



Los engranajes del cielo: El planetario opto-mecánico, una joya de la mecánica en vías de extinción (I)

Palabras clave: Planetario, simulador celeste, planetas, opto-mecánica, engranajes.

Key words: Planetarium, sky simulator, planets, opto-mechanics, gears.

Resumen:

La simulación del cielo estrellado y sus ciclos, pero sobre todo de los complicados movimientos del Sol, la Luna y los planetas, ha sido siempre una obsesión de las mejores mentes de cada época. Mecanismos perfeccionados a lo largo de décadas, unidos a conjuntos ópticos de alta calidad y a los últimos desarrollos en iluminación y fibra óptica, han llegado a conformar verdaderos computadores analógicos de proyección óptico-mecánica del cielo, de alta precisión llamados planetarios, que han dominado este campo durante casi un siglo. Ahora, la aparición de nuevas técnicas de proyección de vídeo digitales, menos costosas aunque de menor calidad óptica, amenazan la supervivencia de estas joyas opto-mecánicas que pueden convertirse poco a poco en piezas de museo. Describimos las principales características de estos singulares aparatos que consiguen simular dinámicamente el brillo y la posición de los astros celestes por medio de lentes, motores y engranajes.

Abstract

Simulation of starry sky and its cycles, but mainly of the complicated movements of the Sun, the Moon and the planets, has always been an obsession for the best minds of any moment in history. Mechanisms perfected along decades, together with high-quality optical elements and with the latest developments on fibre-optics or advanced lighting, have allowed creating very accurate analogical computers for optomechanic sky projection, called planetariums, which have dominated the field for nearly a century. Now, the birth of new digital video projection techniques, less expensive but worse in optical quality, threaten the survival of these opto-mechanical jewels which could end-up their days as museum pieces. We describe the main features of these outstanding machines that can dynamically simulate the brightness and position of celestial bodies by means of lenses, motors and gears.



Juan Antonio Bernedo Casis

Ingeniero Superior del ICAI, Promoción 76, especialidad Mecánica. Jefe Técnico del Planetario de Madrid desde 1987. Miembro del Comité Tecnológico del IPS (Internacional Planetarium Society).

Introducción

Los Planetarios, incluidos en museos y centros de divulgación de la Ciencia o como entidades independientes, son centros dedicados a la enseñanza y a la divulgación de la Astronomía. Se llaman así porque cuentan con una sala de proyección hemisférica en cuyo centro se sitúa un **complejísimo proyector que se conoce como planetario**. Este nombre se debe a que, aunque proyecta también miles de estrellas observables a simple vista, tiene el principal mérito de poder simular la posición y el movimiento real de los planetas en el cielo, a lo largo del tiempo, tal como se ven desde nuestro planeta.

Los Planetarios cuentan con medios de proyección complementarios de imagen fija, de vídeo y de efectos especiales y de sonido, todos ellos perfectamente sincronizados para crear un espectáculo capaz de envolver al espectador y acompañarlo en sus viajes por el espacio. Pero el corazón del sistema es este proyector capaz de reproducir el cielo de cualquier época en el pasado y del futuro y mostrarnos cómo se mueven los astros en el cielo, con exactitud sorprendente, por medios óptico-mecánicos.

Antecedentes históricos

El interés por representar el cielo y sus movimientos ha existido desde hace milenios, pero la forma de hacerlo ha seguido un curso paralelo a la **tecnología disponible** en cada época. Aunque ha habido un desarrollo continuo hasta llegar a los modelos de

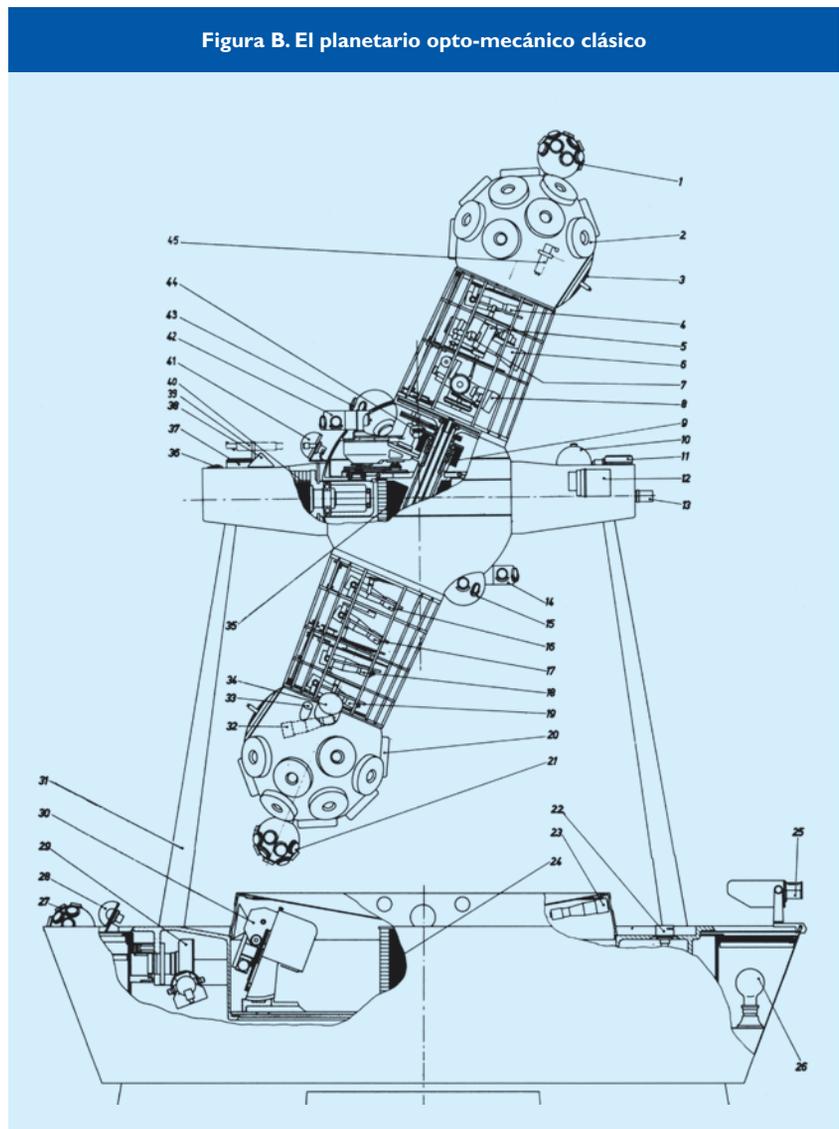


Figura B. El planetario opto-mecánico clásico

simulación actuales, son especialmente importantes los avances en óptica de los siglos XVIII y XIX, así como de los engranajes de precisión que hicieron posible resolver los complejos mecanismos interiores del primer prototipo de planetario presentado por el Museo Alemán de Munich en 1923 [Figura A]. Diseñado y construido por la empresa de instrumentos ópticos Zeiss contaba ya con todas las partes fundamentales del planetario, capaz de simular el cielo calculando y proyectando, sobre una pantalla en forma de cúpula, las posiciones y movimientos de los astros.

El planetario opto-mecánico clásico

El tipo de planetarios más común de todos los que están instalados actualmente en el mundo, correspon-

de al del **planetario opto-mecánico clásico** [Figura B], con los proyectores de estrellas y planetas integrados en un mismo cuerpo, con interacción mecánica entre ellos. Son verdaderas **computadoras analógicas para la simulación de los astros del cielo**.

Simulación del cielo estrellado

Del cielo estrellado, se trata de reproducir lo más fielmente posible sus características: la posición de cada estrella, su brillo, su color y su movimiento. La dificultad fundamental es que las estrellas reales son **puntuales**, mientras que en un planetario deben simularse los diferentes brillos de las estrellas mediante **diferencias en el diámetro** de cada estrella proyectada sobre la cúpula.

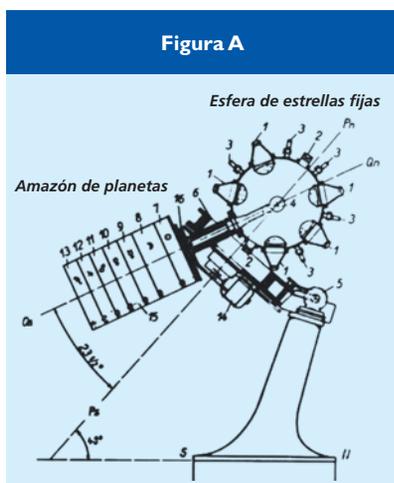
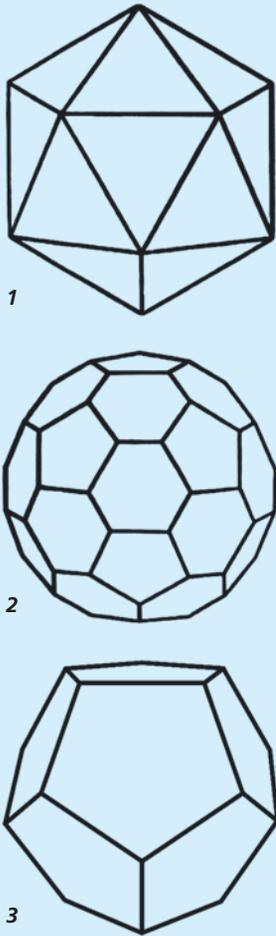


Figura A

Esfera de estrellas fijas

Amazón de planetas

Figura C. Formas de división del cielo estrellado



12 caras [C3], que son todas de forma pentagonal. Así se obtiene un proyector más sencillo, aunque las deformaciones a compensar, debidas al “campo plano” de la diapositiva o placa de estrellas, son mucho mayores.

Componentes de cada proyector de campo de estrellas

Esos proyectores individuales, cada uno para una región del cielo, se disponen **radialmente** alrededor de una esfera [Figura D2] en cuyo centro está la fuente de luz. Eso permite que esta **fuente de luz** sea **común** a todos los campos estelares, aprovechando mejor la potencia lumínica y **confinando a una zona estanca** la iluminación.

Cada proyector de campo de estrellas, además de la **fuente de luz**, [Figura D1] consta de una **lente condensadora** [D14], que concentra esa luz sobre una diapositiva o **placa de estrellas** [D13] en la que perforaciones de distintos diámetros, proyectan puntos luminosos sobre la pantalla o cúpula de proyección a través de un **objetivo de precisión** [D9] y un **obturador de horizonte** [D10].

Las **fuentes de luz** que se usan en planetarios pueden ser **de incandescencia**, bien sea en atmósfera inerte o halogenada, y lámparas **de descarga** de mercurio o de gases nobles, como se tiende

a instalar recientemente. En general las lámparas de incandescencia son más fiables, de más fácil mantenimiento y sobre todo, permiten su encendido y apagado inmediato, mientras que las de descarga tienen mejores rendimientos y temperaturas de color; pero tienen fuertes condicionantes en cuanto a sus tiempos y curvas de encendido y apagado, por lo que requieren obturadores mecánicos para controlar su apagado. Algunos tipos de lámparas no permiten todas las orientaciones de funcionamiento, por lo que no son aptas para planetarios, ya que van a estar en continuo movimiento y adoptando todas las posiciones posibles.

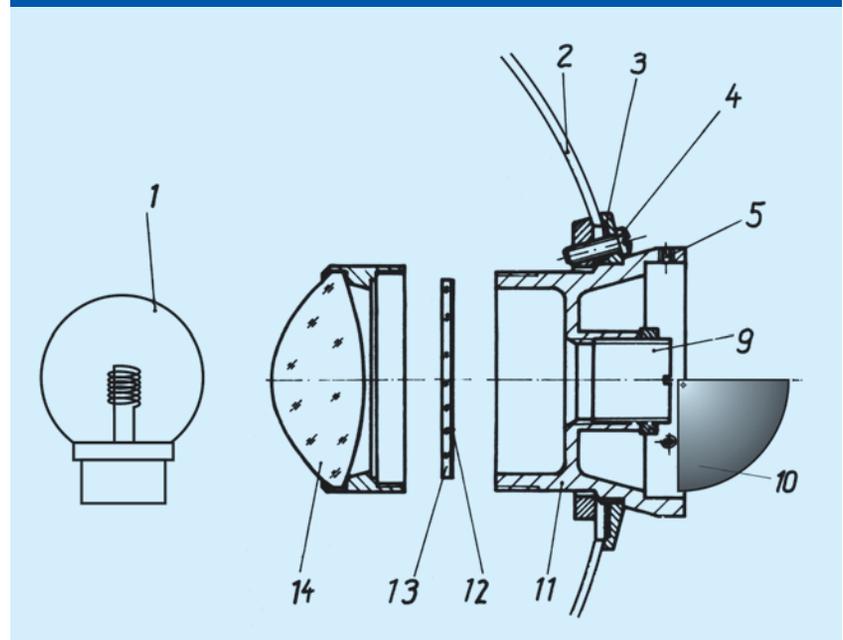
El **filamento de la fuente de luz** debe ser lo más concentrado posible y estar posicionado exactamente en el **punto central** del globo de estrellas, para lo cual se dota al portalámpara de un sistema de alineación y registro. De esa fuente surge la luz radialmente en todas direcciones y alrededor de ella se disponen todas las lentes que van a recoger esa luz. Esas lentes deben ser grandes para captar la mayor parte posible de luz, y hacerla pasar por la diapositiva o placa de estrellas y los objetivos de cada campo.

Estas **lentes condensadoras** están muy próximas a la fuente de luz debiendo soportar las variaciones de

Para facilitar su proyección, se divide el cielo en **sectores o campos estelares**. La forma de división más extendida es en 32 campos o zonas, hexagonales y pentagonales según una figura de un icosaedro de 20 caras [Figura C1] al que se han truncado los vértices. La figura resultante es un conjunto de 20 hexágonos y 12 pentágonos que cubren completamente el cielo [C2]. Normalmente se dividen los **32 campos entre los dos hemisferios celestes**, quedando 16 campos en cada una de las semiesferas estelares, a ambos lados del proyector.

Hay otras formas de división del cielo: en algunos proyectores antiguos se hacía mediante 27 campos y en los proyectores de última generación se tiende a simplificar la esfera de estrellas y dividirla sólo en 12 campos, según la figura de un **dodecaedro de**

Figura D. Componentes de cada proyector de campo de estrellas



temperatura sin experimentar dilataciones excesivas y sus monturas deben absorber las dilataciones de las lentes manteniendo su eje óptico. Asimismo deben filtrar en la mayor medida posible las **radiaciones infrarrojas** provenientes de la fuente de luz e impedir su paso hacia la diapositiva y al objetivo.

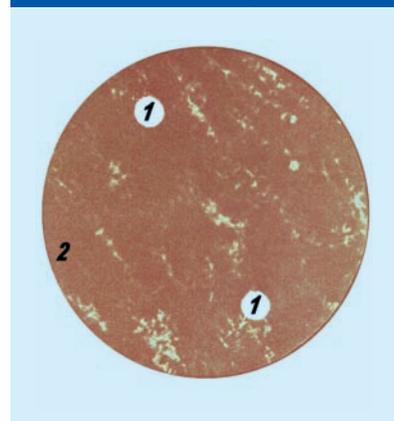
Respecto a la **diapositiva perforada o placa de estrellas**, es necesario que la imagen proyectada reproduzca las estrellas proporcionando la sensación lumínica que es requerida para cada estrella. Esta sensación, que sigue una **ley geométrica**, se conoce en términos astronómicos como **“magnitud”** de cada estrella, siendo un índice inverso, según el que una estrella es **2,5 veces más brillante** que otra de magnitud superior. Puesto que el brillo de la estrella proyectada es proporcional al cuadrado de su diámetro, el de una estrella de una magnitud determinada debe ser 1,6 veces el de una estrella de una unidad de magnitud mayor:

En los primeros modelos de planetarios optomecánicos de 1923, las

estrellas más brillantes presentaban en la superficie de la cúpula **diámetros de 25 minutos de arco**, que al ojo humano aparecían claramente como discos extensos. A medida que fueron aumentando la potencia y la temperatura de color de las fuentes luminosas de proyección, este diámetro se pudo ir reduciendo, a 20 minutos en los modelos de 1926, a 14' en 1950 y a 10' en 1980. En 1989 se introdujo la fibra óptica para concentrar la iluminación, lo que permitió disminuir el diámetro a 5' y la utilización de las lámparas de arco, de mayor eficiencia luminosa, hizo posible reducir el diámetro a **1 minuto de arco**, pareciendo ya las estrellas puntuales al ojo humano, puesto que el **poder resolutivo del ojo**, es decir, la mínima distancia angular que puede apreciar es de 1 minuto de arco.

Esto supone que todas las estrellas en los proyectores modernos, incluyendo las más brillantes, son apreciadas como **puntos de distinto brillo**, sin que puedan observarse discos, ni diferencias de diámetros entre ellas.

Figura E. Placa de estrellas al microscopio



Estas imágenes puntuales provienen de perforaciones [Figura E1], de una chapa fina de cobre [E2], que es la **placa de estrellas de cada campo**. Sus diámetros, gracias a las mejoras en las lámparas y al uso de fibra óptica se han podido reducir en la actualidad a órdenes **de entre 3 y 250 micras** de diámetro, que no presentan problemas para ser taladrados con exactitud puesto que son realizados por **técnicas láser**, pero que en un pasado planteaban cierta dificultad ya que había que realizarlos por **métodos electroquímicos** y con anterioridad, **manualmente**. La elección del **cobre** para el material de la diapositiva se debe a que va a soportar unas **cargas térmicas** bastante exigentes en cuanto a temperatura, conductividad calorífica y dilatación térmica.

Esas perforaciones a sus diámetros adecuados, deben realizarse en las posiciones exactas [Figura F], para que, al proyectarse, representen sus posiciones reales en el cielo. Ello implica que hay que **recalcular su proyección sobre el plano de la diapositiva** de la zona del cielo a proyectar, debido a tres factores. Además del cambio de coordenadas necesario debido a la **distorsión de paralaje**, ya que no se proyecta cada campo del cielo desde el centro de la sala exactamente, y de la **conversión de una proyección esférica a una diapositiva plana**, hay que tener en cuenta la **aberración esférica inherente a los objetivos** de proyección.

La exactitud de la proyección de estrellas sobre la cúpula tiene un margen

Figura F. Campo pentagonal placa de estrellas

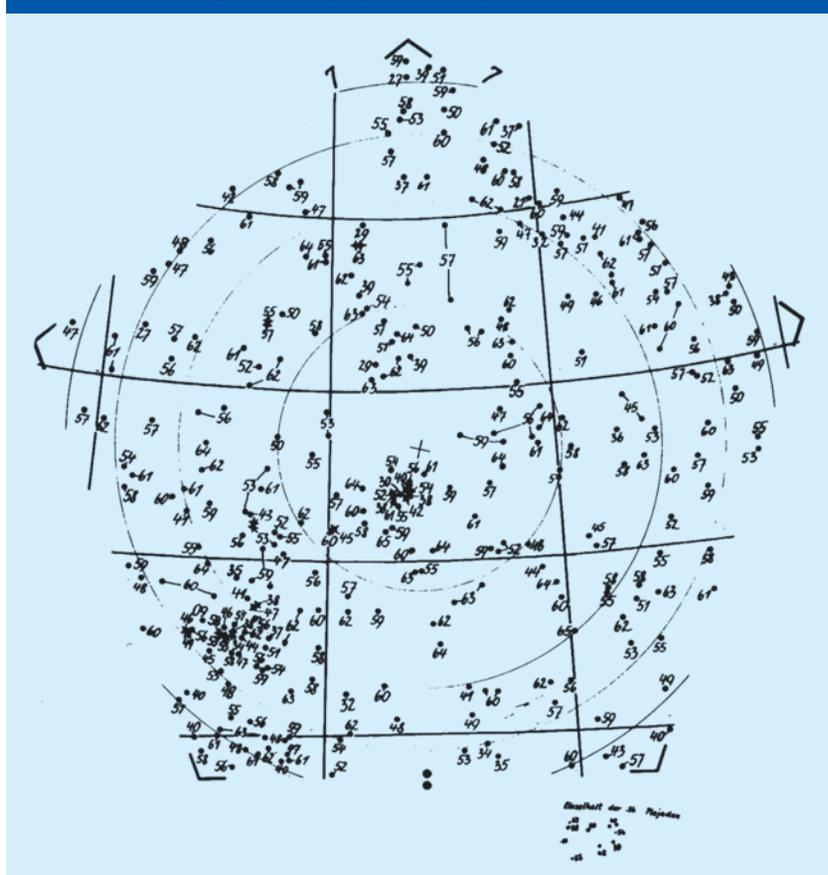
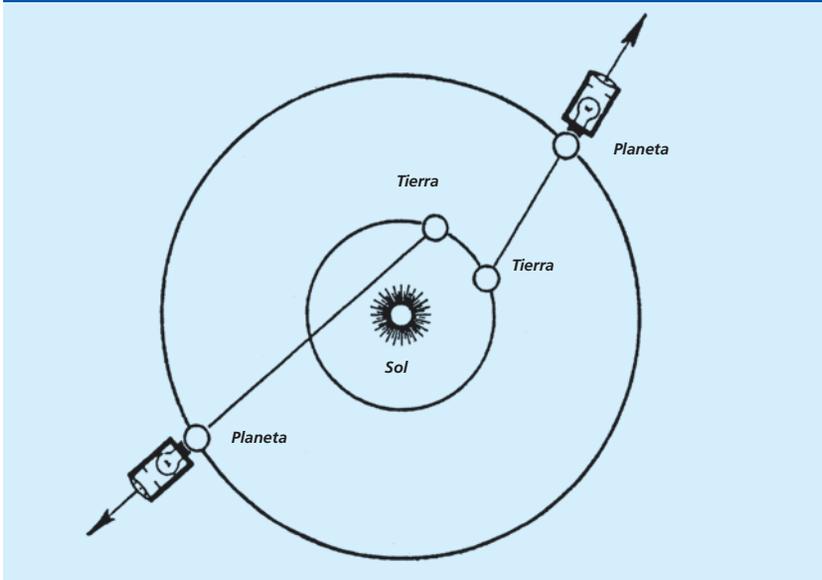


Figura G. Simulación geocéntrica básica de un planeta



de unos **3 minutos de arco** en los mejores proyectores, lo que significa una exactitud en la posición de la perforación sobre la placa de estrellas de **una micra** ($\pm 0,001$ mm).

Los **objetivos de proyección** suelen ser de **focales medias (50mm)** en los planetarios clásicos de **32 campos**. En algunos 7 planetarios modernos, en los que se divide el cielo en **12 campos**, deben usarse objetivos de **gran angular (28-32 mm)**, si bien aumenta mucho la distorsión a compensar en las placas de estrellas.

Se dota a cada proyector de **diafragmas de horizonte** individuales para que las estrellas se apaguen por debajo del horizonte. Normalmente se utilizan obturadores fuera de foco, para que las estrellas se vayan **extinguendo gradualmente** al aproximarse al horizonte, como ocurre en el cielo real. Esto se consigue, en la mayoría de los modelos, mediante un **diafragma basculante** de sección esférica, similar a los utilizados en juguetería para simular los párpados de los ojos de las muñecas. Puesto que todo el proyector va rotando sobre varios ejes, hay que montarlo sobre un **soporte giratorio** adosado al objetivo, con **otro contrapeso** que mantiene el mecanismo siempre vertical y el obturador esférico, horizontal. El conjunto tiene un funcionamiento similar a una **suspensión cardan**.

Simulación geocéntrica de los Planetas, Sol y Luna

La simulación del **movimiento geocéntrico de los planetas**, es la parte más delicada del proyector y en la que son necesarias técnicas más refinadas. La proyección de los planetas sobre la esfera de estrellas fijas requiere representar, a lo largo del tiempo, la **posición** en la que se observan los planetas desde la Tierra, o lo que es lo mismo, la **dirección** en la que los vemos desde la Tierra, a la que llamamos **“visual”**. Esta dirección va a depender tanto del **movimiento propio**

del planeta en su órbita alrededor del Sol como del **movimiento del punto de observación** que es la superficie de nuestro propio planeta.

Para representar esa dirección “visual” proyectada sobre la esfera de estrellas, se construye un proyector para cada planeta [Figura G]. Éste se fija, por un extremo a una **rótula o pivote** que va a representar la Tierra, es decir, nuestro punto de vista, y por el otro extremo se sujeta a otra **rótula** que va a representar la **posición del planeta** en cuestión. De esa forma el proyector dirige un haz de luz desde la Tierra hacia el planeta, que se proyecta sobre el fondo de la esfera celeste en su posición correcta.

Para que los movimientos de los planetas sean los reales, las posiciones de las rótulas que simulan la situación de la Tierra y del planeta tienen que ser **proporcionalmente exactas en sus órbitas** y reproducir todos sus movimientos según las **leyes de Kepler**, incluyendo la **elipticidad de la órbita** y la **posición del eje en el foco de la elipse**. La mayor dificultad es que ambas rótulas deben tener un movimiento orbital no uniforme, sino **variable según la 2ª ley de Kepler**, que obliga a que en cada momento la velocidad de un planeta en su órbita sea inversamente proporcional a su distancia al Sol. Para lograrla, una primera aproximación consiste en **desplazar el eje de la órbita** proporcionalmente a su

Figura H. Proyector de Planeta

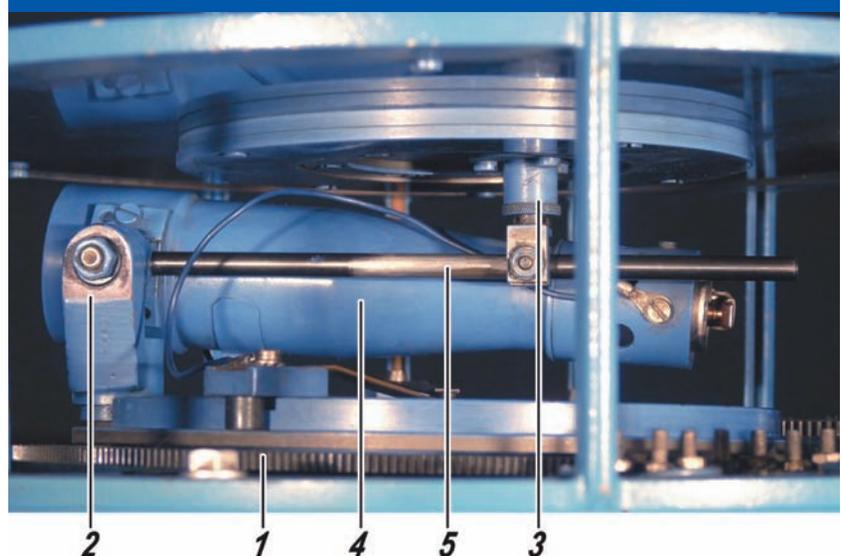


Figura I. Accionamiento de los platos de planetas



excentricidad, simulando el desplazamiento real del Sol desde el centro geométrico de la elipse a su foco (en el caso de la Tierra, un 1,7%).

En la práctica, lo que se hace es construir un plato con un engranaje externo [Figura H1], que simula la **órbita de la Tierra**, que tiene un pivote [H2] acabado en una rótula articulada, que va a representar la **posición de la Tierra**, moviéndose a velocidad angular terrestre, es decir una vuelta cada año o 365 días. De la misma forma se construye otro plato con otro pivote para **representar al planeta** [H3], que se mueve con la velocidad angular del cuerpo celeste en cuestión. Este plato del planeta debe estar inclinando respecto al plato de la Tierra en la exacta medida en que lo está su órbita. Se monta el proyector del planeta entre ellos [H4], con un punto fijo en la rótula de la Tierra y el otro en la del planeta. Estas sujeciones tienen que permitir la variación de distancia entre los extremos, puesto que la distancia Tierra-planeta va a ir variando según se muevan sus pivotes representativos.

En la mayoría de los planetarios, la solución constructiva adoptada es montar cada proyector de planetas sobre una barra-guía [Figura H5] que se fija sobre la rótula de uno de los pivotes y que desliza sobre la otra rótula mediante un **mecanismo de correde-**

ra. Así se consigue que la visual del planeta pase siempre por ese punto, permitiendo a la vez el desplazamiento axial de la barra-guía entre el punto de la Tierra y el del planeta.

Mediante los piñones [Figura I1] situados en la barra de arrastre de "movimiento anual" [I2] se transmite la velocidad de giro exacta, tanto al plato de Tierra [I3], como al de planeta [I4], que a su vez arrastran el proyector de cada planeta. Así, se pueden simular con suficiente fidelidad sus movimientos relativos vistos desde nuestro planeta, facilitando la comprensión de los bucles de Marte, los de Venus y Mercurio y las retrogradaciones anuales de Júpiter y Saturno sobre el cielo.

El error total en la posición de un planeta, incluyendo holguras y errores de arrastre no puede sobrepasar los 10 minutos en ascensión recta y 1° en declinación, manteniéndose en la mayoría de los casos muy por debajo de estos valores, especialmente en el caso de los planetas exteriores.

En esencia, el proyector de un planeta es bastante sencillo y es un modelo único para todos los planetas (se suelen representar sólo los 5 planetas visibles a simple vista, el Sol y la Luna). Consta de una pequeña lámpara de bajo voltaje [Figura J1], cuya luz es concentrada por una lente condensadora [J2] hacia una micro-diapositiva de vidrio con la figura del planeta [J3]. La imagen es proyectada mediante un objetivo de óptica larga [J8]. Este proyector tiene interiormente un **obturador** [J7] auto-orientable por gravedad, que se encarga de atenuar la luz del planeta cuando su imagen se acerca al horizonte y que la oculta por completo cuando baja por debajo de éste.

Hay diferencias importantes para cada planeta en cuanto al montaje, inclinación de platos y **mecanismos de corrección de elipticidad** de la órbita que se comentan a continuación.

En el caso de **Marte**, se inclina el plato del planeta $1,85^\circ$, y en el de Venus $3,4^\circ$, ángulos ya suficientemente acusados para tener que interponer en el tren de engranajes del plato de cada planeta un engranaje de cambio de plano, mediante engranajes cónicos.

El caso de **Mercurio** es muy especial: además de la máxima inclinación de órbita, de $7,004^\circ$, que también

Figura J. Interior de proyector de planeta

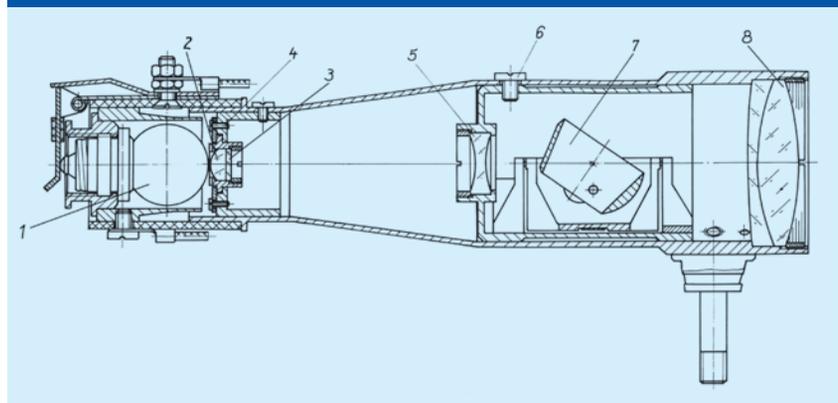
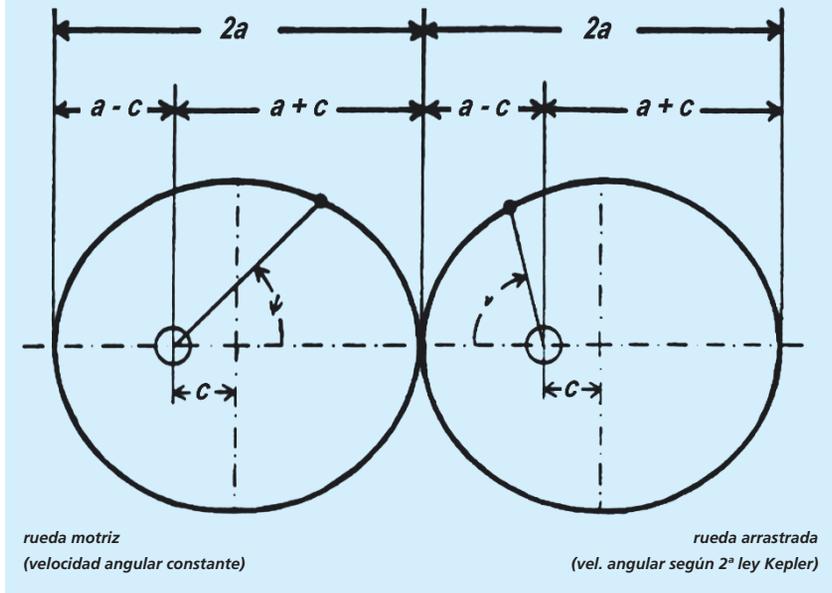


Figura K. Mecanismo corrector de Schwesinger



para ese planeta, con un error que se reduce a un término de tercer orden.

El segundo es un sistema más complejo [Figura L], pero de más fácil construcción. Se trata de un **mecanismo de doble manivela** o triaxial. Consta de un plato de arrastre primario que arrastra otro plato intermedio, que está desplazado respecto al anterior $r\varepsilon/2$, a través de unos bulones que deslizan dentro de unas ranuras del plato intermedio (r es el radio del plato y ε la excentricidad de la órbita del planeta). Este plato a su vez arrastra el plato del planeta, también desplazado $r\varepsilon/2$, a través de otros dos bulones, de tal forma que la ley de movimiento del último plato es próxima a la de Kepler. Este se conoce como **mecanismo de Bauersfeld**, que fue su diseñador original, en la fábrica de Zeiss de Jena, Alemania.

requiere un engranaje de cambio de plano, tiene también una elipticidad en su órbita importante (0,206), por lo que no se puede corregir, como en los otros planetas, con un simple desplazamiento del eje respecto al del Sol proporcional a su excentricidad, y es preciso utilizar alguno de los mecanismos que aproximan las posiciones a las predichas por la Ley de Kepler.

Estos mecanismos de corrección son tres principalmente: el mecanismo de los "engranajes elípticos conjugados", el de "doble manivela" y el "cardan".

El primero [Figura K], conocido también como **mecanismo de Schwesinger**, se basa en un par de engranajes en los que las líneas medias de rodadura no son circunferencias sino elipses idénticas conjugadas, dispuestas de tal modo que cuando el punto de engrane se encuentra en el extremo alejado del foco de una de las elipses, en la otra se encuentra en el extremo más cercano al foco. El diseño de los dientes es especial para permitir el engrane en toda la periferia de la elipse. La excentricidad de cada eclipse (c/a) debe ser la mitad de la excentricidad del planeta a representar ($\varepsilon/2$).

Al mover la elipse de arrastre con velocidad angular uniforme, en la elipse arrastrada se producen aceleraciones y deceleraciones que siguen muy aproximadamente la 2ª ley de Kepler

Figura L. Mecanismo corrector de doble manivela de Bauersfeld

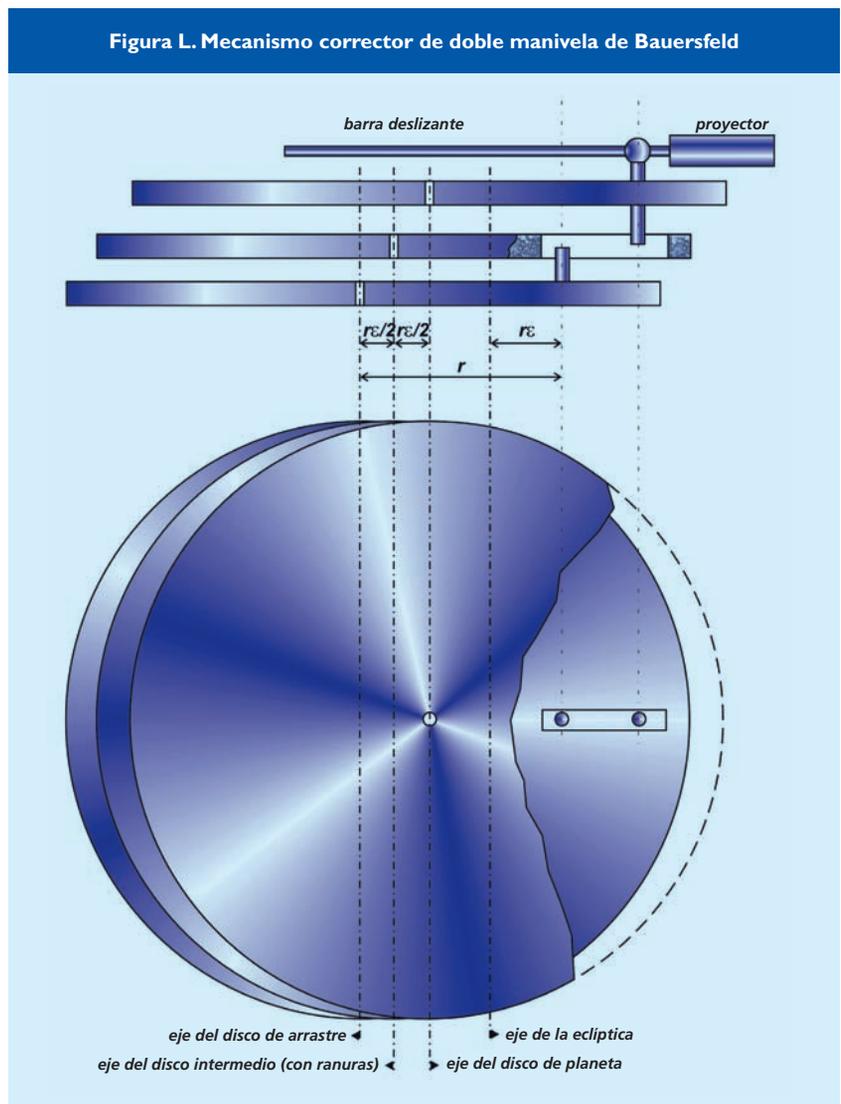
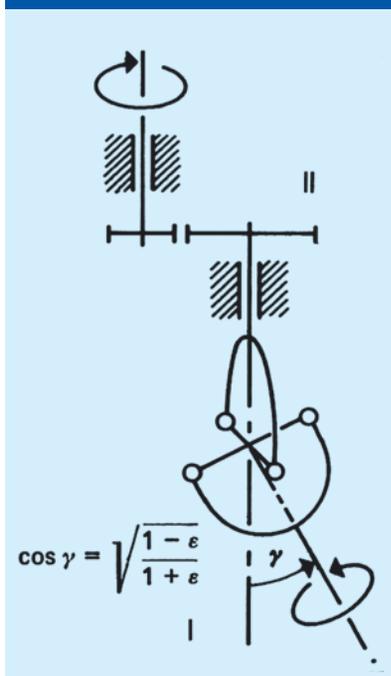


Figura M.
Mecanismo corrector Cardan



Un tercer sistema es el de **transmisión Cardan** [Figura M], cuyos ejes no son paralelos, sino que forman un ángulo γ .

Ese ángulo se elige de tal forma que:

$$\cos \gamma = \sqrt{[(1-\varepsilon)/(1+\varepsilon)]}.$$

En este caso, dotando al eje de arrastre de una velocidad angular uniforme, el eje de salida da una velocidad variable muy aproximada a la de la ley Kepler; pero con una frecuencia de dos periodos completos por revolución del eje, por lo que hay que añadir un engranaje reductor. Como tiene además el inconveniente del cambio de plano, el sistema se complica bastante y resulta poco práctico constructivamente, aunque es muy preciso.

Comparando los errores de los otros dos sistemas, más viables, mientras el segundo puede dar lugar a errores máximos de $\pm 0,05^\circ$, el primero, de Schwesinger; lo reduce a $\pm 0,02^\circ$. La construcción de éste es complicada, por lo que se suele dotar a los planetarios del sistema de corrección de doble manivela para el planeta de máxima excentricidad, Mercurio y, en algunos modelos, también de Marte, aunque tiene una excentricidad de la órbita (0,093) mucho menor que la de Mercurio (0,206).

En cuanto al **error en la velocidad angular** debido a la inexactitud en la **relación de engranajes**, tomando el caso más desfavorable de Mercurio, en el que hay que conseguir un período sidéreo de la exactitud $1/4,15209106$, es decir, exacto hasta la cienmillonésima de vuelta, se consigue con bastante aproximación con un tren de engranajes de dientes: $200/20 \times 45/65 \times 66/91 \times 86/104$, que da una relación $1/4,15209050$, cuya diferencia respecto al valor requerido es de 0,00000056, equivalente a un error de un grado de arco en 5.000 años, aceptable a todos los propósitos.

Proyector de Sol

En el caso del proyector del Sol [Figura N1], el plato de la Tierra es similar al descrito, pero el plato del Sol queda

reducido a un punto central, es decir, tiene radio cero y no se mueve. La visual, en este caso se dirige siempre desde el pivote representativo de la Tierra hacia el punto central, del Sol.

La diapositiva para el caso del Sol es un círculo transparente a través del que pasa la luz y se proyecta en la cúpula. Además del disco, se suele simular el **halo solar**, mediante la difusión o dispersión de parte de la luz del disco en un halo alrededor de la imagen circular. El proyector solar tiene también un filtro de color variable que simula los distintos colores que adopta el Sol según su altura sobre el horizonte, desde blanco, pasando por amarillo, anaranjado y rojo cuando está ya poniéndose. También proyecta un punto de luz difusa en la dirección opuesta al Sol, que se llama **anti-Sol**,

Figura N. Proyectores de Sol, Luna y Saturno

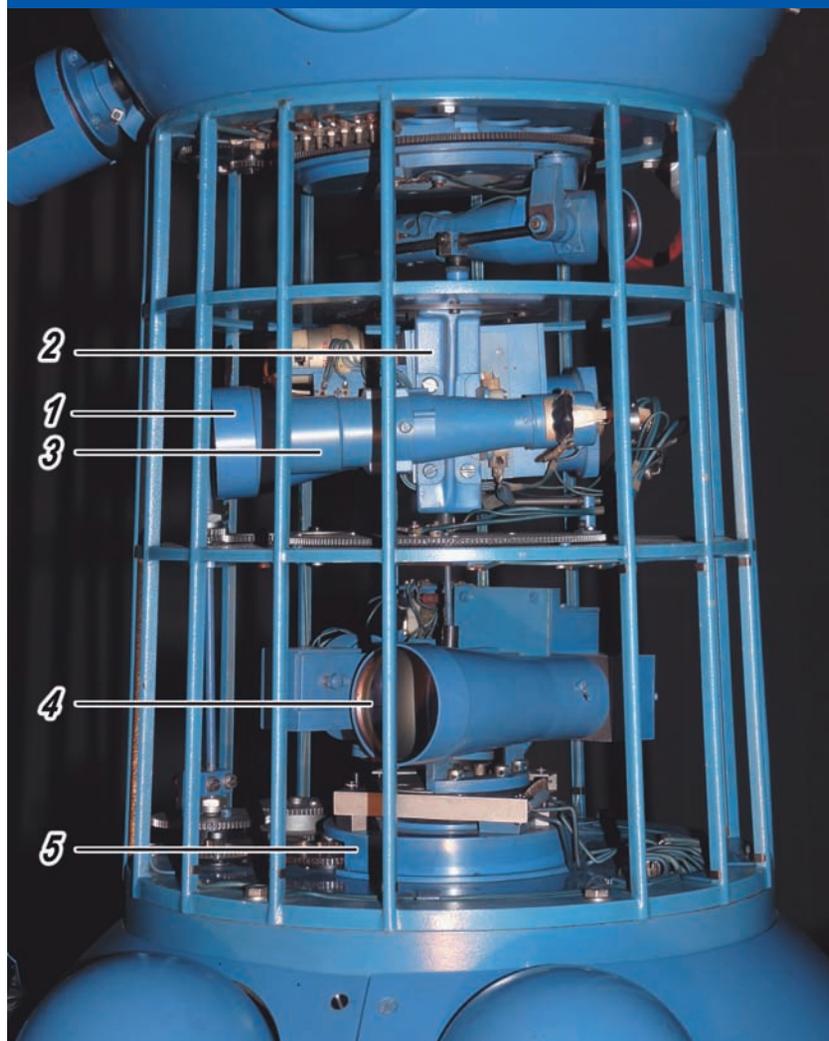
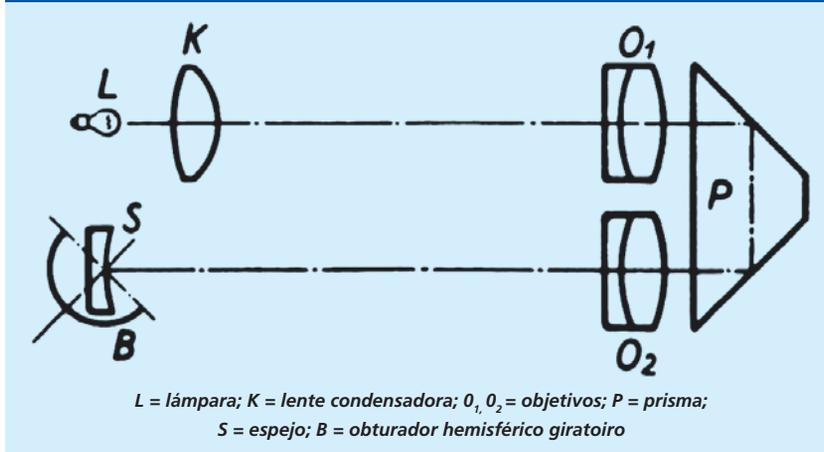


Figura O. Sistema de proyección de fases lunares



útil para la explicación de los crepúsculos civil, náutico y astronómico, mediante unos círculos paralelos auxiliares proyectados a 6° , 12° y 18° sobre el horizonte.

El mecanismo más complicado del proyector del Sol es el de **simulación de eclipses** [Figura N2]. Consta, en su construcción normal, de un disco con zonas circulares opacadas que simulan la esfera lunar. En ese disco rotatorio se han impreso las posiciones más típicas que puede adoptar la Luna, que al pasar por delante de la diapositiva del Sol, va opacando parte o la totalidad del Sol, produciendo los diferentes tipos de eclipses, parciales, anulares o totales. En este último caso, un proyector adicional [N3] produce una imagen superpuesta de la “corona solar”, sólo visible durante los eclipses totales de Sol, para explicar este fenómeno. La iluminación del proyector auxiliar de esta imagen está sincronizada mecánicamente con el punto máximo del eclipse total, y sólo proyecta la imagen de la corona durante la fase de totalidad.

Proyector de Luna

El proyector de la Luna, es diferente, puesto que no se trata de un planeta que gira alrededor del Sol, sino de nuestro satélite que orbita alrededor de la Tierra. En cualquier caso, el principio de funcionamiento es el mismo, proyectándose la imagen de la Luna según la línea visual Tierra-Luna, siendo en este caso el pivote que representa la Tierra el central, y el de la Luna el que

da vueltas a su alrededor [Figura N4].

Representar este movimiento de forma realista es complicado, puesto que hay que tener en cuenta que **la órbita de la Luna no es circular** sino que tiene una excentricidad de 0,055 en su órbita elíptica, que hace que su movimiento no siga la órbita con velocidad constante. Además, su órbita no está en la eclíptica exactamente, sino que **forma un ángulo de $5^\circ 9'$** con ella. El plano inclinado de esta órbita tiene además un movimiento de **retrogradación de nodos**, es decir, que gira respecto al plano de la eclíptica, haciendo que la línea de corte del plano de su órbita con el de la eclíptica, llamada **línea de nodos**, vaya retrocediendo, volviendo a su posición inicial al cabo de 18,6 años. En la práctica, este movimiento se reproduce haciendo girar todo el soporte del plato de la Luna [Figura N5], manteniendo su inclinación de $5^\circ 9'$, sobre el armazón, alrededor del eje de la eclíptica y que pasa por el punto central donde se ha colocado el eje o pivote que define la posición de la Tierra.

La Luna debe dar una vuelta en su órbita en 27,32 días, un **mes sidéreo**, pero la línea de nodos da una vuelta cada 18,61 años (250 veces más despacio), y ambos movimientos deben alimentarse a través del mismo piñón de arrastre. Aunque es mucho más lento, no puede prescindirse del movimiento de retrogradación de nodos porque explica y reproduce la **variación de las fechas de los eclipses de Sol y de Luna** con el paso del tiempo, su ocurrencia y el período de repetición cíclica de los mismos, o “**Saros**”.

El proyector de Luna cuenta además con un **disco de eclipses** similar al del Sol, con las diferencias lógicas de que la sombra terrestre proyectada sobre la Luna es mucho mayor y más difusa, en este caso.

Además, y quizá lo más importante, tiene que representar las distintas **fases de la Luna** según avanza en su órbita y en función de su posición relativa al Sol. El mecanismo **simulador de fases** de mejores resultados utiliza un obturador hemisférico [Figura O]. Se sustituye la diapositiva de la Luna por un espejo, en el que las marcas de la superficie de la Luna se han grabado en el vidrio del espejo, obteniendo distintas reflectividades. El haz de luz no atraviesa la diapositiva, sino que es proyectado sobre el espejo y reflejado por el mismo camino en que ha llegado, ya con las marcas de la superficie lunar en su imagen. El espejo va sujeto por dos soportes que siguen la dirección del diámetro Norte-Sur. El **obturador de fases** es una superficie semiesférica opaca, muy delgada y que gira alrededor de los soportes del espejo lunar. Haciendo girar esa semiesfera en su eje Norte-Sur se obtienen todas las formas posibles de las fases de la Luna de una forma continua. Cuando ese obturador hemisférico está exactamente detrás del espejo lunar, no interfiere en el camino de la luz y se proyecta la Luna Llena. Cuando está girado 180° más y tapa por completo el espejo, se reproduce la Luna Nueva. El movimiento de este espejo es de una vuelta cada 29,53 días, que es la medida del **mes sinódico**.

En conjunto, el proyector de Luna es el más complicado y voluminoso de todo el armazón de planetas.

Continuará en el próximo número:

En este artículo hemos explicado los componentes de un planetario y sus funciones. En el próximo describiremos cómo se consiguen reproducir sus movimientos. También hablaremos de los últimos desarrollos y del futuro de los planetarios ante el rápido cambio tecnológico. ■