

## CAPITULO IV

Elementos del movimiento de rotación. — Trabajos modernos. — Movimientos propios de las manchas. — Períodos de las manchas

Hemos dicho en el capítulo segundo que á Fabricio se debe el descubrimiento del movimiento de rotación del Sol; determinar su período y la inclinación de su eje fueron los problemas de que se ocuparon Scheiner y Galileo en el siglo XVII; y posteriormente, casi todos los astrónomos han hecho algún trabajo con este mismo objeto. Dice Arago que difícilmente se encontrará un astrónomo que, al menos una vez en su vida, no haya tratado de determinar por observaciones directas los elementos de la rotación solar. El problema es de gran dificultad, pues sólo puede estudiarse por el movimiento de las manchas, y como antes hemos visto, éstas no son fijas, ni constantes, y están sujetas á infinitas transformaciones, de las que hablan detalladamente ya los primeros observadores.

Galileo en su *Diálogo* estima la duración aparente de la rotación del Sol en un mes lunar, aproximación muy grosera (*nello spazio quasi d'un mese*), y por largo tiempo supuso que el eje era perpendicular al plano de la eclíptica; en el *Diálogo* habla de la inclinación, pero sin asignarle valor alguno y sin mencionar tampoco la posición de los nodos ó puntos de intersección de la circunferencia del ecuador solar con la eclíptica. Scheiner, en su famosa *Rosa ursina*, fija la duración del movimiento entre veintiséis y veintisiete días, y coloca el polo de rotación del Sol á 7 grados del polo de la eclíptica. El movimiento de rotación del Sol se descubrió unos cincuenta años antes que el de los planetas Venus, Marte y Júpiter.

El movimiento giratorio que la observación de las manchas puede indicarnos, es tan sólo el de la superficie y de ninguna manera el de la masa interior; para eliminar el influjo que el movimiento propio de las manchas puede ocasionar, hay que tomar el promedio de las duraciones de la rotación de un gran número de observaciones de manchas, pues si observamos una sola, el error sería igual al movimiento propio. Con este objeto, se escogen manchas redondas, regulares y de formación tranquila, para evitar las dificultades que resultarían de los cambios de aspecto de los contornos de las manchas irregulares ó anormales, en las que sería imposible reconocer el punto observado, después de verificada una rotación solar. El tiempo necesario para que el Sol dé una vuelta sobre sí mismo, es menor que el de la rotación aparente, pues no debemos olvidar que mientras el Sol gira sobre su eje, la Tierra recorre su órbita alrededor de él y en el mismo sentido; si la Tierra estuviera fija, el tiempo que emplease una mancha, suponiéndola exenta de movimiento propio, en volver al punto donde la observamos por primera vez, y que pudiera ser el centro del disco, por ejem-

plo, marcaría precisamente cuánto había tardado el Sol en dar una vuelta sobre sí mismo; si la Tierra se moviese alrededor del Sol con la misma velocidad que este astro sobre su eje y fuese igual la dirección del movimiento, la mancha ocuparía siempre el mismo lugar y parecería inmóvil sobre el disco. Veamos ahora lo que sucede en realidad: supongamos que al principiar la observación se encontraba una mancha en el centro del disco, y que al cabo de cierto número de días ha vuelto á ocupar la misma posición aparente; habrá dado una vuelta completa y una fracción más, proporcional al camino que la Tierra ha recorrido en su órbita. Sea  $S$  el centro del Sol (figura 38),  $a$  una mancha vista en medio del disco por un observador  $T$  colocado en la Tierra; al dar el Sol una vuelta completa sobre su eje, describirá la mancha una circunferencia  $a b a$ ; pero para que el observador la vea en el mismo lugar que antes, tiene que andar además el arco  $a a'$ , equivalente al recorrido por la Tierra de  $T$  á  $T'$ , arco cuyo valor angular es igual al de  $a a'$ ; y como la velocidad con que la Tierra se mueve alrededor del Sol se conoce muy bien, fácilmente se deduce el valor del arco  $a a'$ . Por término medio, la duración real de la rotación solar es menor que la rotación aparente en unos dos días; estas observaciones son muy delicadas, pues un espacio, una porción de la superficie solar que mida á nuestros ojos un ángulo de un segundo, corresponde á un ángulo heliocéntrico de  $5' 37''$  en el centro del disco, y á uno de  $3^\circ$  en la proximidad de los limbos.

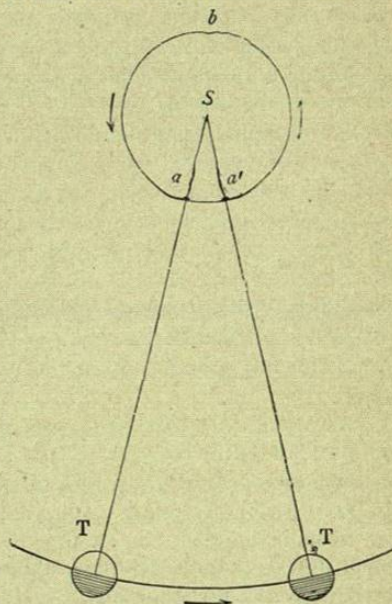


Fig. 38. — Rotación real y rotación aparente de una mancha solar

Los antiguos astrónomos evaluaban la duración de la revolución solar midiendo el tiempo que tardaba una mancha en volver á un mismo punto del disco, que podía ser el meridiano que pasase por su centro; método erróneo, pues la trayectoria descrita por la mancha está dividida en partes desiguales por el contorno aparente del Sol, que se llama también *horizonte de las manchas*.

Scheiner determinó que el período de la revolución sinódica ó aparente era de 27 días y el de la revolución sidérea ó real de 25 días y 8 horas; la posición del nodo la obtuvo observando las manchas en la época en que describen líneas rectas, pues en este caso el observador se encuentra en el mismo plano en que aquéllas se mueven, y dedujo que su longitud sería de 69 á 70 grados. Después de Scheiner hay que registrar las observaciones de Cassini y de Lalande, y sobre todo, las de Bianchini en 1718, en las que tuvo en cuenta el movimiento propio de las manchas; el período obtenido por este astrónomo es casi igual al que han hallado los observadores modernos.

La discordancia extraordinaria que existía entre los resultados de éstos indujo á Carrington á emprender una larga serie de observaciones, empleando métodos más perfectos. En el plano focal del objetivo de su antejo colocó una cruz filar, formada de dos hilos de araña, inclinados  $45^\circ$  sobre el círculo horario, y proyectándola al mismo tiempo que la imagen del Sol, en la pantalla, observó el instante en que los limbos y las manchas venían á atravesar sucesivamente la sombra de los hilos.

Las observaciones de Carrington empezaron en el año de 1853 y concluyeron en 1861; el primer resultado que obtuvo fué demostrar que las discrepancias que existen entre los valores hallados por los primeros astrónomos sobre el período de la rotación solar, dependen de las diferencias reales en la velocidad con que se mueven las manchas en distintas latitudes; las manchas son también menos frecuentes á una latitud heliocéntrica superior á  $30^\circ$ ; ya sabemos que Galileo creía que la zona real ó de aparición de las manchas sólo se extendía  $29^\circ$  á cada lado del ecuador solar. Scheiner la amplió á  $30^\circ$ , pero en algunos casos se ven aparecer las manchas en declinaciones más altas. Messier observó una mancha negra á  $31^\circ$  en julio de 1777; Mechain en 1780 vió otra á  $40^\circ$  de declinación boreal; Peters observó en Nápoles una á los  $50^\circ$  de latitud, que es la más distante del ecuador que se registra, pues la observada por La Hire á  $70^\circ$  parece muy dudosa; la mancha vista por Peters era curiosísima por estar animada de un movimiento propio muy rápido, pero en sentido contrario al de la rotación solar.

Las apariciones más frecuentes de las manchas tienen lugar en una zona comprendida entre  $10^\circ$  y  $30^\circ$  á cada lado del ecuador; en la fig. 39 se representan las posiciones de los grupos de manchas observados por Carrington desde 1853 á 1861, apreciándose con gran facilidad su distribución según las latitudes y en relación también con el número de años; de este asunto importantísimo, objeto hoy de grandes estudios, trataremos detenidamente en las páginas posteriores; pero nos adelantaremos á decir que el número de manchas visibles en la superficie del disco solar es muy variable; hay años en que apenas se distingue una, y otros en que el Sol aparece casi cubierto de ellas.

Las manchas no se hallan repartidas igualmente á ambos lados del ecuador solar; Cassini y Maraldi creían que se formaban en mayor número en el hemisferio meridional que en el boreal; Arago no admite el hecho, y dice que ha consultado todas las Memorias publicadas desde 1707, sin distinguir ninguna preponderancia de las manchas meridionales sobre las septentrionales. Cassini creyó también que las manchas de los meses de mayo y junio ocupaban exactamente el mismo lugar que las manchas antiguas, y esta es también la opinión de Lalande, que dice: «Hay manchas considerables que aparecen en los mismos puntos físicos del disco solar, mientras que otras, igualmente notables, se muestran en puntos distintos.»

El P. Secchi admite que uno de los hemisferios presenta mayor número de manchas que el otro, y que los límites de aparición no son iguales á ambos lados del ecuador solar, pero existe una compensación en los períodos largos, y tomando el promedio de un gran número de años, la diferencia que se encuentra es muy pequeña.

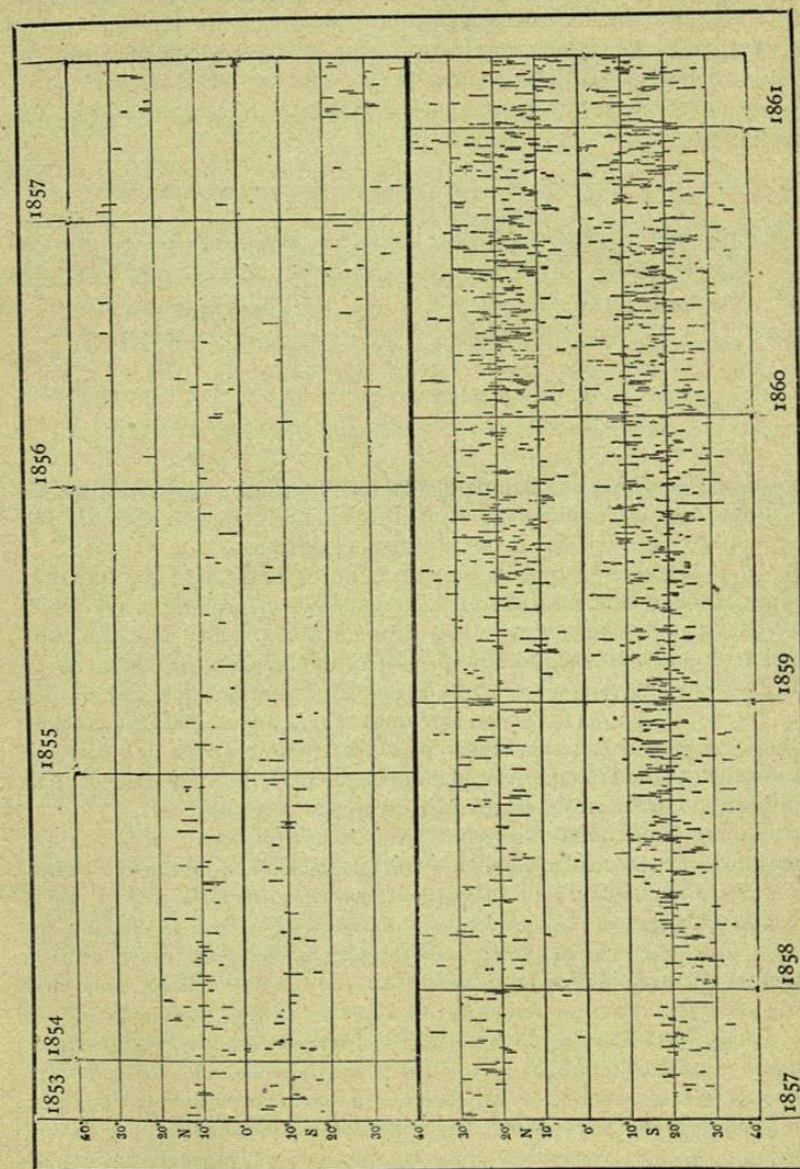


Fig. 39. - Distribución de las manchas solares según la latitud. Observaciones de Carrington

Como no se han observado nunca manchas situadas en una latitud superior á 50°, no se conoce la velocidad de la rotación del Sol en las inmediaciones de sus polos, que sólo pudiera determinarse por el estudio de las fáculas; pero siendo éstas tan variables en sus formas, no es posible tener confianza en el resultado que daría este método, empleado, no obstante, recientemente por el Dr. Wilsing. La tabla siguiente presenta el período de rotación del Sol en distintas latitudes:

Latitud Norte	Período de rotación	Rotación diurna	Latitud Sur	Período de rotación	Rotación diurna
50°	27 días 10 hor. 41 m.	787'	45°	28 días 11 hor. 0 m.	759'
30	26 9 46	824	30	26 12 50	814
20	25 17 8	840	20	25 17 52	839
15	25 9 10	851	15	25 13 31	845
10	25 3 29	859	10	25 5 35	856
5	25 0 42	863	5	24 23 18	865
o Ecuador	24 2 11	867	o Ecuador	24 2 11	867

De estas observaciones se han deducido varias fórmulas empíricas para expresar la rotación diurna del Sol, por Carrington, Faye, Spörer y otros; diferéncianse muy poco entre sí y son de sencillísima aplicación.

En el cuadro anterior se puede observar el hecho notable de que en las latitudes australes el movimiento diurno de rotación es menor que el correspondiente á iguales grados de latitud en el hemisferio boreal; hasta ahora no podemos decidir si hay en esta relación un indicio de la verdadera causa de las variaciones observadas, ó si no es más que una particularidad que pudiera desaparecer en una larga serie de observaciones. En apoyo de la primera idea puede aducirse que la determinación de las rotaciones, así en uno como en otro hemisferio, se verificó con completa independencia, de suerte que los resultados parecen indicar la existencia de una causa real y efectiva.

Si admitimos la opinión de Herschel de que el movimiento de rotación, más rápido cerca del ecuador solar, implica el influjo ó acción de una materia externa que conserva la rotación de la fotosfera, puede aceptarse la idea de que la superficie septentrional del Sol se dirige con más energía hacia la región á que camina este astro por su movimiento propio, y que, por la misma causa, se halla más expuesta á la acción de esta influencia externa. El Dr. Wilsing, como acabamos de decir, determinó el período de la rotación del Sol, por medio de las fáculas, en el Observatorio de Potsdam. Estas manchas blancas, según hemos visto anteriormente, sólo pueden observarse en las inmediaciones de los bordes por lo común, y rara vez más de tres días consecutivos; experimentan también cambios rápidos, lo que unido á la irregularidad de sus formas hace que las medidas de sus posiciones sean menos precisas que las de las manchas oscuras. A pesar de estas dificultades, los resultados obtenidos por el Dr. Wilsing son bastante aceptables.

De las fáculas visibles en las fotografías solares obtenidas en Potsdam desde marzo á agosto de 1884, persistieron 144 grupos en tres ocasiones, con interva-

los de una ó más semirrotaciones. Disponiéndolas según su distribución en latitud, en zonas de 3° de ancho, se halla el mismo período de rotación para cada una de ellas desde +24° á -33°, siendo la diferencia respecto del movimiento angular medio diario tan sólo de 2' en exceso, en un solo caso, llegando la mayor parte de las veces no más que á 20" y 30". Como estas diferencias son tan pequeñas y no siguen ley, parece que, mientras que Carrington y Spörer han demostrado que las diferentes zonas de manchas poseen diferentes valores de rotación, la capa de las fáculas gira en una pieza.

La velocidad angular media diaria que dan las fáculas es de 14° 16' 11" 3, correspondiente al período sidéreo de 25<sup>d</sup> 5<sup>h</sup> 28<sup>m</sup> 12'; los valores para los hemisferios Norte y Sur difieren únicamente 11" 5. Es digno de notarse que esto corresponde al período de rotación de las manchas en la latitud de 10°, según las fórmulas de Carrington y Spörer.

Las discrepancias que se notan en el período de rotación del Sol, según las observaciones de varios astrónomos, pueden explicarse satisfactoriamente admitiendo el movimiento propio de las manchas á que hemos hecho referencia. Eran tan extraordinarias estas discrepancias, que decía Delambre que un astrónomo no debiera ocuparse de este asunto más que una vez en su vida, pues eran inútiles semejantes observaciones; afortunadamente no se ha seguido su consejo, y ya hemos tenido ocasión de apreciar los brillantes descubrimientos alcanzados por Carrington.

El estudio del movimiento propio de las manchas es de tal dificultad, entraña un trabajo tan inmenso, que el mismo P. Secchi declaraba que era superior á sus fuerzas y se vió obligado á abandonarlo, después, sin embargo, de haber obtenido resultados importantes y conformes con los de Carrington. Es quizás prematuro dar el nombre de leyes á estos resultados que el P. Secchi clasifica de la siguiente manera.

Cuando una mancha se divide ó sufre un cambio de forma considerable, se observa siempre un movimiento brusco, una especie de salto, que tiene lugar invariablemente hacia la parte anterior, esto es, en el sentido en que crecen las longitudes. Estos movimientos bruscos los experimentan también las manchas grandes, y se notan á veces aumentos de actividad en la fuerza ó movimiento que las produce.

La estabilidad de las manchas redondas ó crateriformes es mayor que la que presentan las de bordes angulosos ó núcleos múltiples é irregulares, y suelen durar varias rotaciones. Diferéncianse, pues, de las pequeñas y superficiales, cuyos movimientos presentan gran desigualdad, lo mismo que de las grandes, en la época de formación y cuando están á punto de desaparecer. Muchas veces sucede que una mancha grande, después de haberse disuelto, reaparece á corta distancia de su posición primitiva, pero siempre hacia la parte anterior, por lo cual es muy difícil afirmar que la segunda mancha se deba á la misma causa que produjo la primera.

De una gran serie de manchas estudiadas durante varias rotaciones sucesivas en el Observatorio del Colegio Romano y calculadas según la fórmula de Carrington, se deduce de una manera evidente que están dotadas de un movimiento propio que las transporta en la superficie del Sol con una velocidad extraor-

dinaria. Laugier ha determinado el arco de distancia de varias manchas en grados de un círculo máximo del Sol; el 24 de mayo de 1840 la distancia angular que separaba dos manchas era de  $78^{\circ} 30'$ , que en tres días disminuyó á  $73^{\circ} 20'$ , y suponiendo que la diferencia de  $5^{\circ} 10'$  hubiese sido debida al cambio de lugar de una sola de ellas, resulta una velocidad propia de 111 metros por segundo: este mismo astrónomo descubrió que las manchas caminan en direcciones opuestas en cada hemisferio.

Los movimientos no se contraen sólo á las longitudes; y en sentido de la latitud también se observan variaciones muy notables de 2 y 3 grados durante una media rotación solar, es decir, en el tiempo que tarda la mancha en pasar aparentemente del borde oriental al occidental.

Faye se ha ocupado en discutir y examinar, desde el punto de vista de la teoría de los movimientos, las observaciones de Carrington y Secchi, y después de un trabajo largo y penoso ha formulado las siguientes reglas por todo extremo interesantes:

Cuando las manchas persisten durante varias rotaciones sucesivas, presentan un movimiento oscilatorio, cuya amplitud mide varios grados, y cuyo período supera al de la rotación del Sol. Las longitudes presentan una oscilación periódica de igual valor, y la combinación de estos dos movimientos hace que la mancha describa alrededor de su posición media y en sentido de la rotación solar una elipse, cuyo eje mayor se dirige hacia los polos. Las dimensiones de estas elipses y sus períodos de revolución varían de una mancha á otra; además, estos fenómenos no se manifiestan de un modo evidente sino en las manchas que persisten durante varias revoluciones.

Son muchos los astrónomos que han fijado su atención en el estudio del hecho extraordinario, revelado por las investigaciones de Carrington, de que la velocidad de la rotación solar no es igual en todos los paralelos. Unos han supuesto que la masa interior del Sol es sólida y está cubierta de una capa fluida, de escaso espesor, que roza contra la superficie del núcleo. Zollner ha defendido esta teoría y ha presentado una fórmula que no concuerda con los hechos observados, puesto que no es aplicable á las regiones polares, y que, por otra parte, los movimientos propios de las manchas demuestran que estos fenómenos están producidos por una agitación profunda, que se extiende hasta las capas más inferiores. Otros comparan los movimientos de la fotosfera á las corrientes de vientos llamados alisios, que soplan entre los trópicos y se originan por el movimiento de rotación de la Tierra combinado con el calor del Sol en la zona ecuatorial.

La hipótesis de Faye, que compara las manchas á los huracanes de movimiento giratorio ó tornados, explica varios de los hechos que se observan; pero no puede generalizarse de la manera que su ilustre autor pretende, pues el movimiento ciclónico no es perceptible en todas las manchas, y aun en una misma cambia de dirección con gran frecuencia; cierto es, sin embargo, que en el hemisferio austral el sentido giratorio es *dextrorsum*, y *sinistrorsum* en el boreal, ó sea opuesto á la marcha de las agujas de un reloj; pero el número de manchas que presentan esta particularidad es relativamente pequeño. Otra diferencia capital entre las borrascas terrestres y las solares se nota en el período de desapari-

ción, en que los torbellinos del Sol parecen contraerse, mientras que los de la Tierra se dilatan: los primeros tienen un movimiento de rotación considerable, al paso que los segundos, al dirigirse á los polos, pierden su movimiento en longitud.

Es difícil hallar la causa que produce estas convulsiones, estas crisis extraordinarias, en el movimiento de rotación del Sol ó en el de la fotosfera sobre el núcleo; estas causas son permanentes, á diferencia de las manchas, cuyo carácter principal puede decirse que es la variabilidad; se asegura por algunos que los poros que se manifiestan en la superficie del Sol son otros tantos huracanes análogos á los terrestres; pero esta opinión no descansa sobre ningún fundamento sólido, antes al contrario, el P. Secchi ha estudiado este asunto con perseverancia y no ha podido descubrir nada que haga suponer la existencia de un movimiento vorticoso.

Uno de los descubrimientos más interesantes de la astronomía moderna ha sido el de los períodos seculares de las manchas del Sol, que se debe al barón Schwabe, de Dessau, cuyas observaciones duraron desde 1826 hasta 1868.

Del estudio de esta preciosa serie de observaciones se deduce un período de máxima y otro de mínima, en el número de manchas, que se suceden con un intervalo de diez ó doce años. Ciertamente que las observaciones de Schwabe no están al abrigo de toda crítica y que sus dibujos los ejecutó en escala muy pequeña, pero en una masa de observaciones tan inmensa se compensan estas diferencias entre sí. Comparada la serie de Schwabe con las de Carrington y las del Observatorio de Kew, de tiempos más modernos, se ha visto que el resultado es en extremo satisfactorio; este trabajo ha sido dirigido por de la Rue, que ha evaluado la superficie cubierta por las manchas en millonésimas del hemisferio visible, distinguiendo la penumbra, el núcleo y la mancha total, y corrigiendo las deformaciones aparentes que se producían, á medida que se acercaban á los bordes.

El período de las máximas y mínimas de las manchas está comprendido entre 10 y 12 años, y cada máxima parece más próxima á la mínima anterior que á la siguiente.

Las observaciones de Schwabe sólo llegan hasta 1868, pero afortunadamente no ha quedado interrumpida la serie, gracias á los trabajos realizados por Wolf de Zurich, que desde el año 1849 venía efectuando observaciones de la misma índole.

Varios son los astrónomos que se han ocupado en calcular la duración de los

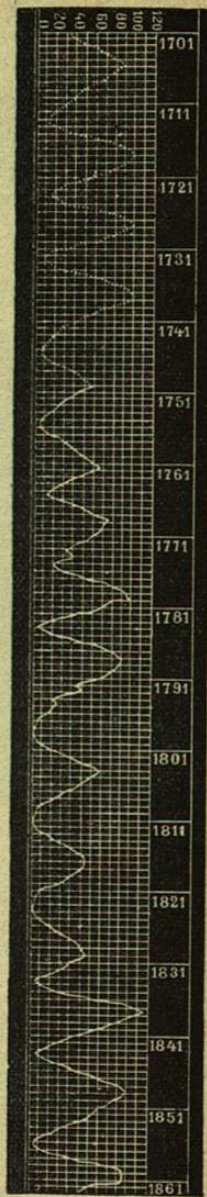


Fig. 40. - Curva de las variaciones anuas

períodos de máxima y mínima de las manchas; Wolf lo estima en 11 años y  $\frac{1}{3}$ ; Lamont en 10 años y  $\frac{43}{100}$ ; la mayor actividad del Sol parece que va unida á los períodos cortos, y la menor á los períodos largos. El intervalo que media entre la época de máxima y la de mínima consecutiva se halla dividido en dos sub-intervalos de 4,77 años y 6,34 años; según Herschel, el máximo viene á caer en el quinto año del período comprendido entre dos mínimas; de la Rue fija la desigualdad de los sub intervalos en 3,7 años y 7,4, y Stewart y Loewy son también de este parecer. Atendiendo á la diversidad de los métodos empleados, no deja de ser sorprendente esta coincidencia, pues los resultados vienen á ser casi idénticos; en unos casos ha servido como elemento el número de grupos de man-

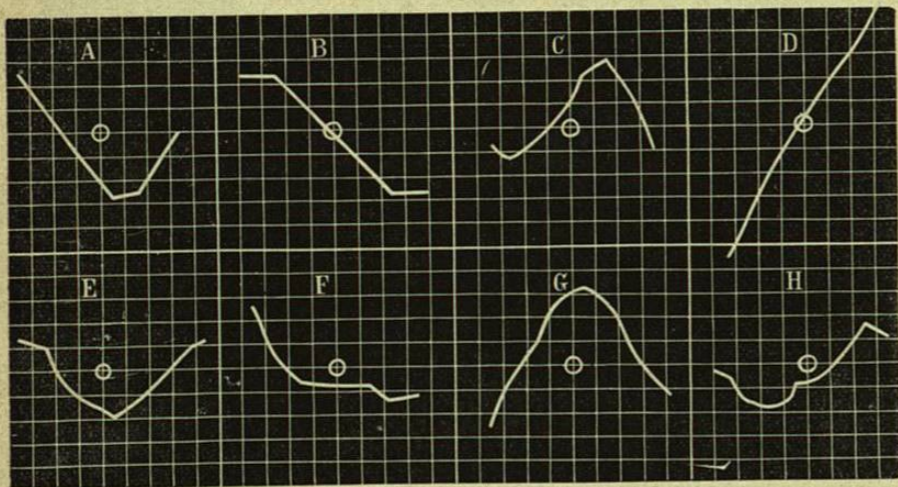


Fig. 41. - Influjo de los planetas sobre las manchas solares  
El signo O indica el centro del disco visible

A. Venus en el centro - B. En el extremo derecho. - C. A 180° del centro. - D. En el extremo izquierdo. - E. Mercurio en el centro. - F. En el extremo derecho. - G. A 180° del centro. - H. En el extremo izquierdo.

chas, y en otros su extensión superficial. En cuanto á la ley del aumento y disminución de un período dado de manchas, difieren grandemente los resultados de Wolf de los obtenidos por otros astrónomos. Según el observador suizo, cuando disminuye la frecuencia de las manchas rápidamente de un máximo al mínimo siguiente, sube con igual rapidez del mínimo al máximo sucesivo; si el decrecimiento se ha verificado con lentitud, lentamente también tiene lugar el aumento. De la Rue, Stewart y Loewy relacionan la rapidez ó lentitud de aumento, en la frecuencia de las manchas de un mínimo á un máximo, con el mínimo siguiente, en que decrecen con igual rapidez ó lentitud.

La fig. 40 representa la curva construída por Wolf para poner de manifiesto las variaciones anuas; las abscisas son los años y las ordenadas el número de manchas observado; de su estudio se deducé que hay dos períodos, uno undece-

nal y otro semisecular de 55  $\frac{1}{2}$  años; Wolf dice que existe otro además, tres veces mayor que el segundo, ó de 166 años.

Otra coincidencia se ha observado en los períodos de las manchas. Del examen escrupuloso hecho por Wolf de las observaciones de Schwabe, parecen resultar unos períodos menores relacionados con los movimientos de la Tierra, de Venus, de Júpiter y de Saturno; se ha encontrado una actividad mayor, en grado muy perceptible, que se manifiesta *anualmente*, por los meses de septiembre á enero con preferencia al resto del año. La causa determinante de este período puede residir muy bien en el interior del globo solar, ó en el medio en que se mueve; pero la hipótesis más probable es la del influjo de los planetas; la atracción de estos cuerpos produciría en la superficie del globo del Sol unas mareas semejantes á las de los océanos de la Tierra, y serían el origen de la formación de las manchas, que experimentarían, en cuanto á su frecuencia, una especie de *unidad de altura*, debida á las distancias y posiciones periódicas de los astros que las producen. Mercurio y Venus, por su proximidad al astro central, pueden ejercer una gran influencia en este fenómeno, á pesar de su pequeña masa; Wolf ha trazado una curva continua de la frecuencia de las manchas, que demuestra, por una serie de ondulaciones pequeñas, separadas por intervalos medios de 7,65 meses ó 0,637 de año, su íntima relación con el tiempo periódico de Venus, que es de 255 días, y reducidos á fracción de año, 0,616; esta coincidencia hace muy aceptable la hipótesis de que entre los dos fenómenos existe alguna conexión física. Balfour Stewart opina así mismo sobre el influjo de los planetas Mercurio y Júpiter; de sus trabajos resulta que las manchas se manifiestan en mayor número en la región del Sol que está más próxima al planeta Venus. «El Sol en su movimiento giratorio transporta la mancha que acaba de formarse, la que á medida que se aleja del planeta, crece, adquiriendo su mayor tamaño en el punto más distante de Venus, desde donde empieza á disminuir, al irse aproximando al planeta, en la segunda parte de la rotación.»