noche. Con razón se consideran los aerolitos como una especie de pequeños planetoides que se mueven alrededor del sol (o tal vez alrededor de la tierra), y tan sólo se hacen visibles al cruzar nuestra atmósfera, como queda explicado; las estrellas fugaces parecen más bien ser copos de vapores densos y manifiestan una analogía notable con los cometas.

La constitución química de los aerolitos se conoce perfectamente bien, gracias al análisis hecho de gran número de ellos. En general se componen de sustancias que existen en nuestro globo, aunque la combinación de los elementos sea a veces diferente de

las que se observan en los cuerpos terrestres: pueden dividirse en tres categorías. Una clase presenta una composición semejante a la de nuestras rocas cristalinas, predominando la sílice, las arcillas y la cal en variadas combinaciones; otra categoría comprende aquellos en que predomina el hierro en aleación con el níquel; también se han encontrado cuya composición es una mezcla granulenta de hierro meteórico, piritita magnética y olivín (*Rose*, célebre mineralogista). He aquí los elementos principales que se han encontrado en los aerolitos, colocados en orden de su importancia: hierro, magnesio, sílice, oxígeno, níquel, cobalto, titanio, estaño, cobre, aluminio, potasio, sodio, fósforo, ázoe, azufre, cloro, carbono, hidrógeno, etc.

§ 152. LA LUZ ZODIACAL.

Cuando el cielo está puro y la noche obscura, puede verse en el cielo una especie de cono o huso oblongado y luminoso, pero de un brillo débil y semejante al de la Vía Láctea; la base está del lado donde el sol se halla debajo del horizonte, y el eje, que sigue la dirección de la eclíptica, llega hasta la altura de unos 60° , más o menos: éste es el fenómeno designado con el nombre de luz zodiacal (fig. 130). En los países tropicales esta luz es visible durante todas las épocas del año; pero en las regiones de mayor latitud se ofrece a la observación en las épocas de los equinoccios, a saber: en febrero y marzo después del crepúsculo de la tarde y en septiembre y octubre por la mañana, antes del crepúsculo.

Una explicación satisfactoria de este fenómeno no existe y las opiniones sobre este punto son muchas y divergentes. Se supone la existencia de un anillo formado de neblina o de polvo, cuya densidad es pequeña, pero su anchura no-

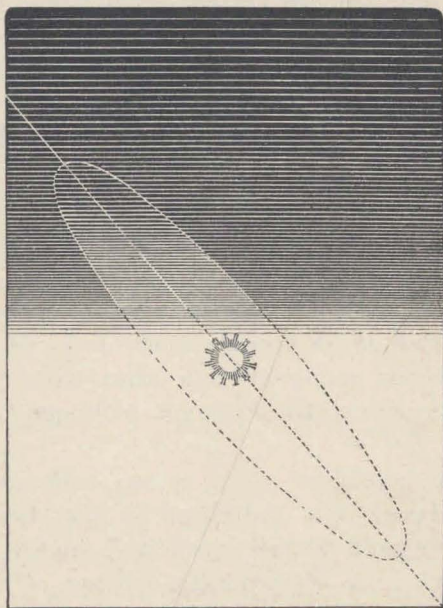


Fig. 130. Luz zodiacal.

table: este anillo gira en torno del globo terrestre, según la opinión de unos entre la órbita de Venus y la tierra, según otros entre la luna y la tierra. Se hace visible por la reflexión irregular de la luz solar. Que la masa de esta luz no es gaseosa, aunque las estrellas son visibles a través de ella, parece probable, porque ellas no pierden su brillo ni sufren refracción, ya que su posición queda invariable.

Cerca del horizonte opuesto se observa a menudo otra luz zodiacal más débil, que es el reflejo de la principal y está unida a ella por una especie de puente luminoso. Con el plano del horizonte forma la luz zodiacal un ángulo que varía entre 50 y 70 grados.

LIBRO NONO.

ESTRELLAS Y NEBULOSAS.

CAPÍTULO PRIMERO.

ESTRELLAS Y CONSTELACIONES.

§ 153. GENERALIDADES.

Si examinamos la bóveda celeste en varias direcciones, hallaremos a primera vista una notable diferencia en el brillo con que las estrellas se presentan a nuestra observación; pero al fijarnos atentamente en su colocación, descubrimos ciertas agrupaciones que parecen afectar formas geométricas si juntamos por medio de líneas imaginarias varios astros no muy distantes: tales son la Cruz, la Corona, la Lira, el Carro, el Cuadrado, etc.; estas agrupaciones se designan con el nombre de **constelaciones**. La división del cielo en grupos es muy antigua, y la denominación de sus figuras se refiere a héroes o animales, o a ciertos instrumentos. Hesíodo y Homero hablan de las Pléyadas, de las Híadas, de Orión, del Escudo de Aquiles, y de la Osa mayor, «que nunca se baña en las aguas del Océano» (por ser circumpolar): la mención más antigua de constelaciones se halla en el libro de Job.

Tolomeo, el gran matemático y astrónomo de Alejandría, señala 48 constelaciones en su obra «Gran sintaxis de la Astronomía». Poco a poco se agregaron tantas, que hoy día su número llega a 117, siendo ahora imposible agregar una nueva sin quitar otra.

Las estrellas que más sobresalen por su brillo, recibieron sus nombres de los egipcios, y más aún de los árabes, por ejemplo: Sirio, Aldebarán, Betelgoso, Altair, Fomalhaut, etc., y componen la categoría de las estrellas de primera magnitud. El astrónomo *Bayer* denotó en 1603 las estrellas de una misma constelación con

Brugier, Cosmografía.

las letras del alfabeto griego en orden de su brillo, denotando con la letra α la más brillante; más tarde fué necesario emplear números, y así se dice, por ejemplo, la estrella 61 del Cisne.

He aquí la lista de las estrellas de primera magnitud, colocadas por orden de su brillo:

- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Sirio, en el Can mayor. | 11. Aldebarán, en Tauro. |
| 2. Canopo, en el Navío. | 12. β del Centauro. |
| 3. α del Centauro. | 13. α de la Cruz. |
| 4. La Cabra, en el Cochero. | 14. Antares, en el Escorpión. |
| 5. Arturo, en el Boyero. | 15. Altair, en el Águila. |
| 6. Vega, en la Lira. | 16. Espiga, en Virgo. |
| 7. Achernar, en el Erídano. | 17. Fomalhaut en el Pez austral. |
| 8. Rígel, en Orión. | 18. β de la Cruz. |
| 9. Proción, en el Can menor. | 19. Pólux, en Géminis. |
| 10. Betelgoso, en Orión. | 20. Régulo, en León. |

§ 154. DIVISIÓN DE LAS CONSTELACIONES.

Existen cartas que presentan la esfera celeste por medio de dos hemisferios, uno boreal y otro austral, que son proyecciones sobre el plano del ecuador celeste: así quedan las constelaciones divididas en boreales y australes, ya que el ecuador es el plano de separación. Esta división, con ser natural, ofrece el inconveniente de hallarse en varios casos una misma constelación cortada en dos partes, una austral y otra boreal, como sucede con Orión, Virgo, etc.

Tomando por plano de separación el plano de la eclíptica, la que tiene una mitad en el hemisferio austral y otra en el boreal, se dividen las constelaciones de la manera siguiente: se llaman constelaciones eclípticas aquellas por las cuales pasa la eclíptica; se consideran como boreales o como australes, las constelaciones cuando se hallan respectivamente al Norte o al Sur de esta curva sin tener en cuenta el hemisferio. Para cada una de las tres divisiones daremos algunas constelaciones principales, siguiendo el orden creciente de sus ascensiones rectas; los números que se agregan entre paréntesis, indican el número de estrellas visibles a simple vista, según *Gould*; sin embargo en las boreales ponemos el número indicado por el astrónomo alemán *Heis*.

I. Constelaciones eclípticas. 1. Aries (31); 2. Tauro (188); 3. Géminis (106); 4. Cáncer (100); 5. Leo [León] (161); 6. Virgo (271); 7. Libra (122); 8. Escorpio (185); 9. Sagitario (298); 10. Capricornio (134); 11. Acuario (276); 12. Piscis (40).

II. Constelaciones boreales. 1. Andrómeda (139); 2. Casiopea (126); 3. Perseo (136); 4. Cochero (144); 5. Osa menor (54); 6. Osa mayor (227); 7. Boyero (140); 8. Corona (51); 9. Hércules (227); 10. Lira (69); 11. Águila (145); 12. Cisne (197).

III. Constelaciones australes. 1. Orión (186); 2. El Navío (829); 3. Can mayor (178); 4. Can menor (41); 5. Paloma (112); 6. La Hidra (393); 7. La Cruz (54); 8. Centauro (389); 9. Triángulo (46); 10. El Lobo (159); 11. El Altar (86); 12. Pez Austral (75); 13. Eridano (293); 14. Fénix (139).

Agréguese las dos *Nubes de Magallanes*, que son propiamente nebulosas.

§ 155. EL ASPECTO DEL CIELO ES DISTINTO EN DIFERENTES ÉPOCAS DEL AÑO.

Con el auxilio de medidas exactas, se ha comprobado que las estrellas fijas guardan entre sí durante el año una posición relativa invariable; sabemos, además, que las constelaciones ofrecen siempre la misma forma característica. Por otra parte el aspecto del *cielo* ofrece al observador atento un cambio que vamos a proponer por medio de un ejemplo concreto. En una determinada región del hemisferio austral la hermosa constelación conocida por el nombre de *Orión*, pasa a principios de febrero a las 8 de la tarde, próximamente, por el meridiano; pero pocos meses después hallamos que, a la *misma hora*, esta constelación se ha apartado notablemente hacia el Occidente, y que estrellas que en febrero estaban a estas horas cerca del horizonte, se encuentran ahora a cierta altura. Sin entrar en detalles, que se estudiaron en otros capítulos, daremos alguna breve explicación del fenómeno mencionado.

Sabemos que la tierra tiene un movimiento de rotación sobre su eje, del Occidente al Oriente, y que en su virtud recibimos la impresión como si el firmamento girase en torno de la tierra, del Oriente al Occidente, lo cual constituye *el movimiento general diurno*, y es rigurosamente uniforme. Si no hubiese ningún otro movimiento, no habría cambio en el aspecto del cielo con referencia a las estrellas. Pero es el caso que el sol (en realidad la tierra) tiene además un movimiento de traslación en dirección contraria al movimiento general diurno (lo mismo que la luna y los planetas), de donde resulta que el sol *retrasa* cada día su paso por el meridiano unos cuatro minutos. «Existen, pues, dos movimientos

simultáneos: uno que es general, diurno, y otro, en sentido contrario al primero, que es propio de algunos astros. Este doble movimiento causa en nosotros la ilusión de un movimiento de conjunto de la bóveda celeste, en el mismo sentido que el movimiento general diurno: van pasando por el meridiano de un lugar estrellas cada vez más orientales. Resulta también que no vemos siempre las mismas constelaciones durante el año encima de nosotros; algunas se mueven sobre nuestro horizonte durante la claridad del día, para brillar más tarde durante la noche.»

§ 156. PASAN POR EL MERIDIANO DE 59° OESTE A LAS 9 P. M. LAS SIGUIENTES ESTRELLAS PRIMARIAS.

			Ascensión recta		Declinación		Vista al	Altura
			Horas	Minutos		Grados	Minutos	
Enero	10	Aldebarán	4	29	N	16	17	N 38°
»	19	Rígel	5	—	S	8	19	N 63°
»	19	Cabra	5	—	N	45	52	N 9°
»	29	Betelgoso	5	49	N	7	23	N 47°
Febrero	6	Canopo	6	21	S	52	37	S 72°
»	11	Sirio	6	40	S	16	35	N 71°
»	21	Proción	7	33	N	5	30	N 49°
»	26	Pólux	7	38	N	28	17	N 26°
Abril	6	Régulo	10	—	N	12	30	N 42°
Mayo	13	α de la Cruz	12	20	S	62	28	S 62°
»	18	β de la Cruz	12	41	S	59	—	S 65°
»	27	Espiga	13	19	S	10	34	N 65°
Junio	5	β del Centauro	13	53	S	59	49	S 65°
»	9	Arturo	14	10	N	26	10	N 35°
»	14	α del Centauro	14	33	S	66	23	S 64°
Julio	11	Antares	16	22	S	26	10	N 81°
Agosto	13	Vega	18	33	N	38	40	N 16°
Septiembre	2	Altair	19	45	N	8	34	N 46°
Octubre	23	Fomalhaut	22	51	S	30	12	N 85°
Diciembre	1	Achernar	1	33	S	57	47	S 67°

Observaciones. 1. Esta tabla fué publicada con respecto a Montevideo por el distinguido ingeniero N. Piaggio en su «Curso de Astronomía»; ella manifiesta el día del año en que cada una de las estrellas de primera magnitud pasa a dicha hora por aquel meridiano. Esta hora es sensiblemente la misma para todos los puntos de la República Argentina y de Chile, pues el paso por el meridiano sólo se adelanta unos diez segundos por cada quince grados de longitud hacia el Occidente. (En cuanto a las horas no seguimos el meridiano de Córdoba en los párrafos siguientes.)

2. La penúltima columna manifiesta si el paso se efectúa al Norte o al Sur del cenit de Buenos Aires, y a qué altura sobre el horizonte; estas dos circunstancias ayudan mucho para reconocer con facilidad la estrella. (La altura se pone en números redondos, lo que basta para la orientación; si la latitud del punto de observación fuese muy diferente de 34^0 , debe cambiarse la altura, despejando Z en la fórmula $D = H \pm Z$, en que H y D son conocidas.)

3. Como las estrellas adelantan su paso 4 minutos al día sobre el tiempo solar, resulta que lo adelantan 2 horas por mes, y en seis meses 12 horas. *Ejemplo:* Sirio pasa por el meridiano de Buenos Aires a las 9 p. m. el 11 de febrero. El 11 de agosto efectúa su paso a las 9 de la mañana; a mediados de diciembre está encima del horizonte a las 10 de la noche.

§ 157. ORIENTACIÓN PREVIA.

I. Con el fin de facilitar a los alumnos la orientación en la esfera celeste, pondremos aquí algunas indicaciones prácticas. Ante todo se ha de conocer la dirección del meridiano, a lo menos próximamente: basta para ello fijarse en la posición del sol a mediodía, que es la hora de su paso. (En Buenos Aires la calle Florida y sus paralelas llevan la dirección del meridiano, *más o menos*¹.) En segundo lugar, débese conocer la extensión del horizonte respectivo, esto es, el hemisferio celeste que sea visible desde la latitud del punto de observación. Si dispone el alumno de un globo celeste, basta colocar el polo *Sur* encima del círculo horizontal, y dar al eje una inclinación igual a la altura del polo (en Buenos Aires es de $34^0 36'$); el círculo metálico vertical se pone en la dirección del meridiano. Si el 11 de febrero ponemos Sirio en el meridiano, el globo ofrece el aspecto del cielo en aquel momento para la latitud mencionada. Por medio de una construcción sobre el papel, se puede hacer la orientación general de la manera siguiente, para una latitud cualquiera, v. gr., de 35^0 Sur (fig. 131). Sabemos que la distancia cenital del ecuador es siempre igual a la altura del polo (por tener el mismo complemento); por lo tanto el ecuador tiene la altura de 55^0 sobre el horizonte, y en esta región se halla la zona ecuatorial. El paralelo que limita la región circumpolar, dista 35^0 del polo: son, pues, circumpolares las estrellas cuya declinación Sur es superior a 55^0 , por ejemplo,

¹ En Córdoba el Corso, en Santiago de Chile la calle San Antonio.

la Cruz; pero Canopo no lo es del todo, porque su declinación es de $52^{\circ} 37'$ (a latitud de 38° Sur, Canopo es circumpolar). Como

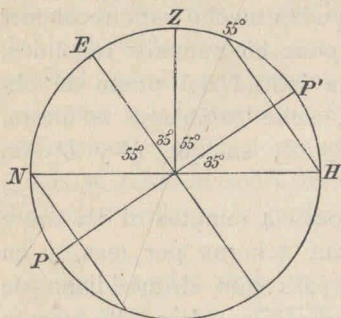


Fig. 131. El hemisferio visible.

en Buenos Aires el ecuador dista $55^{\circ} 24'$ del horizonte, se harán *sucesivamente* visibles las constelaciones boreales cuya declinación Norte no excede este número, y por lo tanto la mayor parte de las estrellas más notables; pero son invisibles en esta latitud aquellas que distan menos de 35° del polo boreal, tales como la Osa menor, la Osa mayor, Casiopea, etc.

Es de notar, sin embargo, que las estrellas situadas en los *pies* de la Osa mayor son visibles cerca del horizonte Norte.

Como en Santiago de Chile $\varphi = 33^{\circ} 26'$, el ecuador dista $56^{\circ} 34'$ del horizonte, y por lo tanto vale sensiblemente lo dicho para esta capital, y para Valparaíso, lo mismo que para Montevideo.

II. Para un punto de Europa (latitud boreal) la orientación se hace de una manera análoga. Tomemos, por ejemplo, Barcelona ($\varphi = 40^{\circ}$) y los puntos situados más o menos en la misma latitud (Roma, Madrid). En la fig. 131 se substituyen los grados 35 por 40, y 55 por 50, el polo P' por P . El paralelo circumpolar boreal dista 50° del ecuador: son, pues, circumpolares la Osa menor, el tronco y la cola de la Osa mayor (pero no lo son sus patas), el Dragón, Cefeo, Casiopea, etc.

El paralelo circumpolar austral dista también 50° del ecuador: son, pues, invisibles del todo las constelaciones y estrellas cuya declinación es superior a este número, como son la Cruz del Sur, el Centauro, Canopo, la Nube, el casco del Navío.

Son sucesivamente visibles todas las grandiosas constelaciones de la zona ecuatorial (véase la carta al fin de este libro), lo mismo que las tan caracterizadas constelaciones con los hermosos florones de primera y segunda magnitud del cielo boreal, que nada tiene que envidiar al hemisferio austral.

§ 158. BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS CONSTELACIONES VISIBLES EN BUENOS AIRES, SANTIAGO DE CHILE, MONTEVIDEO, ETC.

Desde cualquier punto del hemisferio austral son visibles todas las constelaciones australes; pero el número de las boreales visibles

depende de la mayor o menor latitud. Para concretar la explicación, daremos la orientación con respecto a Buenos Aires, la cual podrá aplicarse con facilidad a otros puntos de Sudamérica, recordando la diferencia de longitud y latitud, según queda dicho en los párrafos precedentes. La carta de la zona ecuatorial que se halla al fin de este libro, ayudará al alumno para encontrar, con auxilio de los avisos prácticos siguientes, las constelaciones más importantes. En el uso de los globos y cartas celestes debe el principiante recordar que de dos constelaciones o estrellas, aquella está más hacia el Este que tiene mayor ascensión recta, expresada en horas o grados.

Enero y febrero. Hacia fines de enero escojamos una noche sin luna, y observemos a **Orión**, que está en el meridiano a las 9 (fig. 132); es un gran cuadrilátero montado sobre el ecuador, y formado por dos estrellas primarias: α que es *Betelgoso* (al Norte), y β que es *Rigel* (al Sur); las otras dos son de segunda magnitud (γ es *Bellátrix*, frente al Toro).

En el interior del cuadrilátero hay tres notables estrellas en línea recta; su conjunto se designa con diferentes nombres: los Tres Reyes, las Tres Marías (las que fueron a ver el sepulcro del Señor), y en árabe el *Tahalí*. Por medio de esta constelación podemos conocer las demás que se hallan en esta época sobre el horizonte¹.

1. *Al Norte del ecuador* (fig. 132 y Zona ecuatorial al fin del libro). Mirando al centro de Orión, y bajando la visual hacia el horizonte boreal, encontramos la brillante estrella *Cabra* (o *Capella*), en el **Cochero**, y en su vecindad los *Tres Cabritos*, que forman un triángulo: a igual distancia de la *Cabra* y Orión hay una estrella secundaria que es *Nath* en el cuerno del **Toro**: entre *Nath* y la *Cabra* está la constelación del **Cochero**. Si prolongamos la recta del *Tahalí* al Noroeste (a nuestra izquierda), damos con un grupo que forma una V (es la frente del Toro), y en su extremo está *Aldebarán*, estrella rojiza y primaria, en el ojo del Toro; las estrellas pequeñas de este grupo son las *Hyadas*. La misma recta, prolongada algo más al Noroeste, nos conduce a las célebres *Pléyadas* de los poetas antiguos; se conocen bajo el nombre de las *Siete Cabrillas*, aunque tan sólo seis son visibles a simple vista;

¹ Téngase bien presente que la descripción se refiere a un punto del hemisferio austral; desde Europa se verían esas estrellas mirando al Sur; y las direcciones izquierda y derecha deberían cambiarse.

Alcione, la más brillante de entre ellas, es de segunda magnitud. (Están en el cuello del Toro.) Entre Aldebarán y Orión aparece como una hilera de estrellas, que forman el escudo del héroe.

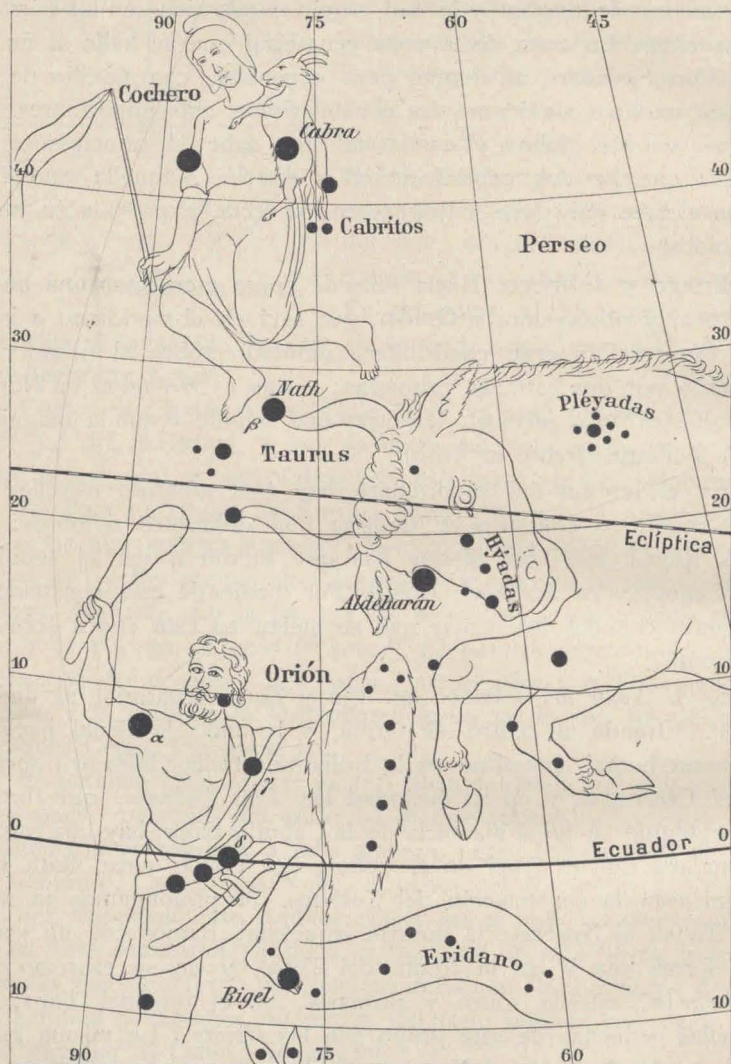


Fig. 132. Orión y estrellas vecinas.

Algo distante de las Pléyadas, al Oeste, encontramos la constelación **Aries** con tres estrellas que afectan la forma de una especie de pistola: α (*Hamal*) es secundaria; debajo de Aries, al Norte, está el *Triángulo boreal*, que se reconoce fácilmente.

Volvamos la mirada al Este de Orión. Tirando desde Bellátrix una línea a Betelgoso y prolongándola encontramos *Proción*, de primera magnitud, y otra menos brillante: las dos pertenecen al **Can menor**, poco distante del ecuador.

Al Norte de *Proción* brillan dos estrellas que llaman la atención: son *Cástor* y *Pólux* (la de mayor brillo), que representan la cabeza de cada uno de los Gemelos (**Géminis**): trazando dos líneas paralelas a través de la Vía Láctea, desde *Cástor* y *Pólux* hasta cerca de Orión (donde se juntan con dos estrellas casi paralelas a aquéllas), se formará un gran paralelogramo, al Nordeste de Orión, que es la constelación Géminis.

Si en la misma noche esperamos hasta las 11, aparece al Este *Régulo*, de la constelación **León**; la línea que va desde el centro de Orión a *Proción*, nos conduce a esa estrella primaria, que honra la memoria de la acrisolada fidelidad del valiente patricio romano. La constelación misma se caracteriza por cinco estrellas en los vértices de un pentágono irregular, y ofrece además una estrella de segunda magnitud (*Denébola*); *Régulo* representa el corazón del León (véase la carta).

Entre León y Géminis se halla **Cáncer**, formado por un grupo de pequeñas estrellas.

2. *Al Sur del ecuador.* Ante todo se nos ofrece *Sirio* en la boca del **Can mayor** que, junto con *Proción*, acompaña al heroico cazador Orión. *Sirio* es la estrella más brillante del cielo, y se reconoce prolongando hacia el Sur la recta que une las Tres Marías. Como en Europa, a fines de julio, el Can mayor y menor están sobre el horizonte durante el día, y al mismo tiempo el calor es muy intenso, los días suelen llamarse caniculares (*dies caniculae* en latín).

Hacia el Oeste se reconocen fácilmente la **Nube mayor** y la **Nube menor de Magallanes**: son dos grandes nebulosas; a su lado se halla una estrella primaria, *Achernar*, que es circumpolar, y pasa el 1º de diciembre por el meridiano superior a las 9 p. m.; está casi diametralmente opuesta a la Cruz, al otro lado del polo Sur; forma con los centros de las dos Nubes los vértices de un gran triángulo.

El **Eridano** (nombre griego del río Po) es una constelación muy larga pero poco caracterizada, que se desprende de *Rígel* y termina en *Achernar*; la línea que une estas dos estrellas atraviesa la constelación por el medio en toda su longitud.

Al Oeste de *Achernar* está **Fénix** con una estrella de segunda magnitud.

La **Liebre** es una pequeña constelación a los pies de Orión (al Sur), y después sigue la **Paloma** con una estrella secundaria.

Si desde Sirio dirigimos la mirada hacia la izquierda (al Sudeste), bajándola despacio, encontramos la figura característica de la **Cruz del Sur** con dos estrellas primarias, α y β ; un poco más abajo hay dos estrellas brillantes que son α y β del **Centauro**, las cuales forman con la Cruz una especie de cometa: la más cercana de la Cruz es β ; *la otra (α) es la estrella menos distante de la tierra*; su luz necesita, sin embargo, cuatro años y medio para llegar a nuestro globo.

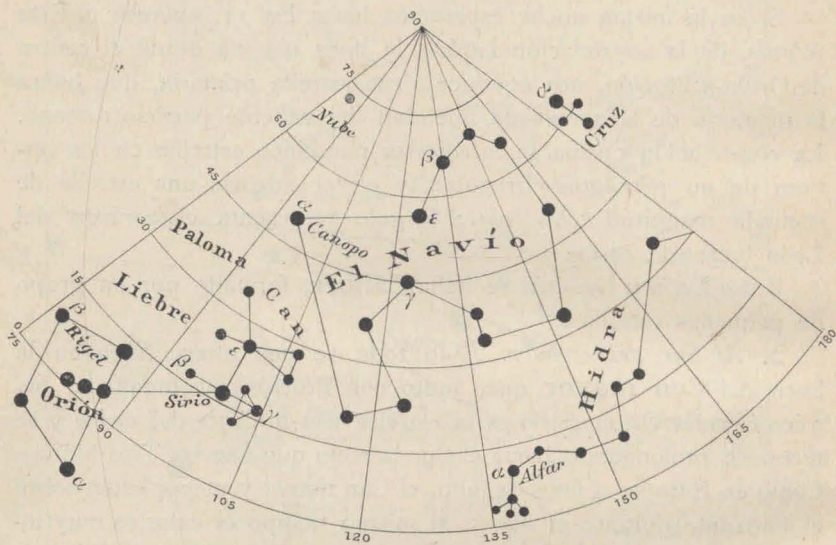


Fig. 133. Orión y algunas constelaciones australes: el Navío, etc.

El **Navío** (fig. 133) es la constelación más extensa del cielo. Las estrellas comprendidas entre el Can mayor y la Cruz pertenecen al casco del Navío, el cual está dirigido hacia el polo; los palos y velas se dirigen al ecuador, y se hacen visibles a media noche, en las fechas supuestas. En la proa se destaca el piloto *Canopo*, hermosa estrella primaria que está cerca de nuestro cenit, entre Sirio y Achernar; pero Canopo está más al Sur que Sirio. Entre Sirio y Canopo pasa la Vía Láctea viniendo de la Cruz.

Resumen. Tenemos en esta época 14 estrellas de primera magnitud visibles al mismo tiempo: Cabra, Aldebarán, Betelgoso, Rígel, Pólux, Régulo, Sirio, Proción, Achernar, Canopo, α y β de

la Cruz y del Centauro; a las cuales se puede agregar Cástor. Hacia media noche, estando Aldebarán cerca del horizonte, también es visible la Espiga en Virgo, y Arturo.

Mayo y junio. Durante estos meses, en las primeras horas de la noche, el aspecto del cielo embelesa la vista del observador, no tanto por lo grandioso de las constelaciones cuanto por la acumulación y el brillo de estrellas en la vecindad del meridiano, cerca de nuestro cenit. A mediados de mayo ostenta la **Cruz del Sur** su forma graciosa en su paso superior: esta Cruz, por ser circumpolar, es visible todas las noches del año; pero, a causa de

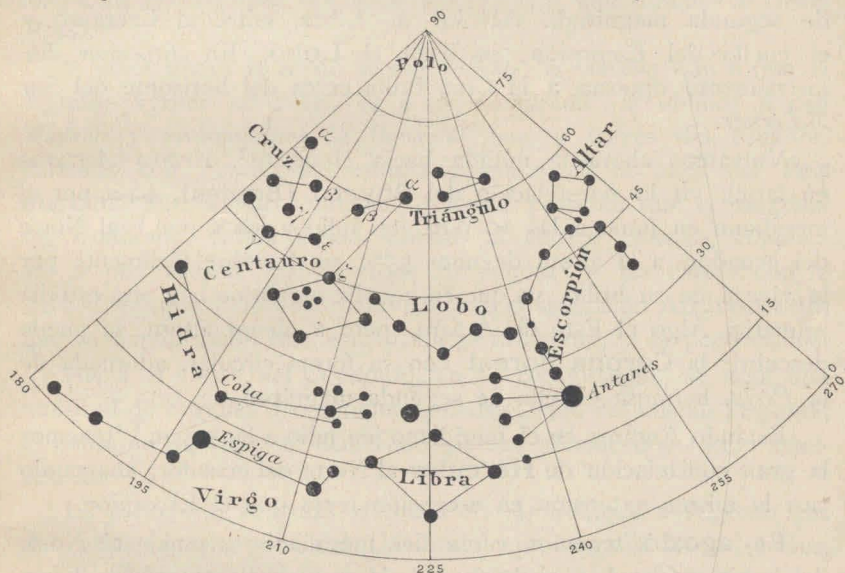


Fig. 134. Constelaciones australes: Cruz — Centauro — Escorpión, etc.

la perspectiva, parece variar de forma y de posición relativa con Centauro; el palo más largo se dirige siempre hacia el polo Sur (fig. 134).

Cerca de la Cruz, hacia el cenit, está el **Centauro**; pero sus dos estrellas primarias, α y β , brillan con resplandor notable algo hacia el Este de la Cruz; la línea $\alpha\gamma$ (palo mayor), de ésta, prolongada al ecuador, atraviesa el cuerpo del Centauro, la cola de la **Hidra**, para dar sensiblemente con **Espiga** en **Virgo**: esta constelación está atravesada por el ecuador y contiene el *signo* de **Libra**, donde la eclíptica corta al ecuador; al Norte de éste, pero algo distante de Espiga, se halla una estrella de segunda magnitud en Virgo, a saber, *Vindemiatrix*. (En abril, estando Régulo cerca del

meridiano, es fácil hallar Espiga: basta prolongar al Este la línea que une a Cástor con Régulo.)

El **Escorpión** es una de las constelaciones más peregrinas del cielo, y de una forma muy característica; se halla al Nordeste de la Cruz y se descubre fácilmente por medio de *Antares* (estrella primaria de color rojizo), que está en su corazón, y además por muchas estrellas que ofrecen la forma de un cuello de cisne; en dirección Oeste se desprenden de Antares los agujones del Escorpión. Entre Antares y Espiga se descubre **Libra** por medio de cuatro estrellas situadas en los vértices de un rombo (β es de segunda magnitud). Al Sur de Libra, entre el Centauro y el cuello del Escorpión, se halla el **Lobo**. En dirección diametralmente opuesta a la Cruz brilla cerca del horizonte del Sur *Achernar*.

Volvamos ahora la mirada hacia el Norte¹. *Arturo* (*Arcturus* en latín), en la constelación del **Boyero** (**Bootes**), pasa por el meridiano en junio a las 10 p.m. (en julio a los 9 p.m.), al Norte del ecuador, a la altura de unos 35° ; se descubre fácilmente por la viveza de su brillo, ya que en aquella región no hay otra estrella primaria. Algo al Este de Arturo, pero a menor altura, se puede descubrir la **Corona boreal** con su forma circular, adornada de la *Perla*, hermosa estrella de segunda magnitud.

Estando Antares en el meridiano (en julio a las 9 p.m.), tenemos la gran constelación de **Hércules** al Norte del ecuador, abarcando casi la misma extensión en ascensión recta que el Escorpión.

En **agosto** tenemos cerca del meridiano (9 p.m.), al Norte del cenit, 16° sobre el horizonte, la muy brillante estrella *Vega*, en la caracterizada constelación de la **Lira**; después sigue hacia el Este el **Cisne** con *Deneb* (de segunda magnitud), muy cerca del horizonte, y por las neblinas poco visible; las dos ramas de la Vía Láctea que vienen de la Cruz del Sur, se reúnen cerca del Cisne en una sola.

Si dirigimos desde Antares la mirada unos 45° hacia el Este, encontramos en una rama de la Vía Láctea, y al Norte del ecuador, dos estrellas vecinas entre sí, que pertenecen al Águila: la de primera magnitud, la única en aquella región del ecuador, se llama *Altair* (árabe: «el que vuela»); en septiembre pasa cerca de las 9 p.m. por nuestro meridiano.

¹ El observador está en la latitud de 35° Sur, según la suposición hecha.

Nota. Las estrellas mencionadas, como visibles desde julio, podrían observarse en una misma noche de junio; pero es de temer que el frío del invierno sea un impedimento.

Octubre (o en las noches de agosto). Hacia las 9 p.m. está en la vecindad del meridiano, al Norte, pero cerca del ecuador, el gran **Cuadrado de Pegasus**, con cuatro estrellas que forman los vértices de un cuadrilátero no exactamente cuadrado, digno de conocerse bien; las dos estrellas que miran al Sur, son de segunda magnitud: α , que se llama *Markab*, está al Oeste (hacia adelante); la otra, que se llama *Algenib*, mira al Este. Ahora bien: si prolongamos la recta que une estas dos estrellas, encontramos al Oeste *Altair*.

Fijemos ahora la atención en *Markab*: la estrella que forma el segundo vértice al Oeste, es β del Cuadrado: si unimos β con *Markab* y prolongamos la línea al Sur, a través del ecuador, daremos con *Fomalhaut*, estrella primaria en la boca del **Pez austral**. Para evitar confusión, téngase presente que la diagonal del Cuadrado, tirada desde *Markab* al vértice opuesto, conduce ahí a una estrella que también se denota en las cartas con la letra α , porque pertenece *a la vez* a la constelación **Andrómeda**, que va en dirección Nordeste hacia el horizonte, y es poco visible.

Hacia el Oeste del Cuadrado, en su continuación, se nota una multitud de estrellas que forman la constelación del mismo **Pegasus**; el contorno opuesto al Cuadrado parece afectar una forma semi-circular.

La recta que se traza desde α de **Andrómeda** a *Algenib* (los dos vértices orientales del Cuadrado), prolongada hacia el Sur, atraviesa **Piscis**, y pasa sobre el ecuador muy cerca del *signo* Aries (equinoccio de primavera): α de **Andrómeda** pása $3^m 50^s$ después del punto vernal (que es invisible) por el meridiano del lugar.

La constelación de **Aries** está unos 30^0 al Este del Cuadrado, caracterizada por tres estrellas cuya posición relativa recuerda la forma de una pistola.

§ 159. CONSTELACIONES BOREALES.

Agregamos unos breves apuntes sobre las constelaciones propias del hemisferio boreal, suponiendo al observador colocado en algún punto de la zona templada: la orientación es fácil, porque todas las constelaciones pueden descubrirse por medio de la Osa mayor y la estrella polar.

La **Osa mayor** (fig. 135) es, sin duda ninguna, la constelación más hermosa de este hemisferio y fácil de encontrar en la vecindad del polo. Se la ha designado

con este nombre, según toda probabilidad, por ser el oso blanco el único animal grande que vive entre los hielos de las regiones circumpolares; los griegos la llamaron ἄρκτος μεγάλη, de donde se deriva la palabra *ártico*. En la antigüedad se designaba también con el nombre de **Carro** (*plaustrum* en latín), siendo en este caso las cuatro estrellas del cuadrilátero las ruedas, y las otras tres el tiro o los bueyes. (Según algunos autores esta última denominación fué extendida a las siete estrellas, que en latín se llamaban *septem triones*, de donde viene *Septentrio*, el Norte.) Entre las dos últimas estrellas ζ y η de la cola hay una pequeña, de quinta magnitud, llamada *Alcor*: los árabes se servían de ella como prueba para conocer si la vista era buena o débil.

Veamos ahora cómo nos podemos orientar en el cielo para hallar otras constelaciones; pero se debe tener presente que su aspecto varía durante el año y que las estrellas adelantan 4 minutos cada día su paso por el meridiano.

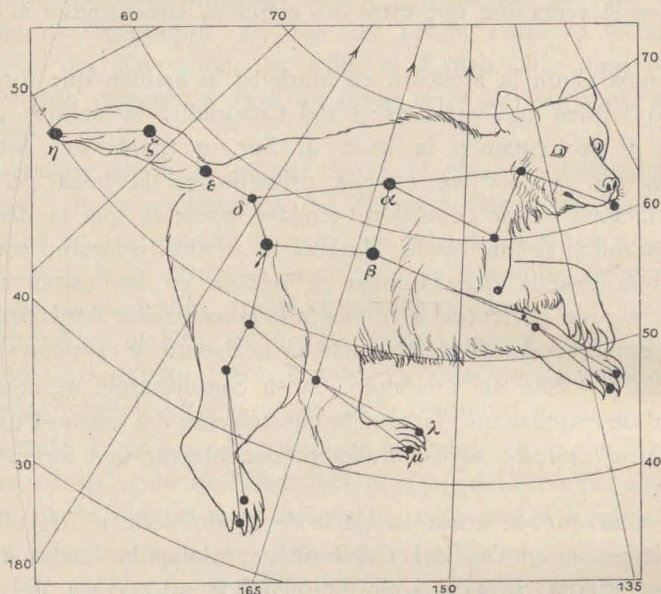


Fig. 135. Osa mayor.

Fig. 136. La línea que pasa por las dos ruedas traseras α y β (que son las guardias) hacia el Norte conduce a la **estrella polar**, que dista un grado y medio del polo y es casi de segunda magnitud; forma la extremidad de la cola de la **Osa menor**, que ofrece una figura semejante a la de la Osa mayor, pero invertida y más pequeña. Esta misma línea prolongada al Sur encuentra al **León**; la diagonal δβ prolongada suficientemente hacia el Oeste caerá entre *Cástor* y *Pólux* ($AR=110^\circ$); prolongando la diagonal αγ hasta más allá del ecuador hallaremos la *Espiga* en **Virgo**; siguiendo más adelante la curva que une las tres estrellas de la cola se encuentra la brillante estrella *Arturo*, en la constelación del **Boyero** (Bootes, «el que conduce los bueyes»).

La constelación **Casiopea** es circumpolar para los países de Europa; sus estrellas principales ofrecen la forma de una *W*, y es tan notable su configuración que una vez reconocida se vuelve a encontrar fácilmente; pero debe tenerse presente que Casiopea dista en ascensión recta unos 150° de la Osa mayor, teniendo próximamente la misma declinación. La estrella polar está a una distancia media entre la Osa mayor y

Casiopea; una línea que va desde la última estrella de la Osa mayor a la estrella polar conduce a Casiopea *en el lado opuesto*; si la Osa mayor se halla muy baja en el Norte, aquella estará muy alta, y recíprocamente. Una línea que saliendo de la estrella polar pasa cerca de la última estrella de Casiopea, conduce al gran Cuadrado de Pegaso, que se reconoce fácilmente, como aparece en la extremidad a la izquierda de la zona ecuatorial (al fin del libro) cerca del ecuador. Hacia el Norte del Cuadrado, y al Este de Aries se halla **Andrómeda**; pero téngase presente que

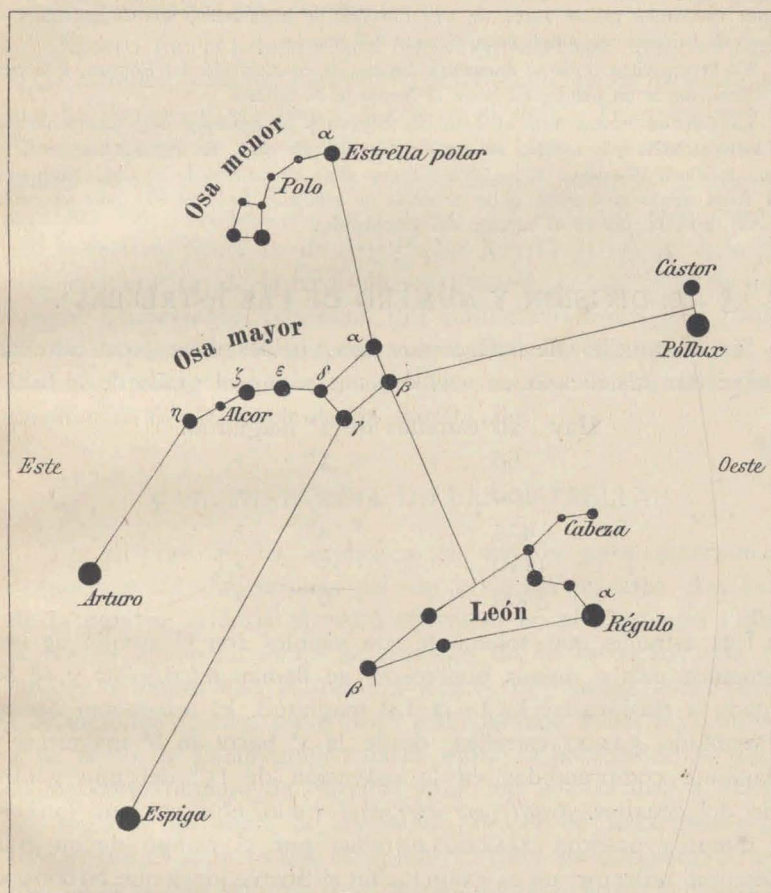


Fig. 136. Osa mayor, Osa menor y León.

el Cuadrado tiene dos estrellas designadas con la letra α : la una es Markab, la otra, en el vértice opuesto, pertenece a la vez a Andrómeda. La línea $\beta\alpha$ del Cuadrado, prolongada al Sur del ecuador, conduce a la estrella primaria **Fomalhaut**, en la boca de Piscis.

Entre Andrómeda y el Cobero se halla la constelación de **Perseo** con Algol, que es variable, según veremos. Dentro de Perseo se halla un brillante racimo de estrellas; γ en Andrómeda es una hermosa estrella doble, de color. La constelación Perseo es una de las más ricas regiones del cielo, porque contiene la porción más espléndida de la Vía Láctea.

La brillante blancura de *Vega* no puede menos de llamar la atención; está al lado opuesto del polo con respecto a la *Cabra* y forma con α del *Cisne* y la estrella polar un gran triángulo rectángulo, en que ocupa uno de los extremos de la hipotenusa. El pequeño grupo de las estrellas vecinas forma la constelación muy marcada de la *Lira*. El *Cisne* o *Cruz boreal* está cerca de *Vega*, al Este, y se reconoce fácilmente en el cielo por las cinco estrellas principales.

El *Águila* se halla pronto por medio de una línea trazada desde *Vega* a β del *Cisne*: esta línea pasará cerca de tres estrellas en línea recta, una de las cuales es *Altair*, de primera magnitud, poco distante del ecuador.

Ya hemos visto cómo se encuentra *Arturo*; la constelación del *Boyero*, a la cual pertenece, forma un pentágono hacia el Nordeste de *Arturo*.

La *Corona boreal* está al Este del *Boyero* y se reconoce muy fácilmente por sus siete estrellas que forman un semicírculo; una de ellas, de segunda magnitud, se llama la *Perla* (*Gemma*). Estando la *Corona* alta (en noches de verano), basta tirar una línea desde la estrella polar a través de ella muy hacia el Sur para encontrar *Antares*, estrella roja en el corazón del *Escorpión*.

§ 160. DIVISIÓN Y NÚMERO DE LAS ESTRELLAS¹.

Sin el auxilio de telescopios son visibles unas 5000 estrellas, que se han clasificado en seis órdenes según el grado de su brillo.

Hay 20 estrellas de 1^a magnitud.

66	»	»	2 ^a	»
100	»	»	3 ^a	»
425	»	»	4 ^a	»
1110	»	»	5 ^a	»
3500	»	»	6 ^a	»

Las estrellas que solamente son visibles con el auxilio de instrumentos más o menos poderosos, se llaman *telescópicas* y se ha llegado a clasificarlas hasta la 14^a magnitud. El astrónomo *Struve* ha contado 52000 estrellas, desde la 1^a hasta la 8^a magnitud y solamente comprendidas en la extensión de 15^o del uno y otro lado del ecuador. *Guillermo Herschel* pudo observar que durante 41 minutos pasaron 258000 estrellas por el campo de su gran telescopio reflector; no es exageración si *Struve* juzga que 20000000 de estrellas son visibles con el mencionado instrumento. Sir Robert Stawell Ball calcula que los grandes telescopios actuales permiten contemplar 50000000 de estrellas. Sir Norman Lockyer estima que con los más poderosos telescopios modernos se podrían fotografiar 500 millones de esos astros. Siguiendo un plan metódico, se ha podido calcular con aproximación, que el número de todas las estrellas hasta la 14^a magnitud llega a 12000 millones (*Littrow*).

¹ La clasificación del P. Secchi está en el § 166.

Téngase presente que estos guarismos se refieren solamente a los cuerpos celestes luminosos que desde el globo terrestre son todavía visibles con auxilio de los mejores instrumentos telescópicos. Pero ¿quién fuera capaz de medir todo este océano de mundos, quién podría contar los billones de soles que pueblan el Universo? *Quam magna sunt opera tua, Domine!*

Hiparco fué el primero que formó un catálogo, que comprendió 1000 estrellas, pero se perdió; el único catálogo de la antigüedad que ha llegado a nuestros tiempos es el de Cl. Tolomeo, que contiene 1028 estrellas. El astrónomo alemán Heis, que murió en 1877, estaba dotado de una vista extraordinaria, y pudo contar 5421 estrellas sin el auxilio de un antejo. El catálogo más completo del hemisferio Norte es de Argeländer (murió en 1875). A la generosa cooperación de la República Argentina se debe la obra monumental *Uranometría Argentina*, que contiene el brillo y la posición de las estrellas del hemisferio austral hasta la 6ª magnitud; este laborioso trabajo se hizo en el observatorio de Córdoba por su director *B. Gould*, discípulo de Argeländer.

§ 161. DISTANCIA DE LAS ESTRELLAS.

En el § 18 se ha explicado el método para determinar la distancia y las dimensiones del sol y de los planetas con auxilio de la paralaje referida al radio terrestre; en el § 20 está indicada la noción elemental sobre la paralaje de las estrellas, con cuyo auxilio se determinan la distancia a la tierra y su magnitud relativa. Los métodos difíciles para medir esta paralaje anual no pertenecen a un texto de Cosmografía: hasta ahora se ha medido la paralaje de un corto número de estrellas y ni una sola alcanza al valor de un segundo de arco. El astrónomo Bessel de Königsberg (Alemania) fué el primero que determinó el valor de una paralaje anual, que es la estrella 61 de Cisne. Si hubiese una estrella cuya paralaje fuese igual a 1'', su distancia sería $\left(d = \frac{1}{p} \cdot \rho\right)$ igual a 206265 veces la distancia de la tierra al sol, que es la unidad de medida; mas, como en estas distancias resultan números enormes, suelen reducirse al tiempo que gasta la luz en recorrerlas; en la suposición indicada la luz necesitaría más de tres años. La estrella más vecina a nuestro globo es α del Centauro en la vecindad de la Cruz del Sur: la luz necesita cuatro años y medio para recorrer este camino. Agregamos el valor de la paralaje y de la distancia de algunas

Brugier, Cosmografía.

estrellas notables: estos datos se han tomado, como más fidedignos, de la *Uranografía* del Dr. Plassmann.

Nombre	Paralaje	Años
α del Centauro . .	0'',71	4,6
61 del Cisne . .	0'',50	6,5
Cabra (Auriga) . .	0'',39	8,3
Sirio	0'',38	8,5
Proción	0'',28	11,6
Altair	0'',19	17
Vega	0'',16	20,4

Ya no es admisible la hipótesis de que las estrellas de menor brillo sean las más distantes, como lo manifiesta la estrella 61 del Cisne y otras que no mencionamos, que en brillo son muy inferiores a Sirio, Altair, Vega, y sin embargo están menos distantes que éstas.

§ 162. MOVIMIENTO PROPIO DE LAS ESTRELLAS.

A simple vista las estrellas conservan fijas sus distancias angulares, y las constelaciones guardan invariables sus formas; pero esta propiedad es tan sólo aparente. Con el auxilio de los telescopios modernos, se ha puesto fuera de duda que muchas estrellas tienen realmente un movimiento propio, en cuya virtud las constelaciones respectivas cambiarán sus formas características, aunque solamente después de miles de años; por ejemplo: Sirio, Proción, Arturo tienen el movimiento anual de 1''; 61 del Cisne lo tiene de 5''. *Halley* fué el primero en reconocer este movimiento, porque al comparar las posiciones que Aldebarán, Sirio y Arturo ocupaban entonces en el cielo, con las posiciones señaladas por Tolomeo, halló diferencias que no podían atribuirse a errores de observación.

La existencia de este movimiento propio se ha demostrado con referencia a centenares de estrellas por medio de instrumentos perfeccionados que indican con exactitud diferencias de un segundo de arco.

Aquí se ofrece la pregunta: ¿Por qué ha pasado este movimiento inadvertido? Veamos ahora cómo la causa consiste en la enorme distancia de las estrellas. Lalande había visto dos veces el planeta Neptuno; pero lo consideró como una estrella fija, porque no descubría en él un movimiento sensible, puesto que el planeta describe en una hora solamente un arco equivalente a 1''. Para formarnos alguna idea de un movimiento aparente tan lento supongamos un objeto que recorre 10 *cm* en una hora: si lo miramos

desde una distancia de 20 *km* (siendo la visual perpendicular a la dirección del movimiento), nos parece que se mueve como Neptuno visto de la tierra; si recorre 1 *m* por hora, el observador debe estar a 200 *km*, y si 10 *m*, su distancia debe ser de 2000 *km* para recibir la misma impresión. La estrella fija más cercana dista unas 7000 veces más de nosotros que Neptuno: si la estrella se moviese con la misma velocidad que este planeta, entonces el cambio de su posición equivalente a un segundo con respecto a *nuestra observación* se efectuaría en 7000 horas (A. Jakob). Estas comparaciones nos enseñan que deben pasar muchos siglos antes que se pueda determinar la medida verdadera y la especie del movimiento propio de las estrellas.

§ 163. ESTRELLAS DOBLES.

Designamos con este nombre el conjunto de dos estrellas, muy cercanas entre sí y de un desvío angular tan pequeño que parecen formar una sola estrella. *Herschel* descubrió unas 500 estrellas formadas de dos que distaban entre sí menos de 35": hoy día se conocen unas 6000.

Si dos estrellas se hallan sensiblemente sobre una misma visual cuya prolongación pasa por el sol, pueden tener enormes distancias reales y parecer como estrellas dobles; sin embargo es muy probable que la mayor parte de ellas sean respectivamente vecinas, formando por su atracción mutua un solo sistema: así la estrella ζ de la Osa mayor forma realmente un solo sistema binario. La estrella 61 del Cisne es doble y tiene un movimiento propio marcado, y como las dos estrellas participan de este movimiento, es necesario que estén ligadas entre sí por la atracción. *Herschel* ha reconocido que de dos estrellas simples que forman un sistema binario, una gira en torno de otra principal como satélite; el tiempo es de 36 años para la estrella doble de Hércules, de 182 años para γ de la Virgen. *Clark* descubrió que Sirio es también una estrella doble, teniendo el astro que lo acompaña un brillo muy débil. El sistema se llama *múltiple* cuando consta de tres o más estrellas. La estrella múltiple más notable es la existente en Orión y designada con la letra θ , que se compone de seis estrellas tan cercanas que sus rayos se confunden; cuatro de ellas forman el trapecio de Orión.

Nota. Parece que las leyes de Képler y Newton rigen también el movimiento de las estrellas dobles.

§ 164. ESTRELLAS PERIÓDICAS Y CAMBIANTES.

Estrellas periódicas son aquellas que presentan variaciones periódicas en la intensidad de su brillo. La más notable de entre ellas es **Algol** en el Perseo: aparece durante 2 días 14 horas como estrella de 2^a magnitud, disminuye hasta quedarse reducida a la 4^a magnitud por 4 horas, y al cabo de otras 4 horas vuelve a su brillo primitivo. Una estrella en la constelación de la Ballena presenta cambios en el período de 331 días; brilla por 15 días como de 2^a magnitud, decrece durante 3 meses, *desaparece* durante 5 meses, vuelve a crecer por 3 meses para recobrar su mayor brillo y conservarlo por 13 días.

Estrellas cambiantes son aquellas cuya intensidad varía sin presentar periodicidad regular. Un ejemplo notable de éstas tenemos en la estrella η del Navío, que no figura en el catálogo de Tolomeo del año 137, ni en el de Bayer de 1603; Halley la anotó como de 4^a magnitud en 1680, y Lacaille, como de 2^a en 1752; después bajó a la 4^a magnitud y en 1827 brillaba como estrella primaria, pero volvió a la 2^a magnitud y en 1838 su brillo excedía al de las primarias; después de debilitarse algún tanto su brillo, volvió a crecer y en 1843 igualaba en intensidad al de Sirio.

La estrella β de León era antes de 1^a magnitud y ahora lo es apenas de 2^a.

Betelgoso es también considerado como estrella variable: esto se desprende de la siguiente comunicación que publicó el *Cosmos* (no. 942, de 1903). «El señor Pachen llama la atención sobre el aumento que ofrece el brillo de Betelgoso, que fué señalado desde mucho tiempo como estrella variable. Durante los últimos 30 años no se observaba ningún cambio notable en el brillo de esta hermosa estrella; pero en la noche del 15 de octubre de 1902 notó Pachen que el brillo de Betelgoso era superior al de la Cabra, igualando casi el brillo de Sirio, y sus observaciones fueron confirmadas por las del astrónomo Gore. Cambios en el brillo de Betelgoso fueron observados por Herschel desde 1836 a 1840, y Huyghens observó en 1850 cambios en la naturaleza de su espectro.»

§ 165. ESTRELLAS TEMPORALES

son aquellas que aparecen casi de repente en el cielo, brillan durante algún tiempo, para desaparecer por completo.

En 134 a. d. J. C. pudo Hiparco observar este hecho, que le impulsó a formar su catálogo de las estrellas. En el año de 369

de nuestra era apareció en la constelación del Águila una estrella tan brillante como Venus; pero después de haber sido visible durante tres semanas desapareció. El caso más peregrino lo presenta la estrella observada por Tycho de Brahe en 1572: apareció en noviembre entre Casiopea y Cefeo, tan brillante como Sirio y creciendo en brillo hasta ser visible en pleno mediodía; un mes después comenzó a decrecer y desapareció finalmente en 1574, dieciséis meses después de su primera aparición. Su color sufrió igualmente varios cambios, pasando del blanco vivo al rojo para volver al blanco.

Otra estrella apareció en 1866 en la Corona Boreal. Hasta entonces había sido de 10ª magnitud, pero de pronto pasó en dicho año a la 2ª; al cabo de seis semanas volvió a su primitivo brillo, como si nada le hubiera pasado. En 1876 se presentó en la constelación del Cisne una estrella desconocida; era de 3ª magnitud y así se conservó por espacio de dos días; al cabo de un mes era invisible a simple vista y actualmente sólo se la puede descubrir con los más poderosos telescopios, entre las de 15ª magnitud.

El Dr. Anderson descubrió el 1º de febrero de 1892 otra de estas estrellas, en el Cochero; tenía la 5ª magnitud. Examinando fotografías de aquella región del cielo se puso en claro que existía desde un año antes. En tres años pasó a tener el aspecto de una débil estrella nebulosa de 10ª magnitud. De las medidas practicadas se sacó en conclusión que este astro se encontraba en las profundidades de la Vía Láctea y por consiguiente se calculó que la explosión de luz debió haberse producido noventa años antes.

Pero el ejemplar más notable entre todas las estrellas temporales es la llamada por los astrónomos *Nova Persei*, descubierta por el mismo Dr. Anderson el 22 de febrero de 1901. En la noche del descubrimiento tenía la magnitud 2,7, o sea próximamente media magnitud menos que la estrella polar. A la noche siguiente era de 1ª magnitud y su brillo superaba al de Aldebarán. Las fotografías de la región del cielo en que está Perseo prueban que el 10 de febrero ese astro singular era invisible o, por lo menos, no pasaba de la 11ª magnitud. Desde el día siguiente, 23 de febrero, empezó a disminuir su brillo; el 27 ya era apenas de 2ª magnitud; el 5 de marzo se acercaba a la 3ª; el 17 del mismo mes ya tocaba casi a la 6ª magnitud. Durante los seis meses siguientes, pasó por una serie de notables fluctuaciones, variando su luz entre las magnitudes 3ª y 5ª, hasta que en agosto del mismo año apareció

como una nebulosa que se iba extendiendo alrededor de un núcleo. Al principio se calculó que la distancia de la *Nova Persei* a la tierra era tan grande que esa explosión luminosa observada en 1901 debió producirse 300 años antes; pero cálculos posteriores han reducido dicho alejamiento a lo que se llama 99 años de luz. Y un astrónomo, F. W. Very, pretende más: que esa distancia debe reducirse a 75 años de luz.

Nota. Para encontrar las causas de fenómenos tan extraños no hay más que conjeturas, suponiendo algunos que tales estrellas son el teatro de grandes catástrofes químicas y físicas.

§ 166. CLASIFICACIÓN DEL P. SECCHI.

I. **Grupos según el color.** Los diversos colores de las estrellas han dado lugar a que el P. Secchi haya formulado una cierta clasificación de esos astros. Las estrellas estudiadas por él, las divide en cuatro grupos:

1ª clase.—Este grupo comprende las estrellas blancas¹. Tipos: Sirio, Vega, Cástor, etc.

2ª clase.—Estrellas amarillas. Tipos: la Cabra, Pólux, α de la Ballena, el Sol, etc.

3ª clase.—Estrellas rojo-amarillas. Tipos: Betelgoso, Arturo, Antares, o de la Ballena, etc.

4ª clase.—Este grupo comprende un reducido número de pequeñas estrellas de color rojo-sangre.

En 316 estrellas estudiadas por el astrónomo romano, encontró 164 pertenecientes al primer grupo, 140 al segundo y 12 al tercero.

II. **Espectros.** El mismo P. Secchi, conforme a las revelaciones del espectroscopio moderno, reduce todos los espectros estelares, con rarísimas excepciones, a estos cuatro tipos principales:

1º tipo: de las estrellas blancas o azules. Espectro casi continuo, con cuatro rayas negras, por absorción del hidrógeno. Si muchas estrellas blancas parecen presentar espectro continuo y sin rayas, es porque éstas son más débiles y finas, y exigen para su observación más poderosos instrumentos.

2º tipo: de las estrellas amarillas. Espectro idéntico al del sol; rayas del hidrógeno, sodio, hierro y magnesio muy visibles.

3º tipo: de las estrellas rojo-amarillas. Espectro formado por líneas negras y brillantes entre zonas o bandas oscuras; v. g. en el α del Orión.

¹ El P. Secchi cree que casi la mitad de las estrellas pertenecen a este grupo.

4º tipo: A primera vista se parece su espectro al del grupo anterior; pero difiere de él en que la luz de este grupo es más viva de parte del violado, mientras que en el espectro del grupo tercero es más viva de parte del rojo. Además la raya oscura de la región amarilla no coincide con la del sodio, sino que es más refrangible.

Los espectros del tercero y cuarto grupo son parecidos al espectro del ázoe en los tubos de Geissler.

Nota. Un pequeño número de estrellas son una excepción a la clasificación dicha, y forman un 5º grupo. En su espectro aparecen rayas simples aisladas, líneas brillantes en lugar de oscuras, de posición fija. Así en la γ de Casiopea aparecen rayas espectrales de hidrógeno no negras sino brillantes, curiosidad única hasta ahora en todo el cielo.

CAPÍTULO SEGUNDO.

LAS NEBULOSAS.

§ 167. NEBULOSAS EN GENERAL.

Si examinamos atentamente varias regiones del cielo, descubrimos una especie de masas blanquecinas de apariencia láctea y de formas muy variadas, como si fuesen unas nubecillas muy lejanas e inmóviles: a estos cuerpos celestes se ha dado el nombre general de **nebulosas**.

La primera nebulosa, que se descubrió en 1612 por Simón Mario, está situada en la constelación de Andrómeda (fig. 137), conociéndose ahora ya unas 5000.



Fig. 137. Aglomeración en Andrómeda.

Como con el auxilio de buenos anteojos se ha reconocido que muchas de ellas no son aeriformes, se han dividido las nebulosas en *resolubles* y en *irreducibles*: trataremos de las dos clases separadamente y con la debida brevedad.

§ 168. AGLOMERACIONES ESTELARIAS.

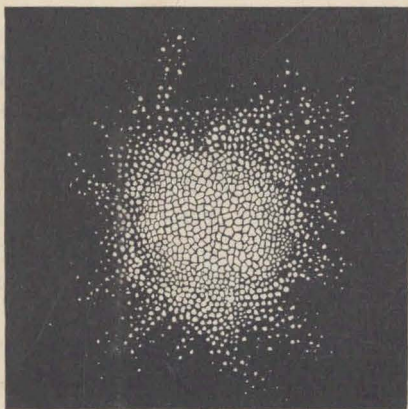


Fig. 138. Aglomeración en Berenice.

Observando los astrónomos ciertas nebulosas con telescopios poderosos, descubrieron que no eran aeriformes, sino que se resolvían en una multitud de estrellitas acumuladas en una región pequeña, por lo cual se designan con el nombre de aglomeraciones. Generalmente el grupo afecta la forma globular, y se compone de estrellas que tienen casi todas igual magnitud; pero en el centro se observa una que otra más señalada por su brillo; hacia las orillas del grupo el número y el brillo suelen disminuir.

La fig. 138 representa una de las más bellas aglomeraciones, la que se encuentra en la constelación boreal Cabellera de Berenice.



Fig. 139. Racimo de Hércules.

Muy peregrina también la aglomeración situada en la constelación de Hércules: su forma es irregular, pero festoneada en las orillas (fig. 139). Lord Rosse observó en su interior tres rayas negras que parten de un mismo centro; esta nebulosa suele llamarse el racimo de Hércules

Las Pléyadas están situadas hacia el Noroeste de Tauro y forman un conglomerado de cincuenta estrellitas; *seis* de ellas son visibles a simple vista, las que suelen llamarse las *siete* cabrillas.

Finalmente mencionamos las Híadas, que están entre las Pléyadas y Aldebarán: con simples gemelos de teatro se puede apreciar la belleza de esta aglomeración.

§ 169. LA VÍA LÁCTEA.

En noches serenas, y estando el cielo sin luna, aparece en el cielo una faja o zona luminosa, de un brillo *lechoso*, cuya anchura varía de dos a cuatro grados: esta faja inmensa es la Vía Láctea, representada en la fig. 140. Cerca del *Cisne* (la Cruz boreal) se divide en dos ramales comprendidos entre *Vega* y *Altair*. En el hemisferio austral, se observan mayores irregularidades, porque existe una especie de ruptura en la faja; cerca de esta región, en medio de la parte más brillante, llama la atención un espacio negro donde no hay indicio de algún cuerpo celeste: los astrónomos designan este espacio con el nombre prosaico de *Saco de carbón*.

La Vía Láctea forma en el cielo un círculo máximo que corta el ecuador en dos puntos opuestos: uno de ellos se halla entre Orión y Proción, y el otro cerca del Águila; la Vía pasa entre Sirio y Proción, y después entre Orión y la Cabra, atraviesa en seguida Perseo, Casiopea y el Cisne, donde se bifurca en dos ramales, que siguen paralelos y se reúnen cerca de α del Centauro.

A primera vista ofrece esta Vía el aspecto de una luz continua; pero ya los antiguos sospechaban que estaba formada por innumerables estrellas. Galileo, que fué el primero en dirigir el anteojo hacia la bóveda celeste, descubrió la existencia de infinitas estrellitas, de suerte que esta zona es una inmensa aglomeración estelar.

Hérschel emprendió el trabajo de contar el número de estrellas contenidas en la Vía Láctea, usando un método que empleó Xerxes para contar su ejército: contaba por tasación el número que pasaba por el campo de su telescopio durante un minuto, repitiendo la operación con respecto a *diferentes* agrupaciones. Como conocía perfectamente la latitud del campo de su instrumento y sabía próximamente las dimensiones de la Vía Láctea, halló por cálculo el número de 18 000 000 de estrellas (Mädler).

Nota. Briot desarrolla en su texto la hipótesis de Herschel y la de Struve: según ésta, pertenecería a la Vía Láctea el conjunto de todas las estrellas que observamos; Struve no la considera como un disco pleno, según opinaba Herschel, sino como un anillo en cuyo vacío central estaría colocado nuestro sol rodeado de las estrellas diseminadas en este espacio y que son nuestras vecinas más cercanas. Conforme a estas ideas el Saco de carbón que hemos mencionado, sería un agujero practicado en el espesor relativamente pequeño del anillo.

§ 170. NEBULOSAS IRREDUCIBLES.

Éstas se presentan como unas manchas blanquecinas en noches sin luna y estando el cielo claro. En el hemisferio austral existen las más notables por su tamaño, entre ellas la que se conoce bajo el nombre de las dos *Nubes de Magallanes* y está cerca del polo Sur. Preséntanse las nebulosas en todas las dimensiones y formas posibles—desde varios grados hasta pocos segundos; desde la forma circular o elíptica hasta la irregularidad o una completa desfiguración, como se presenta, por ejemplo, el aspecto de la nebulosa en la espada de Orión. Como de las nebulosas se han podido resolver ya unas 400, se podría creer que existe la misma posibilidad para con todas; sin embargo parece que existen algunas realmente irreducibles y que son nebulosas propiamente dichas, porque se ha encontrado que la *Nébula de Dragón* da un espectro *discontinuo* (Huggins 1864), lo cual acusa un origen gaseoso, aunque por otra parte se manifiesta la existencia de un núcleo. Según los últimos resultados del análisis espectral, las nebulosas propiamente dichas tendrían un carácter estelar, y a este respecto dice el célebre astrónomo Newcomb: «Opinamos que la mayor parte también de las nebulosas irreducibles no son más que aglomeraciones muy cerradas (densamente pobladas) que tienen una distancia infinita, formando cada una de ellas un inmenso sistema estelar.»

Nota. El espectro de un gas en incandescencia no ofrece una faja continua de varios colores, sino algunas rayas brillantes de color, pero separadas entre sí, por lo cual se llama discontinuo.

La distribución de las nebulosas en el cielo es muy desigual: la acumulación más densa está comprendida en una zona que forma la octava parte de la bóveda celeste: en León, Osa mayor, Dragón, Boyero, Cabellera de Berenice, Perros de Caza y sobre todo en la Virgen; por el otro lado: en Andrómeda, Pegasus, los Pescados. Es de notar que las regiones próximas a la Vía Láctea son pobres en nebulosas.

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

Águila

Céfeo



Vega

Cisne

Casiopea

Parte b

El Navío



Sirio

El Navío (Argo)

La Cruz

Centauro

Parte a

Fig. 140. La V



Perseo

Auriga

boreal.

Triángulo

Lobo

Escorpión

Serpentario



Saco de Carbón

Altar Corona

Sagitario

Escudo

austral.

Via Láctea.

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

1. Veamos ahora algunos detalles sobre la renombrada *Nébula Orionis*, dando un resumen de la extensa relación que de ella hace Sir *Robert Stawell Ball* en su Historia de los cielos. Ya hemos hablado de la estrella múltiple que está situada en la constelación de Orión. Este grupo de seis estrellas se halla rodeado de la famosa *Nébula Orionis*, sin que se sepa con certeza si en realidad está sumergido en ella, lo cual se admite como muy probable. La nebulosa misma se extiende a una gran distancia en el espacio.

La luminosidad, que es máxima en el centro, se desvanece hacia el borde de la nébula, sin que exista un límite marcado; al mismo tiempo se observan unas 200 estrellas diseminadas en ella, que en realidad pueden estar en frente o detrás de la nebulosa misma.

Con su gran telescopio adecuado, descubrió Lord Rosse (y lo mismo observó su ayudante), en la parte más densa de la nebulosa, miríadas de estrellas que antes no se habían visto; según Huggins, éstas se hallarían como bañadas y rodeadas de una enorme masa de gas incandescente, cuyo espectro acusa la presencia del hidrógeno, del ázoe y de un cuerpo desconocido en la tierra.

La parte más visible de esta nebulosa ocupa una extensión aparente que es igual a tres discos lunares, y por lo tanto le debe corresponder un volumen enorme en consideración a su inmensa, aunque desconocida distancia; imaginémonos, dice el autor mencionado, un globo cuyo ecuador coincide con la órbita terrestre, y se puede demostrar que un millón de estos globos reunidos en uno solo darían un volumen inferior al que ocupa la nebulosa.

2. Gran interés han despertado las nebulosas que ofrecen el aspecto de un *anillo*, por lo cual se llaman *anulares*: se conocen hoy día unas doce. La fig. 141 representa la bella nebulosa anular en la *Lira*: la abertura interior no aparece tan negra como el fondo del cielo que rodea el exterior, sino que contiene otra nebulosa muy débil: el conjunto ofrece el aspecto de un velo echado sobre un anillo. Briot refiere que Lord Rosse consiguió resolverlo en estrellas sumamente pequeñas, y vió como filamentos de estrellas adheridos al anillo. Sir Robert Stawell Ball, por el contrario, dice que pertenece a las nebulosas gaseosas.

Otro anillo existe en Andrómeda, no lejos de la aglomeración de Mario arriba mencionada; en su interior se nota un espacio negro y oblongado, y en el centro dos estrellitas.

3. Finalmente debemos mencionar las nebulosas que afectan *formas espirales*, cuyo tipo es la que descubrió Lord Rosse en la constelación de los Lebreles (Perros de Caza).

Conviene recordar que algunos espíritus aficionados a nuevas teorías se apresuraron a formular por medio de esta nebulosa sus hipótesis con respecto a la gran organización de nuevos mundos

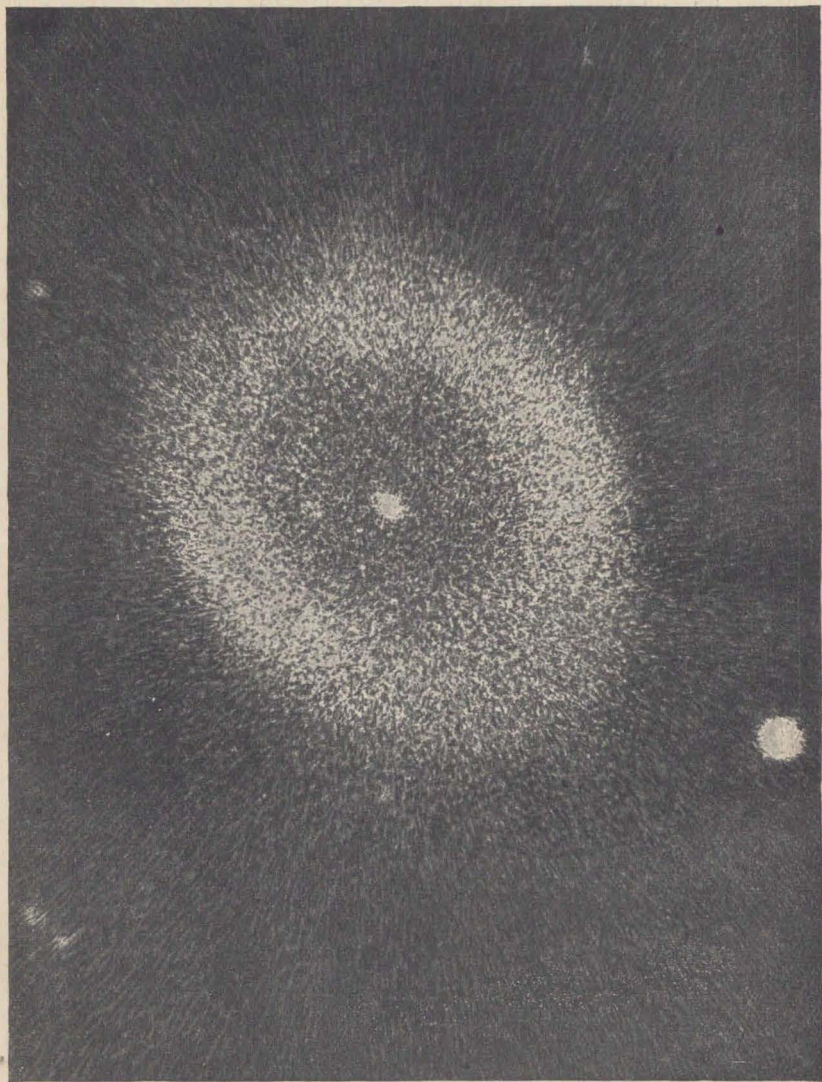


Fig. 141. Nebulosa anular en la Lira.

que ahora estaríamos presenciando. (Téngase también presente que las nebulosas se componen en gran parte de hidrógeno y ázoe.) Citemos aquí las palabras de Sir Robert Stawell Ball, astrónomo

real de Irlanda: «Hay otras muchas formas de nebulosas: largos rayos de neblinas, las maravillosas nébulas espirales . . . y algunas muy misteriosas y variables; pero no las tomaremos aquí en cuenta, porque es muy difícil representarlas. La mayor parte son *vagas* y se necesita fijar mucho la atención aunque se tenga un instrumento muy poderoso.» Hay quien opina que *marcadas* formas espirales no parecen existir. Con respecto a la nebulosa que está en la constelación de los Perros de Caza, dice el Dr. Klein: «Debemos admitir que esta nebulosa se compone de un sinnúmero de estrellas. Quedamos llenos de asombro y admiración al pensar en la grandiosa magnificencia de este mundo, en que infinitas estrellas, cual gotas de un río, se agrupan en tal forma en derredor de un centro.»

Las dificultades para medir la *distancia* de estas nebulosas son insuperables por falta de un método adecuado. Si las estrellas de 13^a magnitud están situadas, según Herschel, a una distancia 75 veces mayor que las estrellas de 6^a magnitud, el rayo luminoso necesita unos 2000 años para llegar a la tierra; por lo cual todos admiten que desde una nebulosa la luz necesita siglos y siglos: luego no las vemos tales como son, sino como *fueron*, y tampoco *presenciamos* la formación de nuevos mundos cuyos elementos constitutivos serían principalmente el hidrógeno y el ázoe, según el espectro de las nebulosas.

§ 171. HIPÓTESIS DE LAPLACE.

Para explicar la formación de nuestro sistema planetario imaginó el astrónomo Laplace la siguiente hipótesis: Supone existente una inmensa masa de vapores de todas las substancias químicas que existen en el sol, la tierra y los planetas. Recibido el primer impulso, por una fuerza ajena, la gran nebulosa tomó un movimiento rápido de rotación, que iba creciendo por la contracción ocasionada por enfriamiento. En virtud de la fuerza centrífuga, máxima en el ecuador, fué lanzado al espacio un anillo ecuatorial, que dió origen al planeta Neptuno: de la misma manera se formarían los demás planetas, y por la rotación rápida de éstos, sus satélites. Era, pues, natural que las órbitas de todos los planetas existan en la zona zodiacal. Esta hipótesis ingeniosa manifiesta con naturalidad cómo la tierra, los aerolitos y por analogía los planetas, contienen las mismas substancias químicas que existen en el sol. Como en la forma propuesta no excluye la acción del Creador, no se opone la hipótesis al primer capítulo del Génesis, por lo cual muchos creyentes, israelitas y cristianos, la admitieron. El conocido Padre

Ángel Secchi se muestra favorable en su discurso sobre la unidad de la materia, agregando empero: Si me preguntáis, quién dió a esa masa nebulosa el primer impulso giratorio, respondo que lo fué Dios, el Omnipotente.

He aquí algunas dificultades por causa de las cuales ha perdido mucho de su prestigio la hipótesis de Laplace.

1. Todos los satélites deberían tener en su movimiento de revolución el mismo sentido directo que su planeta, de Occidente al Oriente; pero los satélites de Urano y Neptuno y uno o dos de Júpiter tienen movimiento contrario.

Para explicar esta anomalía se han hecho otras hipótesis complicadas, sin dar una solución satisfactoria.

2. No se comprende cómo los anillos ecuatoriales, lanzados al espacio vacío, se han transformado en globos esferoidales, tanto más cuanto que al desprenderse debían sufrir ruptura y formar una larga cinta.

El anillo de Saturno, observado por varios siglos, no presenta ninguna señal de formar un globo.

Los planos de las órbitas planetarias tienen poca inclinación hacia la eclíptica. ¿Cómo, pues, las órbitas de los asteroides la tienen hasta 38 grados, y Eros aun corta las órbitas de Marte y de Júpiter?

(De otras dificultades hacemos caso omiso en obsequio de la brevedad. No obstante, confesamos que esta hipótesis tiene grandes probabilidades, sin mengua de la acción del Creador, sobre todo si tomamos en cuenta las modificaciones agregadas por el astrónomo Faye.)

Conclusión. «Yo he encontrado a Dios por doquiera, pero en ninguna parte con mayor claridad que en el estudio de los arcanos de la bóveda celeste.» Esta declaración hecha por el insigne astrónomo alemán Eduardo Heis, forma una de tantas comprobaciones fehacientes de las palabras que leemos en el capítulo 13 del Libro de la Sabiduría: *A magnitudine enim speciei et creaturæ cognoscibiliter poterit Creator horum videri*. Lo cual significa que, de las mismas criaturas y de su hermosura, se puede venir por analogía y raciocinio en conocimiento del Creador. Si hay poder, si hay hermosura, si hay influencia benéfica y orden admirable en esos astros que forman nuestro embeleso, cuánto mayor será el poderío, la hermosura y la beneficencia de Aquel que dió a sus criaturas tales dotes y prerrogativas. Si glorificamos el ingenio de Copérnico, de Galileo, de Képler, de Newton, de Hérchel, de

Leverrier y de tantos otros, y si en ellos reconocemos con razón una inteligencia privilegiada por el solo hecho, en realidad digno de admiración, de haber señalado la existencia de nuevos astros y de haber descubierto esas leyes tan sencillas que rigen los movimientos celestes, con cuánta mayor admiración debemos reconocer y reverenciar la existencia de una Sabiduría infinita que señaló a los astros sus órbitas tan complicadas en su conjunto y tan seguras, y dictó esas leyes en cuya virtud se ha formado la armonía peregrina del Universo; y al contemplar este mundo sidéreo no podemos menos de exclamar con el real Salmista: *Cæli enarrant gloriam Dei* — Proclaman los cielos la gloria de Dios; da testimonio de sus obras la grandeza del firmamento, y si el día nos manifiesta las maravillas de la naturaleza, la noche nos abre nuevos tesoros de la ciencia.

APÉNDICE.

§ 172. EL TRIÁNGULO DE POSICIÓN Y SUS APLICACIONES.

En astronomía se designa con el nombre de triángulo de posición todo triángulo *polar* de la esfera celeste, cuyos vértices son

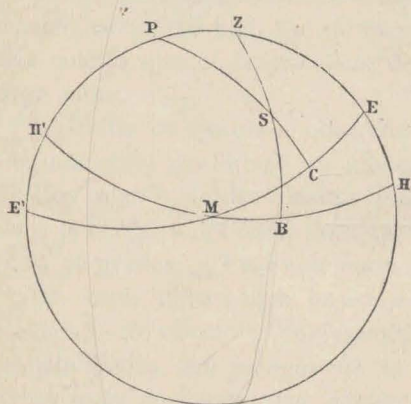


Fig. 142. Triángulo de posición.

el polo P , el cenit Z , y una estrella, o el centro solar S . Por su medio podemos obtener fórmulas que sirven para determinar el tiempo, observando con el teodolito (en alta mar con el sextante) la altura del sol, cuando éste no se halla en la vecindad del meridiano; las efemérides de París dan la declinación del sol para todos los días del año; la latitud del punto de observación se supone determinada según la fórmula $H = D \pm Z$.

Fijemos primero el significado de las letras: tenemos en la fig. 142 los siguientes arcos que miden los ángulos respectivos.

$SB = h$, la altura del sol.

$SC = \delta$, su declinación.

$EZ = \varphi$, la latitud del punto.

$SZ = 90 - h$, distancia cenital del sol.

$PS = 90 - \delta$, distancia polar del sol.

$PZ = 90 - \varphi$, distancia cenital del polo.

$\angle SPZ = t$ es el ángulo horario; su arco es EC .

1. **Determinación de la hora.** En el triángulo PSZ tenemos que según la trigonometría:

$$\begin{aligned} \cos ZS &= \cos PS \cdot \cos PZ + \sin PS \cdot \sin PZ \cdot \cos SPZ \\ \cos (90 - h) &= \cos (90 - \delta) \cdot \cos (90 - \varphi) + \sin (90 - \delta) \\ &\quad \cdot \sin (90 - \varphi) \cdot \cos t. \end{aligned}$$

(El coseno es igual al seno del complemento, etc.) Luego

$$\begin{aligned} \text{sen } h &= \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos t \\ \cos t &= \frac{\text{sen } h - \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi} \end{aligned} \quad (1)$$

Conociendo, pues, la altura del sol, su declinación y la latitud del punto de observación, podemos calcular el arco del ángulo horario t , que corresponde a esta altura: dividiendo por 15 el valor de t , se obtiene el tiempo en horas, minutos y segundos.

2. **El arco diurno.** Con la fórmula (1) se puede calcular la longitud de la mitad del arco diurno, poniendo el valor de h igual a cero, siendo entonces $\text{sen } h$ también cero.

$$\begin{aligned} \cos t &= -\frac{\text{sen } \delta}{\cos \delta} \cdot \frac{\text{sen } \varphi}{\cos \varphi}, \\ \text{luego} \quad \cos t &= -\text{tg } \delta \cdot \text{tg } \varphi. \end{aligned} \quad (2)$$

Esta fórmula manifiesta la relación que hay entre la mitad del día solar, la declinación y la latitud.

Discusión. 1º Si en la fórmula (2) el valor de φ es cero, será $\text{tg } \varphi = \text{cero}$, y por lo tanto, $\cos t$ igual a cero; luego el valor del arco $t = 90^\circ$ y $2t = 180^\circ$. Esto significa que en todos los puntos del ecuador ($\varphi = \text{cero}$), cualquiera que sea la declinación del sol, esto es, durante todo el año, la noche es en duración igual al día.

2º Supongamos $\delta = \text{cero}$, lo que sucede en los dos equinoccios: resulta, como antes, $\cos t = \text{cero}$, y por lo tanto $t = 90^\circ$. Esto significa que el 21 de marzo y el 21 de septiembre la noche es igual en duración al día, cualquiera que sea el valor de φ , esto es, en todos los puntos de la tierra.

3º Denotando por ϵ la oblicuidad de la eclíptica, tendremos que en los dos solsticios $\delta = \pm \epsilon$; luego $\cos t = -\text{tg } (\pm \epsilon) \cdot \text{tg } \varphi$: así podemos calcular la media longitud del día más largo y del más corto.

4º Para determinar la latitud en que el día más largo dura 24 horas ($2t = 360^\circ$), y el más corto cero horas, basta poner en la fórmula (2) $t = 180^\circ$ y $\delta = +\epsilon$ para el más largo, y $t = \text{cero}$ y $\delta = -\epsilon$ para el más corto. Resulta que $1 = \text{tg } \epsilon \cdot \text{tg } \varphi$; luego $\text{tg } \varphi = \frac{1}{\text{tg } \epsilon} = \text{cotg } \epsilon$; de donde $\varphi = 90^\circ - \epsilon = 90^\circ - 23^\circ 27'$: en los puntos del círculo polar austral o boreal se realiza el fenómeno indicado.

3. **La amplitud de la salida, o puesta del sol,** es el arco comprendido entre el punto *Este* y el punto en que sale el

sol, o entre el punto *Oeste* y el punto en que se pone el sol. Por medio del triángulo polar (fig. 142) podemos obtener una fórmula para calcular esta amplitud. El ángulo BZH es el azimut, que denotamos con A : luego el ángulo $SZP = 180^\circ - A$; y por lo tanto $\cos SZP = -\cos A$.

$$\begin{aligned}\cos PS &= \cos ZS \cdot \cos PZ + \sin ZS \cdot \sin PZ \cdot \cos SZP \\ \sin \delta &= \sin h \cdot \sin \varphi - \cos h \cdot \cos \varphi \cdot \cos A \\ \cos A &= \frac{-\sin \delta + \sin h \cdot \sin \varphi}{\cos h \cdot \cos \varphi}.\end{aligned}\quad (3)$$

Denotando por m la amplitud y tomando la boreal como positiva, será $A = 90^\circ + m$, y $\cos A = -\sin m$; además la altura h es cero;

$$\text{luego} \quad \sin m = \frac{\sin \delta}{\cos \varphi}.\quad (4)$$

Resultará que m es cero siendo la declinación cero: en los equinoccios el sol sale en el punto *Este* y se pone en el *Oeste* para cualquiera latitud terrestre.

Cuando los valores de δ son positivos (declinación boreal), también m es positiva, lo que indica que desde el 21 de marzo hasta el 21 de septiembre el sol sale y se pone al Norte del Este; pero durante el resto del año sale y se pone al Sur del Este por ser la declinación negativa.

El máximo de la amplitud matinal es en los solsticios; entonces $\sin m = \frac{\sin \pm \epsilon}{\cos \varphi}$.

4. Fórmulas para las coordenadas eclípticas. Denotamos la latitud *astral* con la letra λ , y la longitud *astral* con β ; la ascensión recta con α . Para la demostración sirven la fig. 36 y las definiciones del § 43.

$$PQ = E'B = \epsilon = 23^\circ 27' \text{ (Su complemento es } PB\text{)}.$$

$$QM = 90^\circ - ML = 90^\circ - \lambda$$

$$\angle MPQ = \text{arco } ED = 90^\circ + \alpha$$

$$\angle MQP = \text{arco } LB = 90^\circ - \beta.$$

a) *Latitud astral.*

$$\begin{aligned}\cos QM &= \cos MP \cdot \cos QP + \sin MP \cdot \sin QP \cdot \cos MPQ \\ \sin \lambda &= \sin \delta \cdot \cos \epsilon - \cos \delta \cdot \sin \epsilon \cdot \sin \alpha.\end{aligned}$$

b) *Longitud astral.*

$$\begin{aligned}\cos PM &= \cos MQ \cdot \cos QP + \sin MQ \cdot \sin QP \cdot \cos MQP \\ \sin \delta &= \sin \lambda \cdot \cos \epsilon + \cos \lambda \cdot \sin \epsilon \cdot \sin \beta \\ \sin \beta &= \frac{\sin \delta - \sin \lambda \cdot \cos \epsilon}{\cos \lambda \cdot \sin \epsilon}.\end{aligned}$$

§ 173. DEMOSTRACIÓN DE LA SEGUNDA LEY DE KÉPLER.

Segunda ley. Las áreas descritas por el radio vector de un planeta son proporcionales a los tiempos (esto es, en tiempos iguales recorre el radio vector áreas iguales).

Esta ley tiene una aplicación particular para explicar la irregularidad que se observa en el movimiento aparente del sol en longitud, por lo cual agregamos la demostración con respecto al movimiento anual del sol.

Demostración de la ley (fig. 143). Sea T el centro de la tierra, los arcos CS y $C'S'$ los caminos respectivos descritos por el sol en un día solar, los que pueden considerarse como circulares por ser insignificante la variación de la distancia en un día. A y A' son las áreas de los sectores circulares. El área total de un círculo, o sea de 360° , es πR^2 ; luego el arco de un sector de un solo grado es $\frac{1}{360}$ veces menor; y el arco de un sector de v grados será otras tantas veces mayor que el anterior; en este caso el radio R es la misma distancia d . Tenemos pues:

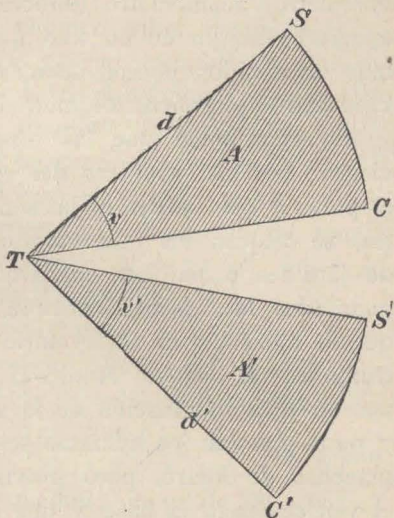


Fig. 143. Ley de las áreas.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot v}{360} \quad A' = \frac{\pi \cdot d'^2 \cdot v'}{360}$$

Según el § 7, $v \cdot d^2 = v' \cdot d'^2$; luego los segundos miembros son iguales; luego $A = A'$.

Esto significa que en la unidad de tiempo el área descrita por el radio vector es constante, y esta constancia es tanto más rigurosa cuanto más pequeña sea la unidad de tiempo.

§ 174. LOS OBSERVATORIOS.

Llamamos observatorio astronómico a cualquier edificio que pueda servir para la observación y el estudio de los astros, provisto de los instrumentos indispensables, como son: anteojos meridianos, círculo mural, ecuatorial, reloj sideral, cronógrafo, catálogo de las estrellas, cartas celestes, etc. Los instrumentos para observa

ciones magnéticas, deben instalarse en el sótano de la torre, guardados de la vecindad del hierro. Los aparatos destinados a las observaciones meteorológicas están convenientemente instalados en conformidad con su destino: termómetro, higrómetro, pluviómetro, barómetro, anemómetro (dirección e intensidad de los vientos), a menudo reunidos en un solo aparato registrador. Los observatorios más favorecidos poseen además el gran espectroscopio sideral, el tubo astrofotográfico, fotómetros, etc.

Se comprende que las observaciones y las medidas pueden viciarse por las sacudidas del edificio que vienen de la calle, por el polvo y por fuertes ondas sonoras. Para evitar estos inconvenientes, se colocan los observatorios fuera de la población, rodeados de jardines o parques con arboledas: en este sentido están bien guardados la Spécula Vaticana a causa de los extensos jardines que la rodean, y el observatorio de Potsdam, cerca de Berlín, construido en un bosque. Atención particular merece el cuidado para apartar toda iluminación de la atmósfera vecina: para conseguirlo y para guardar los aparatos se cubre la torre con una cúpula de planchas de hierro, pero provista de una abertura que va desde el vértice hasta la base y que puede cerrarse; se designa con el nombre de *raja meridiana*. En la base de la cúpula está aplicado un sistema de poleas que corren sobre rieles circulares; con auxilio de un mecanismo de engranaje la cúpula se hace giratoria. Ésta es la forma que tienen las torres destinadas a guardar el ecuatorial, el telescopio fotográfico y el espectroscopio sideral: la altura y la anchura de la torre se acomoda a las dimensiones del instrumento y a la altura de los edificios vecinos. La torre en que se halla el antejo con el círculo meridiano, es una sala rectangular, más larga que ancha, con un techo plano, porque el instrumento es tan sólo móvil en el plano vertical; por lo mismo no tiene cúpula giratoria, sino en el techo la raja meridiana, que va de un extremo al otro. Fuera del edificio, a corta distancia de la ventana del Norte y de la del Sur, están dos pilares de referencia que sirven para comprobar la exactitud de la posición del antejo, según queda dicho en el § 31, n° 2; la colocación de estos pilares es un trabajo de mucha delicadeza y paciencia.

A. M. D. G.

§ 175. RESUMEN DE MEDIDAS.

Debiendo los alumnos para el examen saber de memoria las medidas más importantes, las damos en este resumen en números redondos y en los términos medios entre el máximo y mínimo.

Abreviaciones: n es el diámetro aparente; D la distancia lineal, v la velocidad angular, R' el radio terrestre, V volumen, d días.

1. **Sol.** $D = 23\,400\,R'$ (38 000 000 de leguas de a 4 km); Radio = $109\,R'$; $V = 1\,284\,000$ veces el volumen de la tierra; masa = $324\,000$ veces la masa de la tierra; $n = 32' 4''$; $v =$ casi 1° por día; rotación verdadera = $25\,d\,12\,h$.

2. **Tierra.** El radio ecuatorial = $6377\,km$; rotación: un punto del ecuador recorre $464\,m$ por segundo; desvío del péndulo por hora = $15^\circ \times \sin \varphi$ (en París $11^\circ 17'$); velocidad de traslación = $30\,km$ por segundo; aplanamiento = $\frac{a-b}{a} = \frac{1}{300}$; un grado de meridiano mide $111\,km$ (término medio); un grado de longitud geográfica del ecuador = $110\,km$; año sideral: $365,25$ días solares medios; año trópico = $365,2422$ días solares medios; el día solar tiene $24^h\,3^m\,56^s$ siderales.

3. **Luna.** Paralaje $57'$ (valor medio); $n = 31' 30''$; $v = 13^\circ$ por día; $D = 60\,R'$; radio = $\frac{3}{11}$ del R' ; $V =$ la 50^a parte del volumen de la tierra (50 globos lunares equivalen al volumen de la tierra); revolución sinódica = $29\,d\,13\,h$; la sideral = $27\,d\,8\,h$. El día solar de la luna es de $29\,d\,12\,h$.

Eclipses de luna: la sombra mide $216\,R'$; en los de sol la sombra mide de 57 a $59\,R'$.

Saros: cada 18 años 11 días hay 70 eclipses (41 de sol, 29 de luna).

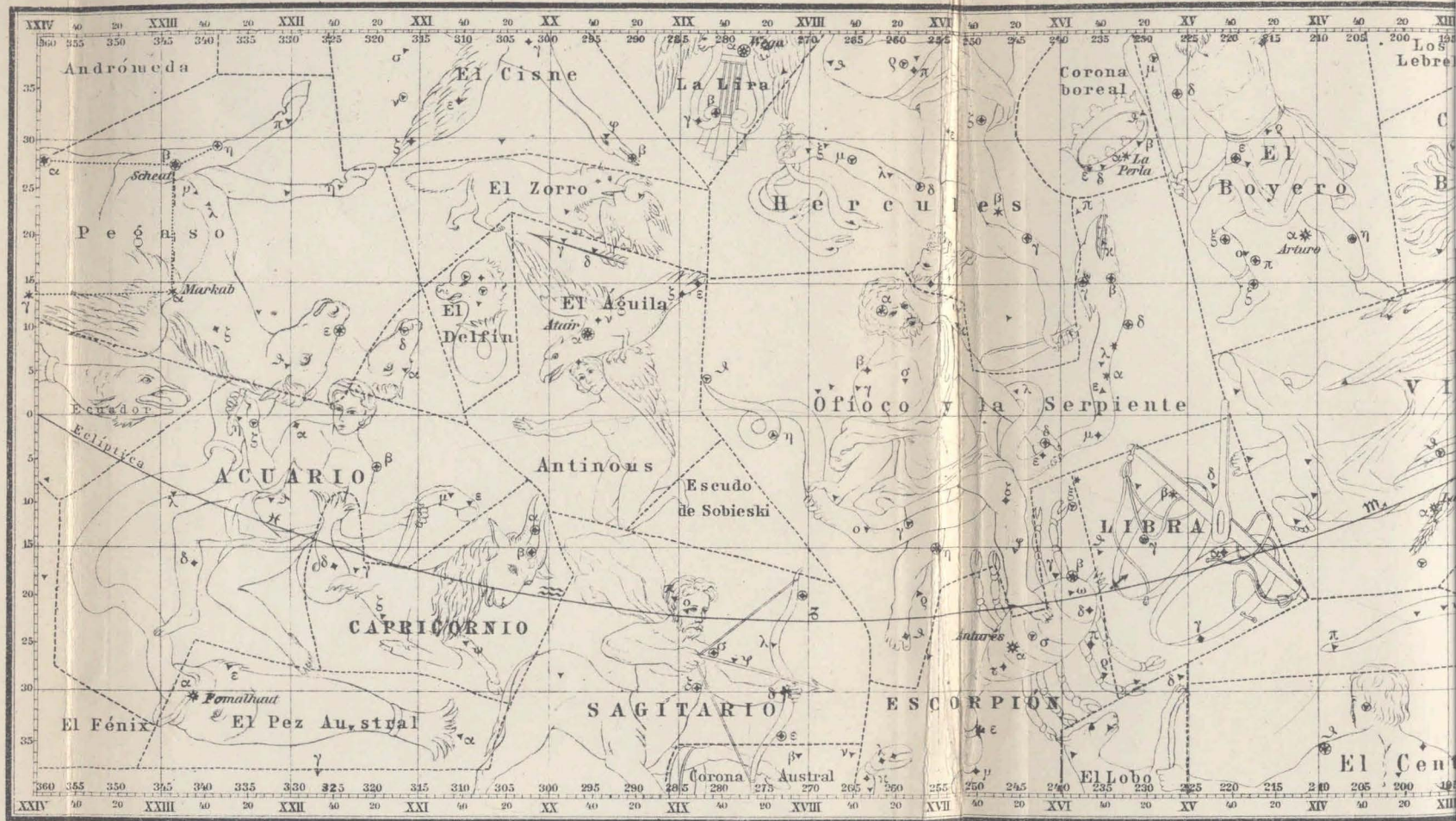
4. **Planetas.** Véase pág. 214.

5. **Buenos Aires:** $\varphi = 34^\circ 36' 28''$; $L = 60^\circ 42' 29''$.

6. **Santiago de Chile:** $\varphi = 33^\circ 26' 42''$; $L = 73^\circ 1' 49''$.

BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

Zona ecuatorial



BIBLIOTECA NACIONAL
DE MAESTROS

