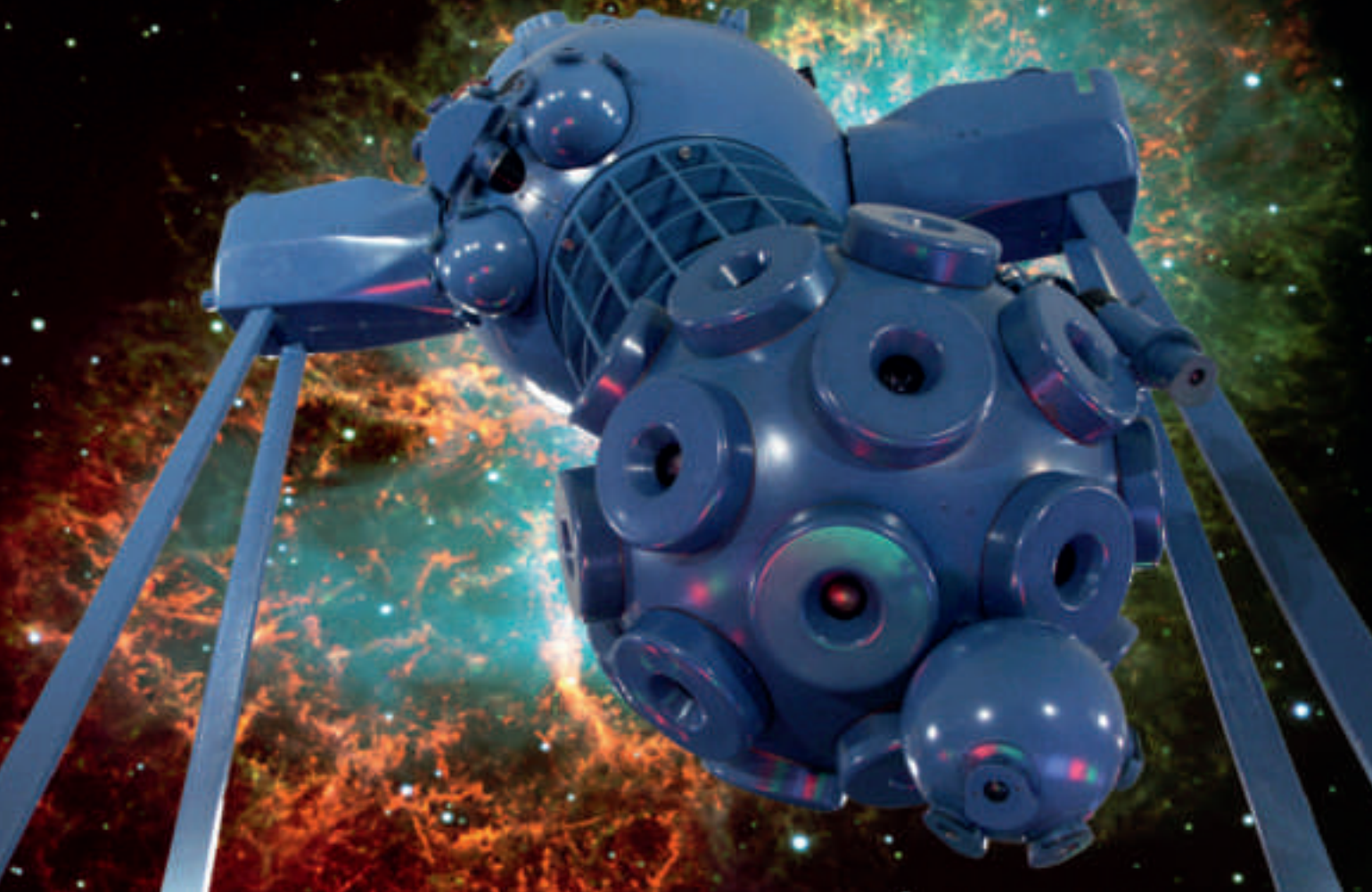




Los engranajes del cielo:

El planetario opto-mecánico, una joya de la mecánica en vías de extinción (II)



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). Divulgador de Astronomía.

En la primera parte del artículo explicábamos los componentes de un planetario y sus funciones. En éste describimos cómo consigue simular los movimientos del cielo. También hablamos de los últimos desarrollos y del futuro de los planetarios ante el rápido cambio tecnológico que han introducido las técnicas digitales.

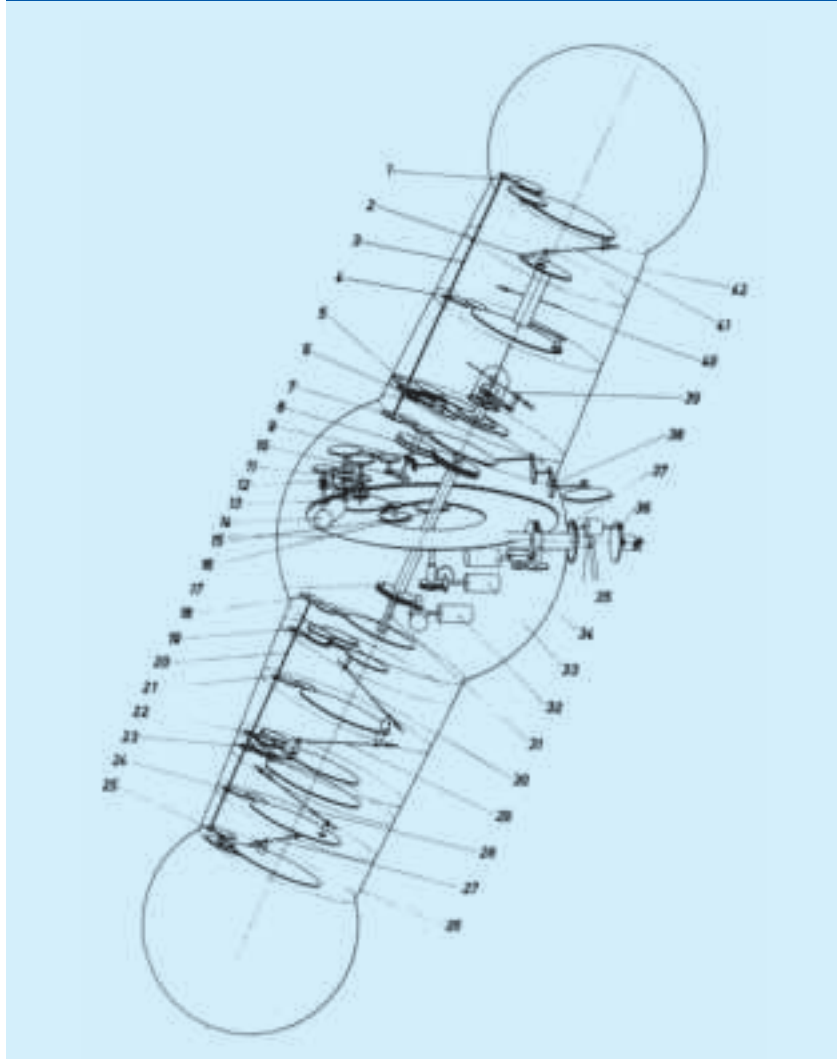
Los movimientos del planetario

El proyector de planetas y estrellas o “planetario” se divide en **subconjuntos constructivos** que se contienen unos a otros. Cada subconjunto es arrastrado por los subconjuntos de orden superior y se mueve según

el eje que le corresponde directamente y por los más externos a él, dotándole de todos los movimientos posibles, interconectados mecánicamente entre ellos. El movimiento de cada uno de ellos se origina en un **motor paso a paso**, y es suavizado por un pequeño volante de inercia y un amortiguador; a través de los reductores de engranajes correspondientes.

La simulación de los movimientos geocéntricos de los planetas, más que el de las estrellas, constituye el proceso más crítico y complicado. Ésa es la razón de que se haya dado el nombre “planetario” al proyector de estrellas y planetas.

Figura P. Cadena cinemática de un planetario opto-mecánico



Se define el plano fundamental constructivo como el **plano de la órbita de la Tierra o “eclíptica”**, que va a servir de base para todos los planetas. Perpendicularmente a ese plano se monta el eje de una estructura que soporta, mueve y protege al Sol, la Luna y los cinco planetas que pueden verse a simple vista, desde Mercurio a Saturno.

Movimiento anual

Los proyectores de planetas, Sol y Luna están contenidos en las estructuras cilíndricas aplanadas que componen los dos **armazones de planetas** [Figura P26, 42], que son arrastrados por el subconjunto central y representan el subconjunto más interno del proyector. Cada planeta es guiado por dos platos giratorios: uno que

representa la órbita del planeta, con su inclinación correspondiente y otro que representa el movimiento y la posición de la Tierra.

Esos platos son accionados por el **movimiento anual** que, además de su arrastre directo [P14, 10, 8], tiene una **conexión mecánica con el movimiento diario** [P15], con una reducción equivalente a 365/1. Es decir, al cabo de 365 vueltas del movimiento diario, el Sol habrá dado una vuelta completa a lo largo de la eclíptica. El movimiento anual es transmitido al Sol, la Luna y los planetas mediante dos **barras de distribución** [P3,20], una en cada armazón. Estas barras van atravesando las diferentes celdillas de planetas, y van transmitiendo movimiento a los dos platos de cada planeta a la vez, moviendo todos los componentes

del sistema solar con un sólo accionamiento [P1,2,4,5,6,19,21-25]. El paso de la transmisión del movimiento desde la estructura de planetas norte a la del sur se realiza mediante un **eje concéntrico e interior al de precesión** [P31], puesto que su posición espacial es la misma.

Conectado a esta transmisión hay también un **contador de año** [P38], cuyo número actualizado se proyecta sobre la cúpula para informar del momento representado.

Con este movimiento se simulan aceleradamente el movimiento del Sol, la Luna y los planetas sobre el cielo, a lo largo de los años. Permite explicar así, los bucles de la trayectoria aparente de Marte o las retrogradaciones de Venus y Mercurio sobre el fondo de estrellas.

Debido a la alta velocidad que requiere éste y los demás movimientos, los trenes de engranajes primarios deben ir en baño de aceite, en un cárter de suficiente capacidad para garantizar el engrase, la refrigeración y la estabilidad del propio aceite que debe ser renovado cada año, o cada 2.000 horas de funcionamiento.

Eje y movimiento de precesión

El eje más interno después del anual es el del **movimiento de precesión** [Figura P17], que corresponde además al eje de revolución del proyector central. Aunque es un movimiento menor, reproduce el cabeceo cónico del eje del planeta Tierra, tal como aparece proyectado sobre el cielo. Su movimiento es de una **revolución cada 25.600 años**, pero además de su conexión mediante engranajes al movimiento anual, también tiene un movimiento rápido independiente para simular la posición y el giro del eje celeste en otras épocas de la antigüedad o del futuro, pudiendo reproducir el cielo que veían civilizaciones antiguas como los egipcios o los griegos. Este movimiento arrastra los proyectores de estrellas y de planetas, así como todos los proyectores auxiliares que van ligados a ellos: constelaciones, proyectores de estrellas individuales como Sirio, de Vía Láctea, de polo galáctico, de círculo de precesión, etc.

Movimiento diario

El subconjunto que contiene inmediatamente al anterior es el del **movimiento diario** [P33] que se produce alrededor del **eje celeste** de cada época. En la nuestra, el **polo norte celeste** pasa cerca de la Estrella Polar, pero va variando según el movimiento de precesión, como ya se ha citado. En cualquier época, sin embargo, este eje siempre forma un **ángulo de $23,5^\circ$** con el de precesión y debe pasar exactamente por el mismo punto polar de la cúpula de proyección.

Para resolver el problema de los dos ejes, de precesión y diario, que deben cruzarse exactamente en el centro de la sala de proyección y del proyector, con un ángulo de $23,5^\circ$, se convierte el eje del movimiento diario en un **engranaje piñón-corona interior** [P16], que puede transmitir el movimiento a través del punto central sin ocupar físicamente el centro, dejando que lo atraviesen los ejes concéntricos de precesión y de anual.

El movimiento diario arrastra todos los proyectores auxiliares que hacen referencia a las estrellas y planetas y que deben girar solidarios con ellas, como constelaciones, ecuador celeste [Fig. R1], y los sistemas de referencia del sistema solar geocéntrico, como la eclíptica [R2], constelaciones del zodiaco [R3], contador de año [R4] o Sol medio [R5].

Movimiento de altura polar

La siguiente estructura que arrastra a la anterior es el eje de **altura polar**. Se trata de un eje horizontal [Fig. P35] que soporta toda la estructura central, y se apoya en dos puntos dotados de cojinetes y colectores de anillos rozantes con escobillas para transmitir la alimentación eléctrica. El conjunto lo mueve un motor independiente [P34] que queda en la parte interna móvil, que puede hacer bascular el planetario en un plano vertical para variar la altura del polo celeste, o altura polar. Así se puede simular el cielo y sus movimientos en distintas latitudes geográficas de la Tierra, en cualquier punto de los 180° de un meridiano, desde el polo norte terrestre al polo sur, incluido el ecuador. Este movi-



miento, junto con el de acimut, fue añadido para obtener un **proyector universal**, válido para todas las latitudes y orientaciones. Lleva adosado un **indicador de polo celeste** [P36] con un círculo graduado. Se acopla a este eje polar un sensor de ángulo que alimenta eléctricamente un servomotor para representar, en un proyector separado, el punto del mapa terrestre sobre el que nos situamos en cada momento.

Movimiento en acimut

Los brazos que soportan el eje anterior están fijos a una bancada o mesa circular que puede girar alrededor de un eje vertical llamado acimutal. Aunque no todos los planetarios están dotados de este movimiento, sí es muy útil porque permite situar los puntos cardinales en todas las orientaciones posibles a lo largo de los 360° de horizonte. En el Planetario de Madrid, este movimiento se consigue mediante la rodadura sobre una pista fija a la base o infraestructura del aparato, de tres rodillos de acero templado, separados 120° , capaces de soportar el peso total del conjunto móvil (casi una tonelada). Sobre uno de ellos se monta un embrague y un motor de arrastre paso a paso, con una desmultiplicación de un conjunto de engrana-

jes helicoidales de tipo tornillo-sin-fin/corona, que es suficiente, si se tiene en cuenta la desmultiplicación adicional debida a la relación de diámetros entre la rueda de arrastre, que es de 50 mm, a la de la pista de rodadura, 1.700 mm de diámetro.

Sobre este armazón de sustentación giratorio en acimut están colocados los proyectores **que deben estar dotados de movimiento acimutal, pero no de los demás**, como **Rosa de los Vientos**, y los proyectores de panorama y otros auxiliares, como **el meridiano**, **el punto y círculo acimutales** y **los círculos de límite de crepúsculo**.

Pocos grupos de proyectores quedan fuera de ese conjunto y de los arrastrados por él; por tanto no se ven afectados por ninguno de los movimientos anteriores, sino que están fijos a la infraestructura y son referencias fijas terrestres, como la **red acimutal**, un conjunto de líneas verticales (**meridianos locales**) y círculos horizontales (**almicantaras**), que son la base de las **coordenadas terrestres** locales de un lugar. Caso especial es el **círculo vertical**, que consiste en una línea que pasa por el centro de la cúpula que abarca 90° desde el cenit al horizonte, según un círculo máximo de la semiesfera de la cúpula. Puede girar alrededor del eje vertical cenit-nadir. Utilizado conjuntamente

con las líneas del **meridiano del lugar** y la línea del **meridiano celeste** forma el **triángulo náutico**, fundamental para la explicación del cálculo de posición por las estrellas, para la navegación o para cálculos astronómicos.

Trasmisión eléctrica a través de los ejes

Para llevar la alimentación eléctrica a todas las lámparas situadas en el cuerpo giratorio más interno es necesaria la transmisión de la corriente a través de **colectores de escobillas de bronce en anillos de rozamiento de cobre**, lo que complica mucho la construcción, puesto que tiene que transmitirse a través de todas las partes móviles de orden superior. Especialmente complicado es el cruce mencionado de los ejes de precesión y diario, que se resuelve dando preferencia a las escobillas de precesión y desplazando las del eje diario mediante un corto acodamiento.

El más voluminoso, por ser el primario, es el de acimut [Figura 5], con más de 80 contactos, ya que toda la alimentación eléctrica de los conjuntos móviles ha de pasar por él. Hay que tener en cuenta que por algunos de esos anillos rozantes y sus correspondientes escobillas tienen que pasar decenas de amperios para la alimentación de las dos lámparas de estrellas.

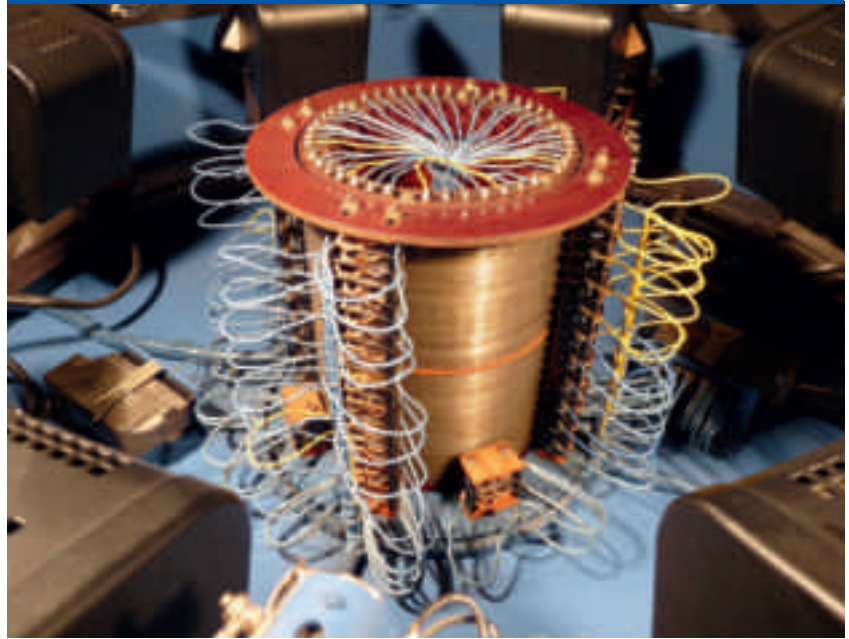
Control del proyector principal

El control de los planetarios es propio y específico para estos proyectores de estrellas y planetas, debido a lo especial de las características de cada sistema. En un pasado en que la automatización no era posible, el control y manejo de los planetarios era manual, mediante interruptores para las lámparas y reostatos, contactores y relés para los motores, con secuencias de activación que se debían realizar manualmente cada vez.

Los sistemas electromecánicos se han ido sustituyendo paulatinamente por actuadores electrónicos que disminuyen la complejidad, tamaño y consumo de los controles.

A partir de 1985 se empiezan a instalar **controles automatizados** por

Figura 5. Colector principal de acimut



ordenador, que permiten desde entonces reproducir programas de planetario pregrabados. Un ordenador se encarga de leer las instrucciones o comandos del programa y ejecutarlos en la secuencia y tiempos indicados. Son necesarios así convertidores digitales-analógicos para interpretar las órdenes, que llegan desde la CPU a través de los periféricos del ordenador y convertir esos datos en órdenes analógicas ejecutables por el proyector.

Mediante **convertidores analógico-digitales** e **interfaces de matriz** se interpretan las órdenes ejecutadas desde un tablero manual de mandos, en tiempo real, convirtiéndolas en datos digitales almacenables en una memoria, que luego puede ser volcada a disco, para poder ser reproducido más tarde.

El primer control por ordenador de un planetario de este tipo se instaló en el Planetario de Madrid, estando dotado de ciertas prestaciones que no han sido superadas por los modernos equipos de control de hoy día. El sistema consta de dos ordenadores. Uno de ellos (el ordenador principal) genera la información, bien sea interpretando las órdenes que llegan desde el tablero de mandos, o por lectura de las órdenes de un programa de planetario grabadas previamente en un disco.

Esto se hace simultáneamente, de tal manera que va intercalando los órdenes de uno y otro origen en orden secuencial, según el tiempo en el que fueron generadas. Así es posible grabar un programa, modificándolo luego en tiempo real a la vez que se reproduce, algo que no es común en los sistemas actuales que obligan al usuario a elegir entre un modo de funcionamiento manual o pregrabado, pero que no pueden superponerse ni permiten superponer secuencialmente unas instrucciones a otras.

El segundo ordenador, subordinado al anterior, recibe las instrucciones del primero y las ejecuta, coordinando todas las salidas a los distintos interfaces de aparatos, controladores y registros. Es el que envía las señales de control a los distintos interfaces de salida analógica, como motores paso a paso para los movimientos principales, mandos de triac para fuentes de luz, pequeños relés de motores auxiliares, controles por transistores para activación de pequeñas lámparas, etc.

Últimos desarrollos y nuevas tendencias

En los últimos tiempos se han ido aplicando nuevas tecnologías a la proyección en los planetarios, y recientemente, la migración de los métodos

analógicos de reproducción de imagen hacia las nuevas **técnicas digitales**, han acelerado este proceso en gran medida.

Planetarios opto-mecánicos actuales

En cuanto a proyectores opto-mecánicos de estrellas, se instalan actualmente **sistemas separados** para la proyección de estrellas y de planetas, realizándose la conexión entre ellos, que anteriormente era mecánica o electromecánica, mediante medios electrónicos o por software. Para las estrellas se utiliza una sola esfera, dividida en dos hemisferios [Figura T1], y con menos campos estelares, generalmente 12, aunque algunos modelos para cúpulas de gran tamaño siguen utilizando 32 campos. Las esferas de estrellas actuales tampoco utilizan tantos ejes como en los modelos mecánicos, sino que el ordenador de control compone cualquier movimiento necesario con los **tres ejes básicos** de que está dotada la esfera, cada uno con su accionamiento de motores paso a paso.

Los planetas son, en estos modelos, **proyectores individuales de dos ejes** [Fig. T2], controlados por un ordenador que se encarga de calcular en cada instante su posición, dependiendo de la orientación de la esfera de estrellas. Ése era también el método utilizado durante un tiempo para el Sol y la Luna, pero las obstrucciones en su proyección ocasionadas por la esfera de estrellas recomendaron volver a incluirlos en el cuerpo central, en los modelos más completos. La separación de los planetas del cuerpo central evita toda la complicada transmisión por engranajes a cada punto del proyector. Estos proyectores de planetas se montan a una distancia determinada del centro, compensando el ordenador de control la corrección debida a la paralaje en cada momento y son movidos por motores paso a paso, en dos ejes. Esos ejes controlan la posición del cuerpo celeste sobre la cúpula, sincronizando sus movimientos con los de la esfera de estrellas.

Muchos de estos sistemas separados suelen permitir hacer zoom sobre



los planetas y pueden representar no sólo los movimientos geocéntricos, sino los heliocéntricos e incluso **planetocéntricos**, hasta ahora imposible.

Sistemas avanzados de fibra óptica e iluminación

En los proyectores más recientes y avanzados, se utilizan además de las lentes condensadoras primarias [Figura U2], haces de **fibra óptica** para aprovechar mejor la iluminación de la fuente de luz [U1]. También se utilizan **sistemas homogeneizadores** para que todas las fibras tengan la misma iluminación [U3]. Esa luz es conducida por medio de las **fibras** [U4] hasta las perforaciones realizadas en una **máscara** [U5], similar a la placa de

estrellas o diapositiva del proyector clásico, consiguiendo así que toda la luz sea utilizada en el brillo de las estrellas.

Por otro lado, el uso de fibras ópticas para las distintas estrellas permite individualizarlas y utilizar **filtros de color** en cada una, que simulan el color real de cada estrella en el cielo. Esto no era posible en el sistema clásico de diapositiva perforada.

En esta construcción se añade, tras la placa de estrellas, una **lente de campo** [U6] para concentrar el haz de luz hacia el **objetivo** [U7], que proyecta las estrellas sobre la pantalla. La proyección mediante este método es de calidad sensiblemente superior a la de técnicas anteriores, obteniéndose



unas estrellas mucho más puntuales y realistas.

Este sistema tiene una **eficiencia** en la utilización del flujo luminoso producido por la fuente, unas **100 veces mayor** que la de los sistemas clásicos sin fibra óptica. Su mayor potencia lumínica permite además, una reducción del **índice de reflectividad de la pantalla de proyección**, que es conveniente para los otros medios de proyección (vídeo y diapositivas) con el fin de limitar la luz dispersa. Debido a esta mayor eficiencia se han podido reducir las potencias eléctricas de las lámparas a una **décima parte** de las utilizadas en planetarios clásicos, con el consiguiente ahorro en consumo y desahogo de todo el conjunto, en cuanto a calor emitido, contactos deslizantes y cableado eléctrico.

Además, la mayoría de los planetarios actuales incluyen ya fuentes de luz de gran eficiencia como **lámparas de descarga** de gas Xenón, especialmente en tamaños de cúpula de gama alta (de 18 a 30 metros de diámetro) y media (de 12 a 18 metros) aunque, debido a la menor potencia necesaria, algunos siguen utilizando lámparas halógenas para la gama media y la baja (de 3 a 12 metros de diámetro). El inconveniente de este tipo de lámparas es que no pueden apagarse ni encenderse rápidamente, por lo que hay que dejarlas siempre encendidas e instalar diafragmas individuales controlables por ordenador; en cada campo estelar.

Planetarios digitales y de síntesis de imagen

Desde hace años existen los llamados “**planetarios digitales**”, que inicialmente consistían en tubos de rayos catódicos de alta potencia que proyectaban puntos luminosos para representar las estrellas en sus posiciones correspondientes. Un programa vectorial de ordenador simulaba el movimiento del cielo con la deformación esférica adecuada y representaba a la vez gráficos simples. Los diámetros de las estrellas obtenidas por este sistema eran del orden de 35 minutos de arco, demasiado grandes para una simulación realista

del firmamento. La evolución de este método de proyección de cielo ha dado origen a los planetarios digitales actuales.

Los llamados **planetarios digitales actuales** prescinden totalmente del proyector opto-mecánico y de otros proyectores de imagen fija, aun a costa de una menor definición de la imagen. Representan las estrellas mediante varios proyectores de vídeo [Figura VI], integrando la imagen de cielo y las imágenes auxiliares de panorámicas y cúpula completa, en una única fuente de imagen. Esto tiene la ventaja de poder enmascarar zonas de estrellas para que no se superpongan a las imágenes de primer plano. El aspecto de las estrellas, aunque ha mejorado con el tiempo, no es tan definido ni tan brillante como en los proyectores opto-mecánicos, por lo que su aplicación tiene limitaciones.

Sin embargo sí se está generalizando este sistema, la **imagen de síntesis de vídeo**, para sustituir la imagen fija de diapositivas, utilizada hasta ahora. Para este cometido, así como para la proyección integrada alternativa de estrellas en este formato, se utilizan sistemas de proyección con 2, 4, 5 ó 6 proyectores CRT, DLP o nuevos proyectores de tecnología mixta LCOS, que consiguen altos contrastes, con **solapes degradados**, que proyectan

una **imagen única** dividida en las 2, 4, 5 ó 6 fracciones de imagen correspondientes. En este caso, el diámetro mínimo de las estrellas es de unos 10 ó 15 minutos de arco, aún insuficientemente pequeño.

Proyección láser y últimos desarrollos

Otro método diferente que ha surgido en los últimos años (desde 2002) consiste en la proyección por **haz de láser** combinado [Figura X]. El haz se **modula en color** mediante mezcla de 3 láseres de gas de diferentes colores y se colima en un haz finísimo que, mediante las lentes adecuadas y espejos de barrido, cubren la cúpula con

Figura X. Cabezal de proyección láser Zulip



Figura V. Planetario digital



varios de estos proyectores, con solapes suaves. La calidad y saturación de color, y el contraste son muy buenos en este tipo de proyectores. Se utilizan las mismas técnicas de segmentación a 5 ó 6 proyectores con solapes degradados, con una fuente digital de imagen común. No obstante este sistema es muy complicado en cuanto a equipo, mantenimiento, costes y servidumbres de espacio, calor generado y de ruido.

Otra alternativa a éstas, también reciente (año 2005), son los **láseres de estado sólido**, que necesitan bastante menos potencia luminosa (de 3 a 10 vatios), por ser láseres de onda continua, pero tienen menos contraste y mayor brillo de fondo oscuro, sobre todo debido a su sistema de barrido de estado sólido, pero que tienen ventajas económicas y técnicas, sobre todo en cuanto a mantenimiento y espacio, que pueden compensar su uso. Éste método puede utilizar un sólo proyector central (evitando los problemas de solapes) o dos perimetrales con solape degradado a lo largo de un meridiano.

También recientemente, desde 2005, se están aplicando métodos de reproducción de **cine digital** de calidad "QXGA broadcast" a los planetarios y se han desarrollado sistemas que utilizan 2 proyectores de cine digital, con unión degradada a lo largo de un meridiano y con ópticas de corta focal, especiales para planetarios. Estos proyectores, de tecnología **LCOS**, tienen una fuente de luz de Xenón, con una luminosidad de hasta 10.000 lúmenes, con una relación de contraste de 1.800/1 y **resoluciones de 4.000 x 4.000 píxeles** para la cúpula completa, con mejores resultados, sobre todo en cuanto a diámetro mínimo de estrellas, que puede reducirse a unos 5 minutos de arco.

Un sistema de última generación, aparecido en 2008, utiliza **proyectores DLP especiales de alto contraste**, incorporándoles ruedas de 6 filtros, de los tres colores fundamentales (RGB) y sus complementarios (CMY), para mejorar el espacio de color. Esta rueda se sincroniza con un único "chip" de imagen

Figura Z. Fotograma de video de cúpula completa



blanca, de tal modo que va emitiendo la información de color correspondiente al filtro que está frente al objetivo en cada momento. Además de mejorar la respuesta de color, se consiguen así **contrastes hasta ahora inalcanzables de 1.000.000/1**, en estos sistemas DLP de alto contraste como el VELVET, desarrollado por la casa ZEISS en colaboración con Texas-Instruments.

Se espera que en un futuro, ésta, junto con la adaptación de los proyectores de cine digital, así como las pantallas activas que empiezan a aplicarse a grandes superficies, sean las tecnologías que se apliquen con mayor probabilidad en los planetarios.

Conclusión

La migración de sistemas de imagen fotoquímica a digital ha obligado a utilizar proyectores de vídeo que los sustituyen. Esto a su vez ha permitido presentar toda la cúpula del cielo como una única imagen de vídeo en movimiento, ganando en espectacularidad, convirtiendo la imagen fija de cúpula completa en una imagen global en movimiento mucho más efectiva y envolvente [Figura Z].

Otro aliciente de la digitalización es que, aunque existen diferentes tipos de "software" dependiendo de cada fabricante, se está imponiendo cierta estandarización de archivos gráficos

para el intercambio de imágenes y el hecho de poder compartir recursos, dados los mayores costes de producción que necesitan estos sistemas.

Sin embargo, en ningún caso, en la imagen de síntesis de vídeo actual se sobrepasan las resoluciones de 4.000 x 4.000 píxeles para toda la cúpula, cuando mediante imagen fija se conseguían valores entre dos y cinco veces mayores. Es de esperar que el desarrollo futuro de esta tecnología, especialmente la de los proyectores de cine digital, láser de estado sólido o DLP de alto contraste, puedan en unos pocos años llegar a **resoluciones de 8.000 x 8.000 píxeles** que ya serían suficientes para proyectar también imagen fija.

Aunque estos sistemas se empleen, con gran ventaja, como complemento de imagen envolvente, hay que advertir que la proyección digital del cielo estrellado no podrá superar a medio plazo, la definición, brillo y contraste de los planetarios de proyección óptica de última generación, que han conseguido simular el cielo de una forma completamente realista.

En cualquier caso, los planetarios clásicos son en sí verdaderas joyas de la opto-mecánica, mereciendo un lugar de honor en la historia de la ingeniería, y son todavía insuperables en cuanto a técnicas de simulación y proyección del cielo estrellado. ■