

LAS NEBULOSAS PLANETARIAS

Por el Dr. Roberto H. Méndez

Basado en la conferencia dictada en nuestra Asociación el 26/11/88. Los originales de la presente versión han sido corregidos por el autor.

Cuando alrededor de 1760 Charles Messier comenzó a catalogar "objetos susceptibles de ser confundidos con cometas", mezcló, como en la vidriera de los cambalaches, toda clase de cosas: cúmulos abiertos, globulares, galaxias elípticas y espirales, regiones HII y algunas nebulosas planetarias también.

Durante mucho tiempo los astrónomos se preguntaron qué eran esas nubes luminosas no estelares; algunos creían que eran acumulaciones de estrellas tan lejanas y tan juntas que no se podían ver como estrellas individuales. Herschel estaba entre los que pensaban que se trataba de algún tipo de "fluido luminoso", cuya naturaleza no podía precisar. Tuvieron que pasar casi cien años, desde fines del siglo XVIII hasta casi fines del XIX para verificar, como suele ocurrir, que ambas partes tenían algo de razón; algunas nubes estaban formadas por estrellas, y otras no. En particular, las NP no son estrellas. Tampoco tienen nada que ver con los planetas; el nombre pintoresco que tienen puede inducir a confusiones.

El espectroscopio fué una herramienta fundamental para comprender qué son las NP. Cuando apuntamos un telescopio provisto de un espectroscopio hacia una estrella, lo que vemos es un espectro continuo, o sea que hay luz en todos los colores del espectro, interrumpido a veces por líneas de absorción, zonas del espectro donde hay menos luz; pero como ya lo verificó Huggins en 1864, al apuntar un espectroscopio a una nebulosa planetaria no aparece un espectro continuo, sino unas pocas líneas brillantes y nada más, lo cual es una evidencia de que las NP no son cúmulos de estrellas, sino un "fluido luminoso", o, como decimos ahora, un gas ionizado (usualmente hablamos de "líneas" en los espectros, debido a que los espectroscopios están provistos de una ranura; si en el caso de las NP usamos un espectroscopio sin ranura, lo que se obtienen son múltiples imágenes de la nebulosa, una para cada línea).

Varias de las líneas ya fueron identificadas entonces, como correspondientes al hidrógeno, pero había otras muy intensas que no parecían pertenecer a nada conocido, por lo que se las atribuyó a un elemento propio de las nebulosas, al que se bautizó "Nebulio". Esto fué así hasta 1927, en que Bowen verificó que se trata de elementos comunes en la Tierra, pero que en las muy especiales condiciones físicas que imperan en las nebulosas, se comportan de manera muy diferente que en el laboratorio. En particular, se hacen muy intensas ciertas líneas que en condiciones "normales" son muy improbables, por lo que han recibido el no muy feliz nombre de **prohibidas**. Esto ocurre cuando la densidad de materia es muy baja (el caso de las nebulosas precisamente, donde dicha densidad es más baja que en el mejor vacío que se pueda obtener en un laboratorio).

La Fig. 1 nos muestra un ejemplo típico de NP. Siempre se encuentra una estrella en el centro, y presenta además una simetría muy agradable, que hace pensar que ese material

luminoso se ha originado en la estrella y que ésta lo lanzó alguna vez al espacio.

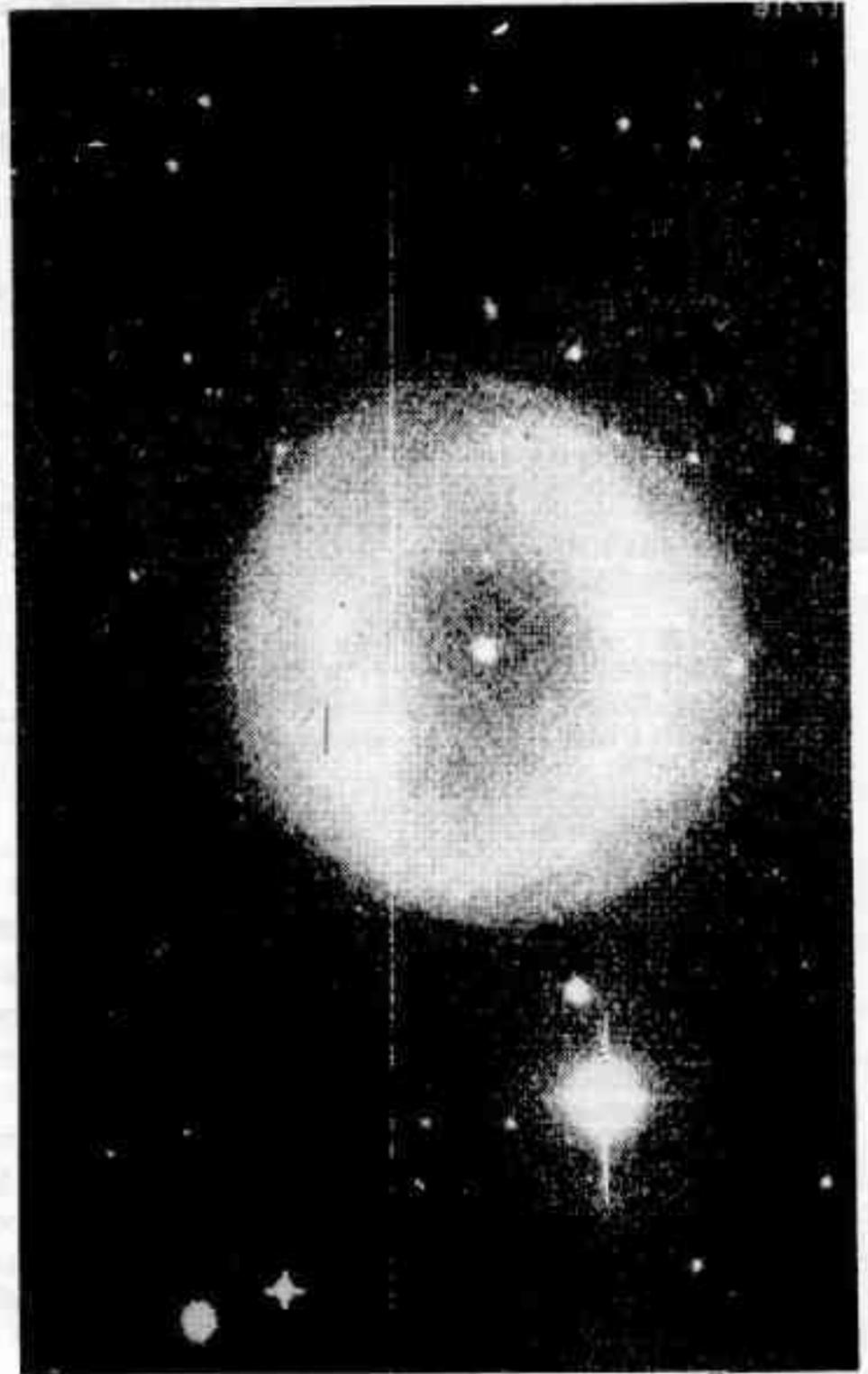


Fig. 1: La NP IC 5148-50. Diámetro aparente 2'. El N está arriba. Tomada por el autor en Noviembre de 1988 con el telescopio de 3,6 m del ESO en La Silla, Chile, usando el EPOSC (ESO Point Object Spectrograph and Camera)

Pero, ¿cuál es el proceso físico que hace brillar a las NP?. Podría pensarse que simplemente la estrella la ilumina, y que lo que vemos es luz de la estrella dispersada por las partículas de la nebulosa, pero hay dos problemas: muy a menudo la nebulosa es más brillante que la estrella, y además el espectro de la nebulosa debería ser el mismo de la estrella. Pero examinando las estrellas centrales con más cuidado, se vió que su temperatura era muy elevada, lo que implica una gran emisión en el ultravioleta; lo que debe ocurrir es que la nebulosa transforma la radiación UV en visible, y como la

estrella emite más en el UV que en el visible, la nebulosa resulta ser más brillante que la estrella. Pero, ¿cómo hace eso la nebulosa?

En la década del 20 se comprendió el mecanismo físico fundamental; la radiación UV, de muy corta longitud de onda, tiene suficiente energía para ionizar los átomos del H, quitándoles un electrón (fotoionización), el que al recombinarse con otro átomo ionizado, va cayendo a estados de menor energía, y cada vez que ello ocurre se emite luz.

Las líneas "prohibidas" se producen mediante choques de los electrones, mientras están libres, con átomos o iones de otros elementos, y deben considerarse como un subproducto del proceso fundamental (la fotoionización).

A lo largo de los últimos sesenta años se ha avanzado mucho en el conocimiento de los procesos físicos que tienen lugar en las nubes de gas ionizado, y también en el conocimiento de las propiedades de las partículas que componen a estas nubes. Eso nos permite, por ejemplo, calcular las composiciones químicas.

El elemento más abundante después del H es el He, y luego siguen C, N, O, Ne... Resulta que la composición química es muy similar a la de cualquier estrella, como nuestro Sol. De manera que el espectro tan particular de las NP se debe exclusivamente a las condiciones físicas que reinan en ellas.

Todavía nos falta saber cómo se originó la NP, cómo fué que esa nube de gas se desprendió de la estrella. A partir de la década del 30 se comenzó a trabajar en este problema, dentro del más general de la evolución de las estrellas. Pero para comprender el fenómeno necesitamos más información.

Entre otras cosas, es importante conocer su frecuencia de aparición; en la actualidad conocemos de 1.000 a 1.500 NP. Como nos hallamos en el seno de nuestra Galaxia espiral, su estructura nos es difícil de apreciar, pero se estima que contiene unas 100.000.000.000 estrellas. Si sólo hay 1.000 a 1.500 NP, se podría pensar que se trata de un fenómeno bastante infrecuente; pero hay que tener cuidado. En primer lugar, debe haber muchas más NP que no vemos porque estamos metidos en el plano de la Galaxia, donde hay mucho material absorbente, polvo oscuro que no nos deja ver lo que hay en ciertas direcciones.

Haciendo estimaciones de la distancia a que se hallan las NP conocidas (un problema muy difícil de resolver satisfactoriamente), más o menos se puede estimar el número total de NP de la Galaxia en alrededor de 5.000 a 10.000. Sigue siendo todavía un número bastante pequeño. Pero en segundo lugar, el análisis espectral viene en nuestro auxilio para mostrarnos que las NP se expanden: en espectros tomados con suficiente resolución se observa que cada línea espectral está desdoblada por el efecto Doppler, o sea que parte del gas se acerca y parte se aleja. De la medición de la separación de las líneas se deduce que esta velocidad de expansión, muy variable de un objeto a otro, es en promedio de 20 Km/seg. Por otro lado, de la estimación de las distancias se deduce que las mayores NP tienen un diámetro de algo menos de un parsec, o sea unos 3 años-luz.

Toda esta información es muy interesante porque nos permite deducir cuánto dura una NP; transformando los Km/seg a parsec/año, resulta que una NP se expande a razón de 1 parsec en 50.000 años, o sea que en pocas decenas de miles de años las NP se disipan y ya no las podemos ver más, lo que

representa una vida muy corta (una estrella como el Sol dura 10.000.000.000 años). Entonces, muchas estrellas pasan por la etapa de nebulosa planetaria, pero esta es muy fugaz, y por esa razón vemos tan pocas.

Aún antes de que se desentrañara el misterio de la evolución estelar, se tenían algunas pistas sobre el momento de la vida de la estrella en que se produce el fenómeno de NP: las estrellas centrales son pequeñas y muy calientes, muy parecidas a las enanas blancas, lo que es un indicio de que se trata de estrellas en camino de convertirse en enanas blancas; luego queda la enana blanca y el gas se disipa.

¿Quiénes son los antecesores directos, qué estrellas generan las NP? Ocurre que el gas se expande a una velocidad muy baja, y hay motivos para pensar que esa velocidad es del orden de la velocidad de escape de la estrella que lanzó el gas. La fórmula de la velocidad de escape es:

$$V_E^2 = 2 * G * M / R$$

Cuanto menor es el diámetro de la estrella, mayor es la V_E , y resulta así que la de nuestro Sol es de 600 Km/seg. Como la velocidad de expansión de la NP es tan pequeña, debe haber salido de una estrella muy grande y poco densa, tal como una gigante roja.

La NP más cercana que conocemos es la que se conoce como "La Hélice", debido a la forma de resorte que presenta, cuyo significado físico desconocemos; se halla a unos 200 parsec de nosotros. Sería interesante tener una NP más próxima para poder estudiarla mejor; pero hemos tenido mala suerte, y hay que conformarse.

Desentrañar el problema de la evolución estelar llevó alrededor de cincuenta años, y todavía quedan puntos oscuros, pero ya se entiende un concepto fundamental: la vida de una estrella es una lucha permanente en contra de la atracción gravitatoria. Las partículas que componen la estrella se atraen mutuamente y tienden a concentrarse, y si no hubiera nada que se opusiera a esa fuerza, toda la materia quedaría apilada en una muy pequeña región del espacio. Al comienzo de la vida de la estrella, las partículas están en una gran nube difusa, que comienza a contraerse por gravedad; ellas van cayendo hacia el centro, y a medida que pasa el tiempo, la densidad y la temperatura en el centro aumentan, hasta el momento en que ambas son tan altas que comienzan las trasmutaciones nucleares, transformándose H en He y generándose suficiente energía como para crear una presión desde dentro hacia afuera que detiene la contracción. La estrella queda sometida a dos fuerzas que se equilibran: por un lado el peso de la materia que la compone, al que se opone, por el otro lado, la presión de la radiación sumada al choque de las partículas (función de la temperatura) y que ejercen una fuerza hacia afuera; la estrella adquiere un estado de equilibrio, y mientras le dure el "combustible" no va a sufrir mayores modificaciones. En este instante, la estrella se ubica en la secuencia principal del "Diagrama Color-Magnitud".

En la Fig. 2 vemos uno de tales diagramas. La abscisa es el color de la estrella, que nos da información sobre su temperatura superficial, y la ordenada el brillo, que es un índice de la energía que la estrella emite en la unidad de tiempo (ubicando todas las estrellas a la misma distancia). La mayoría de las estrellas (incluido el Sol) se halla sobre la secuencia

principal; el Sol; mientras la estrella transforma H en He en su interior permanecerá allí, con temperatura y luminosidad más o menos constante.

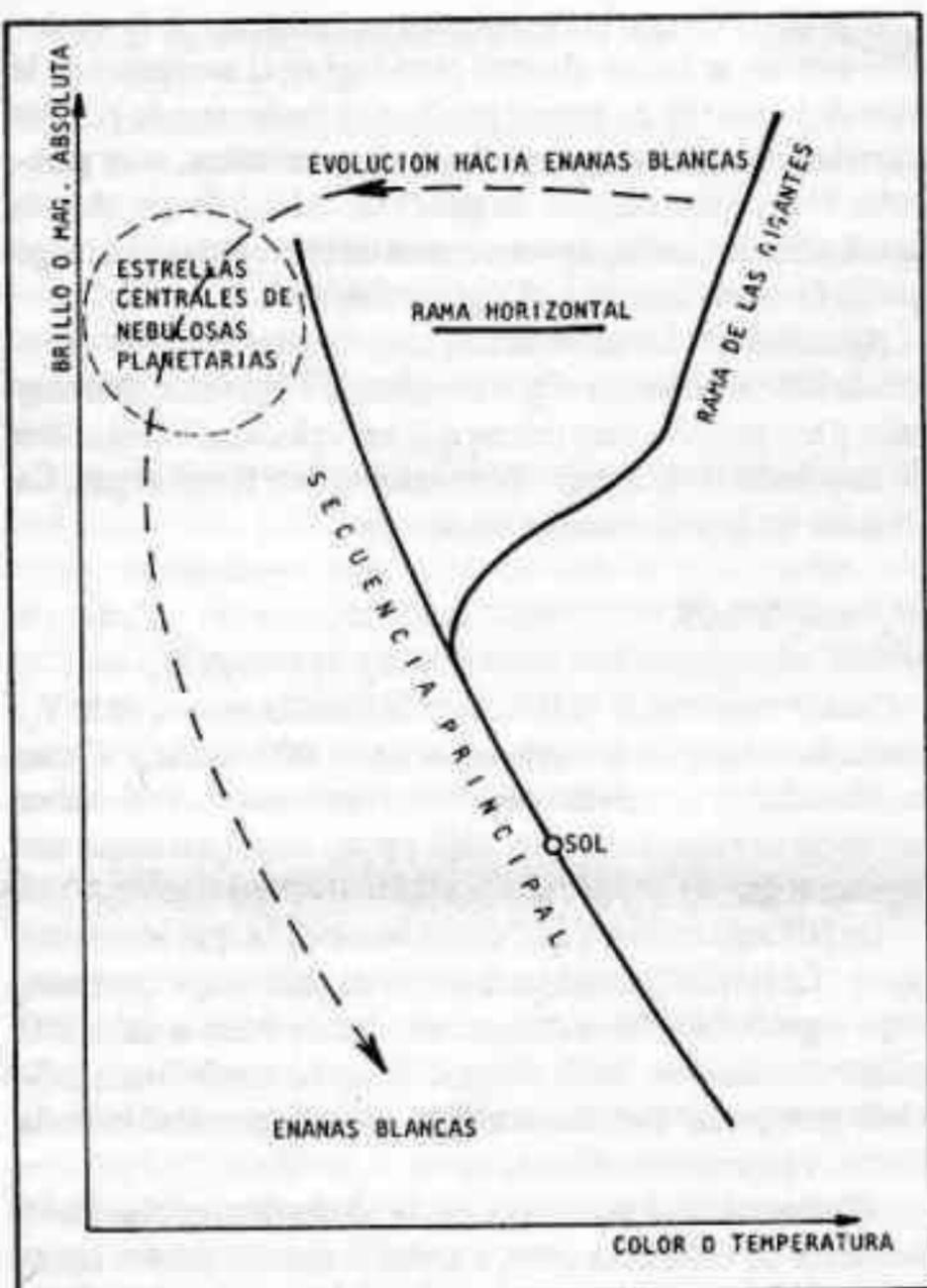


Fig. 2: Diagrama de Hertzsprung-Russell indicando el sentido de la evolución de las estrellas centrales de las NP.

Al acabarse el H, el centro es ya todo He y el núcleo ya no genera energía, de manera que desaparece la fuerza que contrarrestaba el peso de las capas superiores, con lo que la parte central de la estrella comienza a contraerse de nuevo, mientras que la parte exterior se hincha aumentando de tamaño enormemente y disminuyendo su temperatura, con lo que la estrella se aparta de la secuencia principal; por ejemplo, una estrella que tenía una temperatura superficial de 10.000° pasa a tener 3.000° . La luminosidad no disminuye, porque si bien se redujo la temperatura en cambio aumentó el tamaño, con lo que se incrementó el área irradiante.

La gigante roja con núcleo de helio es una estrella grande y fría; ¿será entonces posiblemente el origen de las NP? La respuesta es no. Al derrumbarse el núcleo sobre sí mismo se produce un gran aumento de temperatura, hasta el punto en que el He comienza a trasmutarse en C, y la estrella se ubica sobre la rama horizontal del diagrama de la Fig. 2.

Cuando queda un núcleo de C se repite la historia y otra vez se dan las condiciones que producen el agigantamiento de la estrella, dirigiéndose nuevamente a la región de alta luminosidad y baja temperatura. La estructura interna de la estrella se asemeja a una cebolla, con dos capas que generan energía cerca del núcleo, una más externa, donde se trasmuta H en He, y una más interna donde el He se trasmuta en C. El núcleo de C es inerte; si la estrella tuviera más de 8 masas solares, podría

trasmutar también el C, pero estrellas de esa masa son poco comunes, y no las consideraremos aquí.

Antes de continuar, conviene comentar dos cosas. Primero, puede parecer contradictorio que, como consecuencia de la acción incesante de la atracción gravitatoria, la estrella se agrande. Pero debemos aclarar que la densidad de la envoltura exterior de la estrella disminuye continuamente, de tal modo que cada vez hay menos masa lejos del centro; en efecto, la concentración del material hacia el centro de la estrella crece continuamente, y el aumento transitorio del tamaño de la estrella es un efecto que podríamos calificar como "cosmético". Inclusive, como diremos más adelante, una parte de la envoltura se va perdiendo en el espacio interestelar, mientras el grueso de la estrella continúa contrayéndose.

Por otra parte, también conviene aclarar por qué el núcleo de la estrella, que ahora está compuesto de material inerte, principalmente C, no continúa contrayéndose. Lo que ocurre es que la densidad del material en el núcleo ha crecido tanto que aparece un fenómeno cuántico conocido como "degeneración del gas". Los electrones oponen cierta resistencia adicional a que los sigan oprimiendo, y eso basta, en el caso de las estrellas no muy masivas que estamos considerando, para detener la contracción.

Hay que destacar que las enanas blancas están hechas de gas degenerado. Quiere decir que, en resumen, una gigante roja no es otra cosa que una enana blanca enmascarada por una envoltura muy tenue.

Todo lo que hemos contado hasta aquí puede verificarse estudiando los cúmulos galácticos, cada uno de los cuales contiene estrellas todas de la misma edad y a la misma distancia de nosotros, pero que individualmente se hallan en diferentes estados evolutivos debido a su diferente masa inicial. Comparando cúmulos distintos se obtienen diferentes diagramas dependiendo de la edad. En la Fig. 3 vemos superpuestos los diagramas de cúmulos de diferentes edades, los que han podido ser ordenados de una manera que concuerda muy bien con la teoría.

Es posible calcular el tiempo que le lleva a una estrella de determinada masa el recorrer su camino evolutivo, verificándose que las más masivas abandonan la secuencia principal antes que las menos masivas. El resultado, es que los cúmulos más jóvenes son los que poseen una secuencia principal más larga, mientras que los más antiguos tienen gran número de estrellas transformadas en gigantes rojas, y algunas de ellas se han ubicado en la rama horizontal, o sea que están "quemando" He en sus núcleos, y otras han salido ya de la rama horizontal, volviendo a la zona de las gigantes rojas. A estas últimas estrellas les sucede algo notable: están perdiendo masa. Nuestro Sol pierde masa con el viento solar, pero en una proporción insignificante, del orden de 10^{-14} masas solares al año; cuando una estrella llega a la zona de las gigantes por segunda vez, la pérdida de masa aumenta enormemente, hasta llegar un momento en que elimina totalmente su envoltura.

La NP debe formarse precisamente cuando la estrella termina de perder toda su envoltura; después de que ésta se ha separado, queda el núcleo degenerado, ya prácticamente una enana blanca. Es decir, que la NP debe producirse en las últimas etapas de la segunda visita a la rama de las gigantes.

Cuando la estrella ha arrojado toda su envoltura, ya no hay nada que pueda enmascarar las elevadas temperaturas centra-

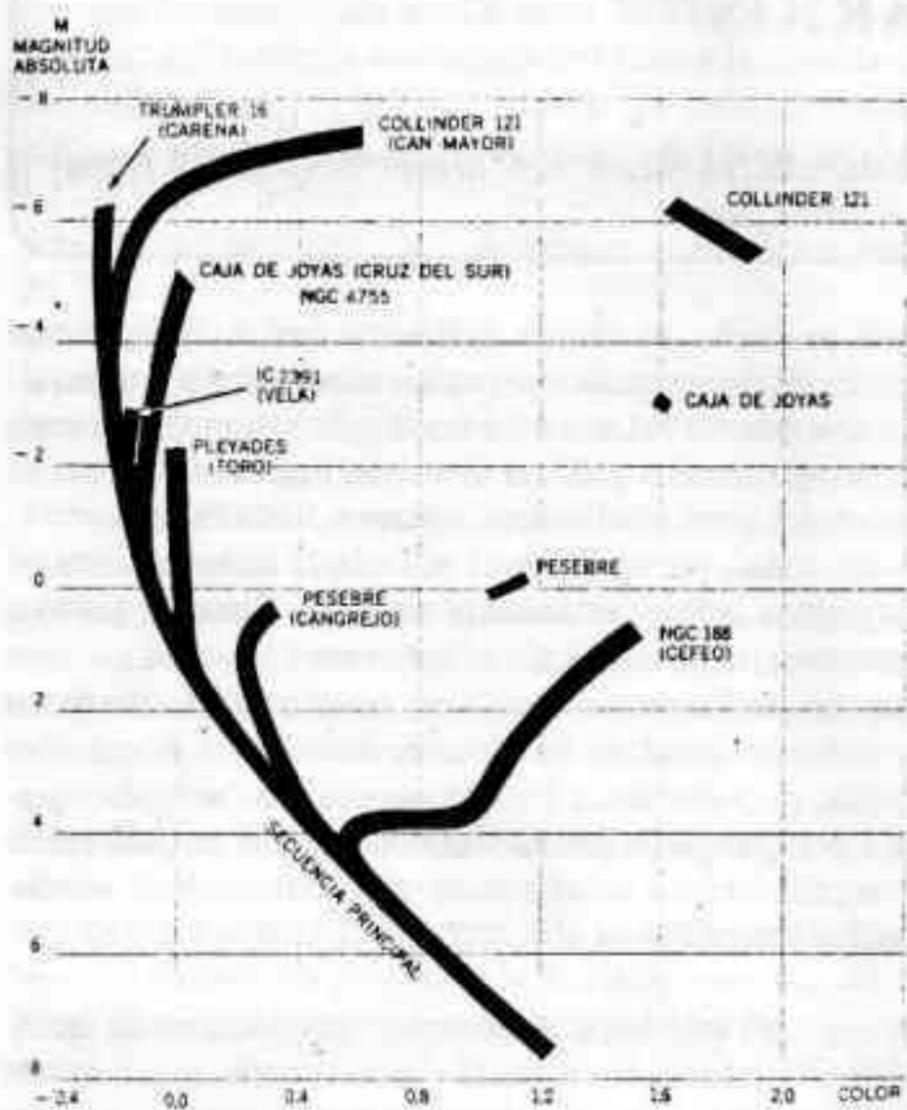


Fig. 3: Representación esquemática de varios cúmulos abiertos en un mismo diagrama HR.

les, y su temperatura superficial aumenta; llega a alcanzar los 30.000° y por consiguiente puede producir la fotoionización del gas que acaba de lanzar al espacio; una estrella azul muy brillante vuelve luminoso el material que la rodea, y en ese momento decimos que "nace" la NP.

El resto de la historia es que la temperatura superficial sigue creciendo (puede alcanzar más de 100.000°), hasta que se agotan las fuentes generadoras de energía. La estrella se ubica en la zona de las enanas blancas del diagrama, y se va enfriando muy lentamente. La NP ya se ha disipado en el medio interestelar.

La primera parte de esta historia está bien verificada por medio de los cúmulos, pero para poder constatar que todo concuerda es necesario colocar a las estrellas centrales de NP en el diagrama color-luminosidad, pero es difícil porque no hay ningún método suficientemente preciso para determinar la distancia de las NP individuales. Hasta hace poco, la concordancia entre teoría y observación dejaba bastante que desear. En los últimos cinco años se ha progresado bastante; hay mejores telescopios, equipados con detectores mucho más sensibles que los anteriores, y se han podido encontrar errores en algunas determinaciones de distancias; actualmen-

te hay mejor acuerdo entre teoría y observación. Sin embargo, queda mucho por aclarar, y los astrofísicos siguen trabajando en el tema.

Queda aún otro problema desde el punto de vista observacional. Ya sabemos que el estado anterior al de NP es el de gigante roja; normalmente las GR son variables, y las de largo período como Mira son un ejemplo típico de una estrella que está a punto de transformarse en NP. Pero nos gustaría cerrar la cadena con el eslabón que falta: un objeto que ya dejó de ser gigante pero todavía no es NP; sería una protoplanetaria, que en luz visible no es detectable, porque en el acto de emitir la envoltura, todo el gas que sale despedido hacia el espacio reduce su temperatura a tal grado que se condensa en forma de granos de polvo que son opacos al paso de la luz.

Hace pocos años se estudió el cielo en el infrarrojo por medio de un satélite (IRAS) que evaluó la zona del espectro que corresponde a temperaturas que van de los 100°K a los 1.000°K , que es la temperatura de dichos granos de polvo; en esa ocasión se detectaron muchas posibles protoplanetarias. Actualmente se las sigue estudiando, midiendo colores en el IR, aplicando técnicas que hasta ese momento no existían, para verificar si son efectivamente protoplanetarias.

Tal vez pueda referirme en una ocasión futura al tema de las estrellas centrales de las NP, que se merecen ser tratadas con más detalle.

Un último comentario: Ahora entendemos lo que le va a pasar al Sol. Suponemos que nació hace unos 5.000 millones de años, y que al mismo tiempo apareció la Tierra como un subproducto. Las partículas que componen nuestro planeta y a nosotros mismos estaban antes vagando por el espacio interestelar o formando parte de otras estrellas, hasta que fueron arrojadas al espacio (por ejemplo mediante una explosión de supernova) y siguieron viajando hasta que quedaron atrapadas por el proceso que dió lugar a la formación del Sol; desde entonces aquí estamos. Pero va a llegar un momento en que al Sol se le va acabar el combustible, lo cual se supone que ocurrirá dentro de otros 5.000 millones de años; cuando sea una gigante roja, su tamaño será comparable a la distancia que separa actualmente a la Tierra del Sol, y en ese momento la Tierra se va a evaporar. Ese va a ser el verdadero Fin del Mundo. En algún momento posterior el Sol va a desprenderse de lo que quede de su envoltura, siendo muy probable que se produzca una NP, y las partículas que estuvieron 10.000 millones de años atrapadas en el Sistema Solar podrán seguir viajando por el espacio interestelar, buscando seguramente nuevas aventuras.

Realmente en el contexto cósmico somos un fenómeno pasajero, pero por lo menos hemos aprendido lo suficiente como para saber lo que nos espera, y tenemos una responsabilidad de ahora en adelante: mantener la Tierra habitable, hasta que le llegue su fin natural.

LOS CALENDARIOS

1ª Parte

Por Miguel A. Di Paolo

El presente trabajo se hizo acreedor al Primer Premio en la categoría "no socios" del "Primer Congreso de Trabajos Astronómicos 1988". Dada su extensión, será publicado en varias partes.

INTRODUCCION

Se detallan a continuación los tipos de calendarios más importantes, creados por distintas civilizaciones a lo largo de la historia.

Todos los aquí descritos, basados en la observación de los astros, responden a esa primitiva necesidad del hombre por conocer el universo que lo rodea. Así ha sido y así seguirá siendo porque esa necesidad por saber forma parte de la naturaleza humana.

Esta historia del calendario que se pierde en el tiempo debió comenzar cuando algún hombre simplemente percibió que las salidas y puestas del Sol ocurrían en períodos más o menos regulares, luego debió darse cuenta de manera similar con respecto a la Luna y más tarde con respecto a las estrellas.

Estos períodos regularon las distintas actividades del hombre, especialmente las religiosas y las relacionadas con las estaciones como la siembra y la cosecha.

El siguiente trabajo no incluye todos los tipos de calendario sino sólo los de trascendencia en la historia pero principalmente el origen y evolución de nuestro actual Calendario Gregoriano en todos sus aspectos y su comparación con otros pares: Mayas, Chinos, Sumerios, Babilonios, Egipcios, etc.

EL CALENDARIO

Definiremos como calendario, en general, a cualquier sistema arbitrario de subdividir una escala temporal utilizada por la sociedad para medir consecutivamente el tiempo según las necesidades de la vida social, ya sea en su aspecto religioso, laboral o económico. El calendario, por consiguiente como todo sistema de medida del tiempo mediante escalas temporales sirve para fijar el instante de la escala en que ocurren los sucesos o acontecimientos de la vida social (aspecto cronológico), y para determinar, además, los intervalos de tiempo que separan los diversos acontecimientos (aspecto cronométrico).

De acuerdo a la definición precedente en todo calendario hay que distinguir dos elementos esenciales: una escala de tiempo, que es la base fundamental del calendario, y una dimensión o estructuración arbitraria de esa escala, que permite su aplicación práctica a la medida del tiempo en la vida social.

La escala básica para medir puede ser cualquiera,

pero de hecho se vienen utilizando casi exclusivamente escalas de tiempo definidas por los movimientos astronómicos aparentes de la Luna o del Sol. Según se utilice una escala de tiempo lunar o solar, o una combinación de ambos se obtienen calendarios lunares, solares o lunisulares.

Así, por ejemplo, el calendario árabe es lunar, el gregoriano solar y el israelita lunisolar. Pero los pueblos primitivos, tanto en la antigüedad como incluso en nuestros días, han utilizado el movimiento diverso de las estrellas, o la variación anual de las constelaciones en el firmamento visible, para establecer sus calendarios. Los antiguos egipcios, por ejemplo, regulaban su calendario por la aparición de la estrella Sirio en el horizonte matutino después de su conjunción con el Sol.

No solo la escala de tiempo empleada en un calendario es arbitraria, sino también la subdivisión más o menos artificiosa de esa escala, con tal que se adapte a las necesidades sociales.

Históricamente, sin embargo, se vienen utilizando en los calendarios casi sin excepción, escalas de tiempo subdivididas según ciclos astronómicos naturales, tales como el día solar, el mes lunar o el año trópico. Particularmente el día solar se emplea como unidad temporal en todos los calendarios relativamente desarrollados. Por esta razón, se suele definir comúnmente el calendario, con poca generalidad, como la dimensión del tiempo civil en días y años solares. Hay que tener presente, sin embargo, que junto a las unidades astronómicas naturales, como son el día, el mes y el año, se utilizan otros períodos y ciclos temporales artificiales, tales como las estaciones del año, la semana de siete días o la dimensión arbitraria del día en horas, minutos y segundos.

Una vez adoptadas las unidades y ciclos temporales en que se divide la escala de un calendario, las épocas de la escala en que ocurren los diferentes acontecimientos se expresan contando el número de subdivisiones desde su origen arbitrario hasta el instante en que ocurren los acontecimientos.

Es esencial por tanto, fijar un instante origen de la escala del calendario, llamada simplemente origen del calendario, para el cual se suele adoptar algún suceso histórico excepcional. Contando el tiempo en las divisiones del calendario, a partir de un origen arbitrario, se establece una era cronológica. Definiremos, pues, como era cronológica, la medida del tiempo mediante el calendario a partir de un origen determinado.

Así, por ejemplo, en la era Cristiana del Calendario Gregoriano, de uso casi universal hoy en día, los años se

empiezan a contar a partir del nacimiento de Jesucristo. La era cristiana fue establecida por Dionisio "el Exiguo" en el año 525 D.C. refiriendo el nacimiento de Cristo a la llamada era de Diocleciano. Hoy día parece probado, sin embargo, que sus cálculos no fueron correctos, de suerte que Cristo nació en realidad por lo menos cuatro años antes del comienzo de la era cristiana (en el año 749 de la fundación de Roma, en lugar de 753).

Es importante tener en cuenta, que los años de calendario se cuentan en la era cristiana a la manera de una escala sin cero. Es decir, la era cristiana comienza con el año 1 después de Cristo, denominándose el año precedente como el año 1 antes de Cristo. Por consiguiente, cualquier suceso ocurrido durante el primer año de la era cristiana, aunque sólo sea un día o un mes después de Cristo, se cuenta como ocurrido en el año 1 D.C., no llega a valer evidentemente un año, sino solamente una fracción del mismo. Por ejemplo, al mediodía del 2 de julio del año 1 D.C. habrían transcurrido 182,5 días desde el nacimiento de Cristo (según Dionisio "el Exiguo"), y el intervalo transcurrido era la mitad del primer año de la era cristiana, que expresado en decimales de año es 0,5. Análogamente siguiendo la sucesión continua de los años, en el instante correspondiente a la mitad del año 1900 de la era cristiana habrían transcurrido solamente 1899,5 años desde el nacimiento de Cristo.

En general, cuando se mide el tiempo de forma continua a partir del comienzo de la era cristiana, el intervalo de años realmente transcurrido es una unidad menos que el número ordinal del año calendario. Por esta razón, el primer siglo o intervalo de 100 años de la era cristiana terminó con el día 31 de diciembre del año 100 D.C., cuando habían transcurrido los primeros 100 años desde el 1 D.C., inclusive, y el siglo II comenzó con el 1 de enero del año 101 D.C. De forma similar, el siglo XX comenzó con el 1 de enero de 1901, y no del año 1900, y el siglo XXI comenzará en la misma fecha del año 2001. Esta forma poco lógica de numerar los años del calendario, considerando erróneamente el año 0 como no existente, resulta particularmente molesta cuando se trata de determinar intervalos de tiempo que comienzan antes de la era cristiana y terminan después de la misma. Así por ejemplo, el intervalo entre los años 50 A.C. y 50 D.C. no es de 100 años, sino únicamente de 99. Tales intervalos de tiempo, en general, resultan disminuidos en un año, lo que es necesario tener en cuenta al investigar acontecimientos históricos o fenómenos astronómicos de la antigüedad datados según la era cristiana. Para evitar esas dificultades cronológicas, los astrónomos colocan un año 0 antes del año 1 D.C. y cuentan los años positiva y negativamente a partir del comienzo del año 0, que se identifica con el año 1 D.C.

COMPUTO ASTRONÓMICO: -1 0 +1

ERA CRISTIANA : 2 a.c. 1 a.c. 1 d.c.

El año 50 A.C. por ejemplo, se designa astronómicamente -49 mientras que los años D.C. conservan en el conjunto astronómico el mismo número ordinal de la era cristiana del calendario. En general, pues, el año m A.C. se designa astro-

nómicamente $-m+1$, mientras que el año n D.C. se escribe $+n$. De esta forma, el instante correspondiente a la mitad del año 1900, por ejemplo, se designa correctamente 1900,5 según el cómputo astronómico, aunque hayan transcurrido sólo 1899,5 años según la era cristiana. Los siglos o períodos de 100 años, contados a partir del comienzo del año 0 en adelante, comienzan siempre en múltiplos de 100 en la cuenta astronómica de suerte que el siglo XX comenzó astronómicamente en enero de 0 del año 1900 y el siglo XXI comenzará en la misma fecha del año 2000. El sistema astronómico de numerar los años se extiende análogamente a los días del año y del mes, es decir, a la fecha del calendario. Según hemos visto anteriormente, se define la fecha de un suceso como el instante en que tiene lugar el suceso expresado en las subdivisiones auxiliares del calendario, tales como años, meses y días del mes.

Sin embargo, en la numeración de los días del año y del mes del calendario civil se omite el día 0, cometiéndose el mismo error matemático que en el cómputo de los años. Para subsanar ese error, y hacer posible el cálculo de intervalos de tiempo por diferencias de fechas, los astrónomos designan a veces como el día 0 del mes, el día anterior al 1 del mes. En la práctica, sin embargo, sólo la designación de enero 0 del comienzo astronómico del año se utiliza universalmente. Así, pues, el comienzo astronómico del año, designado enero 0, coincide con el día 31 de diciembre del año precedente.

Por ejemplo, el comienzo astronómico del año 1900 se escribe: 1900 enero 0 = 31 de diciembre de 1899, siendo la expresión de la derecha la fecha del calendario gregoriano según la era cristiana. Hay que tener cuidado de no confundir expresiones como la anterior con las expresiones del tipo 1900,0 que designan el comienzo del año ficticio de Bessel. Para precisar el instante exacto en que comienza un año, hay que referirla a una de las escalas de tiempo definidas en los apartados anteriores. Así por ejemplo, la expresión: 1900 enero 0 a 0h de TU, se puede utilizar para designar el comienzo astronómico del año 1900 de la escala de tiempo civil en Greenwich.

ORIGEN Y EVOLUCION DEL CALENDARIO

La historia del calendario es tan antigua como la civilización misma. Allí donde los hombres se agrupan en comunidades más o menos organizadas, aparece siempre un calendario que regula sus actividades religiosas, sus tareas agrícolas o las épocas de cacería. El hombre del paleolítico, hace 35.000 años dibujaba sobre piedra o tallaba en pedazos de madera trazos regulares que, según interpretan los arqueólogos modernos, indicaban los días transcurridos desde el plenilunio durante un mes lunar.

No menos sorprendentes son los monumentos megalíticos, tales como el de Stonehenge, Salisbury, Inglaterra, verdaderos observatorios astronómicos destinados a determinar salida y puesta de la Luna, durante los solsticios probablemente en conexión con cultos religiosos, que presuponen la existencia de un complejo calendario ligado al año

tropical hace ya más de treinta y cinco siglos. Tales calendarios prehistóricos, sin embargo, se han perdido en las brumas del pasado, tal vez para siempre, y hoy día solo se pueden reconstruir fragmentariamente a partir de muy escasos indicios. Hay que esperar la aparición de culturas ampliamente desarrolladas, como la de los sumerios, chinos o mayas, para encontrar calendarios de los que poseyamos noticias más detalladas.

Hace más de 5000 años, en las orillas del Eufrates y Tigris, los sumerios establecieron un elaborado calendario lunar, según sabemos por documentos babilónicos posteriores, adoptando la escala de tiempo determinada por las fases de la Luna. El mes lunar de 30 días, con cada día de 12 "horas", era el intervalo de tiempo comprendido entre dos Lunas llenas o lunación, y el año lunar de 360 días constaba de 12 meses lunares o lunaciones completas. En realidad, una lunación dura unos 29,5 días solares (más exactamente 29,530589 días en la época de 1900) y consiguientemente los meses lunares de 30 días del calendario sumerio se iba retrasando respecto a las fases de la Luna.

Por otra parte los sumerios, y sus sucesores los babilonios conocían ya el año solar, determinado por un ciclo completo del Sol a lo largo de las constelaciones zodiacales, cuya duración de unos 365,25 días resultaba inconmensurable con la del año y mes lunares.

Hacia el siglo VII A.C., los astrónomos de Babilonia habían determinado ya la duración del año trópico en 365,249 días solares, sirviéndose de la tabla de eclipses cuidadosamente registrados durante mucho tiempo. El notable desarrollo de la astronomía babilónica permitió determinar la relación entre el número de días del mes lunar y del año solar trópico, y hacia el año 500 A.C. se hizo el trascendental descubrimiento de que cada 19 años el ciclo de las fases lunares volvía a coincidir con el año solar. Puesto que 19 años solares son casi exactamente 325 lunaciones, mientras que 19 años lunares comprenden 228 lunaciones, basta añadir un mes a siete de los años del calendario, dentro de cada período de 19 años, para completar las 235 lunaciones y hacer coincidir de nuevo el calendario con los ciclos naturales de la Luna y el Sol.

Aparece así el primer sistema racional de corrección del calendario. Hasta el reino de los seléucidas (hacia el 312 A.C.), los años, que comenzaban en primavera con el mes Nisannu, no se numeraban en sucesión continua, sino que recibían nombres propios en conmemoración de acontecimientos importantes.

El influjo del calendario babilónico, que evolucionó como acabamos de ver de lunar a lunisolar, fue muy grande en la antigüedad. El calendario lunisolar de los hebreos, por ejemplo, se derivó con toda probabilidad del babilónico y sus años de 360 días se dividían también en 12 meses lunares, añadiéndose igualmente siete meses adicionales dentro de cada ciclo de 19 años. Se ignora, sin embargo, la norma seguida por los primitivos hebreos para efectuar la intercalación de meses y corregir así su calendario. Los meses eran alternati-

vamente de 29 y 30 días, de suerte que daban como promedio los 29,5 días de una lunación.

El calendario hebreo se caracteriza por la introducción de un nuevo elemento, la semana de siete días, que habría de desempeñar un papel importante en casi todos los calendarios cultos hasta nuestros días. El origen de la semana es un misterio no descifrado todavía. Mientras los otros intervalos de tiempo usuales en los calendarios -días, meses y años- se basan en períodos astronómicos de importancia para las actividades prácticas de la vida diaria, la semana aparece como un período artificial sin relación aparente con ningún fenómeno astronómico. Es posible, con todo, que estuviera inicialmente relacionada con el mes lunar, ya que siete días son aproximadamente un cuarto de lunación, el intervalo aproximado entre Luna llena y cuarto menguante, por ejemplo, o tal vez con el número de los siete astros principales del firmamento (los cinco planetas conocidos antiguamente más el Sol y la Luna). Pero es más probable que la elección de un intervalo de siete días se deba al carácter sagrado del número siete entre los judíos.

Sea como quiera, el ciclo semanal de siete días se propagó primero hasta el lejano Oriente y más tarde hacia el Occidente, encontrándose hoy prácticamente incorporado en todos los calendarios como ciclo regulador de las actividades laborales. Es importante destacar que la sucesión cíclica de los días de la semana se viene verificando sin interrupción desde su introducción en el calendario, con independencia del cómputo astronómico en días, meses y años. Desde la monarquía israelita, el año comienza en primavera, a partir de la huida de Egipto, los judíos establecieron la fiesta de la Pascua para conmemorar su liberación de los egipcios, fiesta que coincidía con el plenilunio más cercano al comienzo de la primavera. El comienzo del año se fijó entonces en el novilunio anterior a la Pascua. Hacia el año 338 D.C. el rabí Samuel reformó el calendario israelita, que adopta con pocas modificaciones su forma actual.

El año es lunisolar siendo necesario consiguientemente efectuar dos tipos de correcciones con objeto de adaptarlo por un lado al año solar trópico y por otro lado al ciclo de las lunaciones. En efecto el año común israelita consta de doce meses, que se ajustan aproximadamente a las lunaciones, dándoles una duración de 29 y 30 días alternativamente. Resulta así una duración aproximada del año común de 354 días, que difiere del año solar en 11 días. Para eliminar esa diferencia, se sigue utilizando todavía el ciclo babilónico de 19 años indicados más atrás, introduciendo un mes adicional los años 3, 6, 8, 11, 14, 17 y 19 de cada ciclo. Los años de 13 meses así obtenidos se llaman años embolísmicos, y su duración media es de 384 días.

Pero los 354 días de los años comunes y los 384 días de los embolísmicos tampoco forman un número exacto de lunaciones, siendo necesario añadir o restar ocasionalmente un día a esos años, para hacerlos coincidir con el ciclo de las lunaciones. Se obtienen así años comunes de 353, 354 o 355 días y años embolísmicos de 383, 384 o 385 días. Los años se cuentan en la llamada era de la Creación, para cuyo origen

se adopta la época 3.761 A.C. octubre 7.

El calendario chino es uno de los más antiguos conocidos, remontándose hasta casi el año 3000 A.C. Del primitivo calendario chino, sin embargo, se han conservado únicamente inscripciones muy fragmentarias en huesos y conchas, que indican la existencia de un ciclo de 60 días dividido en períodos de 10 días. Desde el año 2258 A.C. los chinos disponían ya, al parecer, de un calendario lunisolar con años lunares corregidos mediante el ciclo de 19 años, que habían descubierto los babilónios independientemente de ellos, de suerte que 12 años comunes contaban con 12 meses lunares y 7 años embolismos de 13. Los años comenzaban en el solsticio de invierno y se contaban a partir de la fundación del imperio en 2697 A.C. Es interesante observar que los chinos utilizaron también el año sidéreo cuya duración habían determinado ya con notable exactitud como de 365,2525 días en la época de los mongoles. La cronología china se complica de forma irritante a causa de los frecuentes cambios de calendario.

Bastaba la subida al trono de un nuevo Emperador, para cambiar el calendario. Entre los cambios principales cabe destacar la adopción de un calendario indio en el siglo VII, de un calendario árabe en el siglo XIII y en el siglo XVII, de un calendario calculado por los jesuitas.

En 1912, finalmente, los chinos adoptaron el calendario gregoriano utilizado corrientemente en nuestros días.

El pueblo maya de Centroamérica, cuya cultura se extendió por Guatemala, Honduras y México (Yucatán y Comperche), estableció el calendario más exacto de que se tiene noticia. Los mayas efectuaron sus cálculos, como los antiguos pueblos celtas y austrasiáticos, en el sistema de numeración de base 20.

Aunque desconocían los quebrados y decimales, los mayas se adelantaron a los indios y árabes en el trascendental descubrimiento del número 0, que utilizaron en sus cálculos. Su aritmética vigesimal, junto con sus observaciones astronómicas, hicieron posible el establecimiento de su notable calendario, que llegó a superar en ciertos aspectos al actual calendario gregoriano. Al parecer, el primitivo calendario maya era lunar, basado en la duración de las sucesivas lunaciones según la igualdad $405 \text{ lunaciones} = 11960 \text{ días solares}$ (códice maya de Dresden).

La igualdad anterior da un valor de 29,530864 días para una lunación, que supera en precisión a los valores obtenidos por otros pueblos de la antigüedad y se aproxima notablemente al valor de 29,530589 días admitido actualmente para la época 1900. El período de 11960 días, se puede dividir exactamente en 46 períodos de 260 días, que recibieron el nombre de Tzolkín y constituyeron los años religiosos o lunares utilizados para el culto, el establecimiento de efemérides astronómicas, la predicción de eclipses y las tareas agrícolas. Cada Tzolkín o año lunar de 260 días se dividía en 13 meses de 20 días. Los meses se numeraban del 1 al 13,

mientras que los 20 días del mes tenían nombres propios: Imix, Ik, Akbal, Kan, Chichan, Cimi, Manik, Lamat, Muluc, Oc, Chuen, Eb, Ben, Ix, Men, Cib, Caban, Eznab, Cauac y Ahau.

Así, por ejemplo, el día Ahau del cuarto mes se designaba 4 Ahau.

Pero ya en el siglo III A.C. los mayas habían descubierto que el cómputo lunar no guardaba relación con el ciclo de las estaciones, que se ajustaban en cambio al año solar. Consecuentemente, sin abandonar el uso del calendario lunar los mayas establecieron un calendario solar, que basaron primero en un año solar de 360 días denominado Tun, que dividían en 18 meses de 20 días. Pronto, sin embargo, añadieron un mes más de 5 días, con lo cual el nuevo año solar llamado haab constaba de 365 días divididos en 19 meses, los 18 primeros de 20 días y el último de 5. Al revés que en el calendario lunar, los días del mes del calendario solar se numeraban del 0 al 19, contándose el 1 como çael día 0, mientras que los meses se designaban con nombres propios: Pop, Uop, Zip, Zotz, Tzec, Xul, Yaxkin, Mol, Chen, Yax, Zac, Ceh, Mac, Kankin, Muan, Pax, Kayab, Chumu y finalmente Uayeb el mes de 5 días.

Así, por ejemplo, el día noveno del mes chumh se designaba en el calendario solar 8 chumhu. Los dos calendarios, lunar y solar, se utilizaban simultáneamente de forma que la coincidencia de una fecha determinada en ambos calendarios se volvía a repetir solamente al cabo de 18.980 días o 52 años solares haab, según la igualdad establecida por los mayas:

$$73 \times 260 = 52 \times 365 = 18.980.$$

De este modo, con el empleo simultáneo de los 2 calendarios, se podían datar los acontecimientos durante intervalos de muchos años. La cronología maya se contaba desde el año 3373 A.C., en que debió ocurrir algún acontecimiento histórico importante hoy desconocido, a partir de la fecha 4 aha 8 chumhu. Los años comenzaban teóricamente en el solsticio de invierno, aunque en la práctica el comienzo del año se iba separando paulatinamente del solsticio, debido a la distinta duración del haab de 365 días y del año solar trópico. Para aproximar el haab al año trópico, los sacerdotes mayas determinaron en el año 249 A.C. (concilio de Hvehvetlapatlan) añadir un día adicional cada 4 años solares, introduciendo así un haab de 366 días cada 4 años, equivalente al bisiesto juliano que veremos enseguida, al que se anticipa en más de 200 años.

Con esta corrección, la duración media del año solar resultaba ser de 365,25 días, igual a la del año juliano. Una segunda reforma se efectuó en Copán, en el siglo VIII de nuestra era, adoptándose un año solar medio de 365,242 días, más correcto que el año gregoriano de 365,2425 días adoptado en Occidente 9 siglos más tarde. Es interesante observar que el belga J. Warzeé propuso en 1962 una corrección del calendario adoptando un año solar medio de 365,242 días, exactamente el valor del año solar medio de los mayas de

Copán, que Worzée obtiene suprimiendo cuatro bisiestos seculares julianos cada quinientos años, en lugar de los tres cada cuatrocientos años suprimidos en la reforma gregoriana. Indiquemos, finalmente, que los mayas desconocían la semana de siete días, aislados como estaban de todo influjo oriental, y que su calendario fue adoptado por los aztecas en México sin modificaciones sustanciales.

Pero la historia de nuestro actual calendario gregoriano comienza hace más de 8000 años en el antiguo Egipto. El calendario solar egipcio, en efecto, fue adoptado fundamentalmente por los romanos en el año 46 A.C., reformado por un decreto de Julio Cesar, y es el calendario romano así reformado denominado calendario juliano, el que estuvo en vigor en Occidente durante 16 siglos hasta la reforma gregoriana del mismo, efectuada por el papa Gregorio XIII en 1582, que dió lugar al calendario gregoriano usado en nuestros días por la mayoría de los países civilizados. Para comprender el calendario gregoriano en su forma actual, por consiguiente, con todas sus virtudes y defectos, es necesario el conocimiento, al menos somero, de los calendarios egipcios y romanos de los que deriva históricamente.

La vida social del antiguo Egipto se regulaba por las inundaciones periódicas del Nilo, que fertilizaban las tierras bajas y señalaban el comienzo del nuevo año agrícola. Los egipcios, sin embargo, habían observado que el comienzo de las inundaciones coincidía aproximadamente con la primera aparición en el horizonte de la estrella Sirio, denominada Sothis, poco antes de la salida del Sol. La primera aparición de Sirio en el horizonte matutino después de la conjunción con el Sol, llamada orto helíaco de Sirio, se puede calcular hoy en día con relativa precisión para un lugar determinado de observación. Así, por ejemplo, el ortohelíaco de Sirio en Menfis en el año 2477 A.C. tuvo lugar en la madrugada del 16 de julio, y volvió a ocurrir al año siguiente el día 17 de julio. El intervalo entre dos ortos helíacos consecutivos, por lo tanto, era de unos 365 días solares, aproximadamente un año trópico, que los egipcios adoptaron como duración fija del año de su calendario. Los 365 días se dividían en 12 meses de 30 días, seguidos de 5 días adicionales.

Cada día tenía 24 horas, 12 diurnas y 12 nocturnas. De esta forma nació el primer calendario estrictamente solar, seguramente antes del año 3000 A.C. que en sus líneas fundamentales todavía seguimos usando nosotros en la actualidad.

El año solar fijo de 365 días del calendario egipcio no se ajustaba mediante ninguna corrección al año solar trópico, aproximadamente un cuarto día más largo, lo que originaba un adelanto progresivo del comienzo del año del calendario respecto al trópico. Los egipcios se percataron de ello a causa del desplazamiento de las estaciones naturales a lo largo de los meses del año. El año del calendario, en efecto, estaba dividido en tres estaciones de cuatro meses, denominadas: estación de las inundaciones, estación de la siembra,

*) En la época de la reforma juliana, en realidad el año comenzaba el 1º de Marzo. (N. del E.)

estación de la cosecha, correspondiente al ciclo anual de crecida y descenso de las aguas del Nilo. La relación entre las estaciones del calendario y las estaciones naturales del año se determinó mediante el orto helíaco de Sirio, que señalaba el comienzo de la estación natural de las inundaciones y respecto al cual se iba adelantando el comienzo de las estaciones del calendario.

El intervalo medio entre los ortos helíacos consecutivos era de 365,2507 días, y los egipcios comprobaron que las estaciones naturales y el calendario volvían a coincidir al cabo de un ciclo de 1460 años (exactamente 1456, según K. Schoch) que se denominó período de Sothis. En el año 238 A.C. Ptolomeo Evergetes decretó una reforma del calendario, que consiste en añadir un día adicional cada cuatro años, con el objeto de hacer coincidir el año del calendario con las estaciones naturales. La reforma, sin embargo, encontró tal oposición entre las clases sacerdotales, que no se llegó a poner en práctica. El calendario solar egipcio, con su año fijo de 365 días, presentaba notables ventajas para los cálculos astronómicos y fue adoptado durante muchos siglos por los astrónomos occidentales. Nicolás Copérnico (1473-1543) todavía lo usaba en sus tablas de los planetas y de la Luna.

CALENDARIO JULIANO

Como ya hemos indicado, el Calendario Juliano fue establecido en Roma por Julio César en el año 46 A.C. en sustitución del primitivo calendario lunisolar romano que llevaba ya un retraso de unos 3 meses respecto al ciclo natural de las estaciones. Por consejo del astrónomo alejandrino Sosígenes, se intercalaron 85 días al año 46 A.C. (708 de la fundación de Roma), resultando un año de 445 días conocido como el Año de la Confusión. Cesar adoptó un año solar común de 365 días, el mismo del calendario egipcio, dividido en 12 meses de 29, 30 y 31 días según el siguiente orden:

Januarius	31 días*
Februarius	29 "
Martius	31 "
Aprilis	30 "
Maius	31 días
Junius	30 "
Quintillis	31 "
Sextilis	30 "
September	31 "
October	30 "
November	31 "
December	30 "

Pero a diferencia del año solar egipcio, que era inmutable, se introdujo un año de 366 días cada 4 años, intercalando un día adicional entre el 23 y 24 de febrero: "dies-sexthus ante calendas martius", el día intercalado se llamó "bis-sexthus", y el año de 366 días se designó, y se sigue designando todavía, con el nombre de año bisiesto. En los años bisiestos el mes tenía 30 días y los meses eran laternativamente de 31 y 30 días. A pesar de la sencillez del ciclo de 4 años de Sosígenes, los romanos intercalaron al principio equivocadamente un bisiesto cada 3 años, de forma que durante los primeros 37 años a partir del

año 45 A.C. en el que entró en vigor el calendario Juliano y que fue año bisiesto, se habían intercalado varios años bisiestos de más. Hoy día resulta prácticamente imposible determinar con seguridad los bisiestos intercalados durante esos primeros años, aunque parece probable que se intercalaron 13 años bisiestos en lugar de los 10 que correspondían.

En el año 9 A.C., el emperador César Augusto rectificó esta intercalación errónea de los bisiestos, y puesto que 13 bisiestos correspondían a 52 años, el emperador suspendió la intercalación de los bisiestos hasta el año 8 A.C., a partir del cual se aplicó correctamente la intercalación de bisiestos cada 4 años hasta la reforma Gregoriana de 1582.

De acuerdo con esta reforma del emperador Augusto, resultaron bisiestos todos los años divisibles por 4. Así, por ejemplo el año 8 A.C. fue bisiesto. Para los años anteriores a Cristo, sin embargo, la regla según la cual son bisiestos los años divisibles por 4 es solamente válida designando los años mediante números negativos, según el cómputo astronómico.

Durante el consulado de Marco Antonio el mes Quintilis recibió el nombre de Julius, en honor de Julio César, y un decreto del Senado Romano del año 24 A.C. dió el nombre de Augustus al mes Sextilis, en honor del emperador Augusto.

Para que el mes dedicado a Augustus no tuviese menos días que el dedicado a Julio César, que tenía 31 días, se añadió un día a Augustus, que se restó a Februarius. El mes de febrero, por consiguiente, quedó con 28 días en los años comunes y con 29 en los bisiestos, y los meses de setiembre y noviembre pasaron a tener 30 días, para evitar 3 meses seguidos de 31 días, mientras octubre y diciembre aumentaron a 31 días. De esta suerte, la duración de los meses quedó alternada de forma caprichosa e ilógica que ha perdurado hasta nuestros días y que transcribimos a continuación con los nombres actuales de los meses en lengua castellana:

Enero	31 días
Febrero	28 ó 29 días
Marzo	31 días
Abril	30 "
Mayo	31 "
Junio	30 "
Julio	31 "
Agosto	31 "
Setiembre	30 "
Octubre	31 "
Noviembre	30 "
Diciembre	31 "

En el Calendario Juliano, por consiguiente, se adopta una duración media de 365,25 días para el año solar, denominado año Juliano, y los años del calendario se ajustan a este valor medio intercalando un día cada 4 años, que se añade al mes de febrero, de forma que hay 3 años comunes de 365,25 días y un cuarto año bisiesto de 366 días² el año Juliano $a_j = 365d,25$, por lo tanto, excede la duración a_t del año trópico en:

$$a_j - a_t = 0^d,007801218 + 0^d,000006138T \quad (1)$$

según se deduce de la expresión de a.t., contándose T en siglos julianos de 36525 días de las efemérides a partir de 1900 enero 0 a 12h de TE.

Al entrar en vigor el Calendario Juliano, al comienzo del año 45 A.C., el exceso del año Juliano sobre el trópico era de $0^d,007681897 = 11^m 3^s,716$ según la fórmula precedente ($t = -19,43964707$ siglos julianos TE).

Este error inicial del calendario juliano, de $11^m 3^s,716$, va aumentando ligeramente en el transcurso de los años, debido al término T de la (1), alcanzando en el año 1582 un valor de $11^m 12^s,339$, y de $11^m 14^s,556$ en el año 2000. Exceso que se va acumulando progresivamente, produciendo un retraso apreciable del calendario juliano respecto al año trópico. Si n es el número de años trópicos transcurridos desde 1900 enero 0 a 12h de TE, la diferencia acumulada entre el año Juliano a_j y el año trópico a_t al cabo de n años es:

$$\int_0^n (a_j - a_t) dn = \int_0^n (0^d,007801218 + 0^d,000006138T) dn = 0,007801218n + 0^d,000006138 \int_0^n T dn \quad (2)$$

Observando que $a_t = 100a_j$ es constante hasta términos de orden superior, la relación:

$$T/n = a_j/100a_t$$

se puede tomar como constante y consiguientemente

$$\int_0^n T dn = \int_0^n (T/n) n dn = T/n \int_0^n n dn = (T/n)(n/2) = 1/2 Tn \quad (4)$$

La (1) se escribe entonces

$$\int_0^n (a_j - a_t) dn = (0^d,007801218 + 0^d,000003069T)n \quad (5)$$

fórmula que nos permite calcular el retraso del calendario Juliano respecto al año trópico en un intervalo de n años, teniendo presente que los intervalos de tiempo T y n se cuentan, en rigor, a partir de la fecha 1900 enero 0 a 12h de TE. Así por ejemplo, al cabo de 400 años contados a partir de la fecha indicada, el atraso del año Juliano sería

$$(0^d,007801218 + 0^d,0003069(400 \times 365,25/36525))400 = 3^d,125397600 = 3^d 3^h 0^m 34^s,353 \quad (6)$$

En 400 años, pues, el Calendario Juliano se retrasa algo más de 3 días respecto al año trópico.

Este retraso acumulado del Calendario Juliano respecto al año trópico se traduce en un adelanto de la fecha juliana en que cae el equinoccio de primavera. Es decir, los comienzos de las estaciones se van adelantando en el calendario Juliano y terminarán por recorrer circularmente todos los meses del año al cabo de un período P dado, según la (5), por la expresión:

$$(0^d,007801218 + 3^d,069(P \times 365,25/36525)10^{-6})P = 365,25 \quad (7)$$

contándose P a partir de 1900. La expresión precedente es una ecuación de segundo grado:

$$0d,00000003069P^2 + 0d,007801218P = 365,25 \quad (8)$$

cuya solución da un período nómico de 40399,022483 años.

En números redondos, por lo tanto al término de unos 20200 años las estaciones se habrían adelantado medio año, y el invierno entra a caer en la época correspondiente al verano al comienzo de este período y viceversa. Para evitar este desplazamiento de las estaciones por todo el calendario, con el consiguiente trastorno en la vida civil, fue necesario modificar el Calendario Juliano.

Dicha modificación fue instituida por el Papa Gregorio XIII como veremos a continuación.

REFORMA GREGORIANA

Como la diferencia entre el año trópico y el año civil no es de un día sino de 0,96 de día en 4 años, es evidente que al agregar un día a febrero cada año, se comete un pequeño error. La acumulación de estos pequeños errores debía producir a la larga una diferencia notable entre el año civil y el año trópico. En 1582, la diferencia era ya de 10 días, de modo que el equinoccio de Aries tenía lugar el 11 de marzo, en vez del 21. El Papa Gregorio XIII, para corregir el error pasado, dispuso que se suprimieran 10 días al mes de octubre de ese año 1582.

Para evitar en adelante las causas del error, decretó que cada 400 años se supriman 3 años bisiestos. Para esto estableció la regla siguiente: los años que terminan un siglo no serán bisiestos sino cuando el número que resulte de separar dos ceros a la derecha, sea divisible por 4.

Con la corrección gregoriana, el año civil se acerca de tal modo al año trópico, que en 4000 años la diferencia será de un día, y para hacer la corrección, basta suprimir cada 4000 años en uno de los bisiestos el día adicional.

LA REFORMA DEL CALENDARIO GREGORIANO

El Calendario Gregoriano presenta notables defectos, tanto en su aspecto astronómico como en su aspecto práctico. Para corregir tales defectos se han hecho numerosas propuestas, sobre todo del tipo práctico. No solo investigadores privados sino también diferentes iglesias y organismos internacionales se han ocupado activamente de la posible reforma del calendario.

Desde el punto de vista astronómico el defecto principal del Calendario Gregoriano radica en la duración excesiva de su año medio de 365^d,2425 respecto a la duración del año trópico.

Como hemos visto, tal exceso origina un error progresivo del calendario, en la escala TE, viene dado por la fórmula:

$$\int_0^n (a_g - a_t) dn = (0^d,000301218 + 0^d,000003069T)n \quad (9)$$

y llega a valer un día al cabo de 3314 años. Evidentemente, para ajustar con más exactitud el año medio del calendario al

año solar trópico es necesario cambiar la regla gregoriana de intercalación de bisiestos.

Veremos, pues, algunos ejemplos de reforma de la regla gregoriana de los años bisiestos.

En 1864 el astrónomo alemán J. H. Maedler propuso suprimir un bisiesto juliano cada 128 años, en lugar de 3 cada 400 años de la regla gregoriana. Se tendrá de esta forma un año medio del calendario:

$$a = 365^d + 1/4 - 1/128 = 365^d,242187500 \quad (10)$$

o sea, de exactamente 365^d 5^h 48^m 45^s. Este valor del año medio a_m de Maedler en la escala TE, difiere del año trópico a_t en la cantidad:

$$a_m - a_t = -0^d,000011282 + 0^d,000006138T \quad (11)$$

contandose T como siempre en unidades de 36525 días de las efemérides a partir de la época 1900 enero 0 a 12h de TE. En esa época, pues el año a_m era de $0^d,000011282 = 0^s,975$ más corto que el año trópico a_t . A causa del signo negativo del primer término de la derecha, la diferencia va disminuyendo progresivamente y se anula al cabo de unos 183 años, o sea, en el año 2038 D.C. A partir de este año, el segundo término de la derecha en la fórmula (11) resulta mayor que el primer término en valor absoluto y la diferencia $a_m - a_t$ iría creciendo positivamente.

Otra propuesta, efectuada en el año 1961, para ajustar el año medio del calendario al año trópico se debe al belga F. Moreau. Recordemos que la regla gregoriana de los años bisiestos pretende fijar el equinoccio en la fecha del calendario, en el 21 de marzo, sin corregirlo del todo, puesto que al cabo de 3314 años el equinoccio se retrasa un día y llegará a caer en el 20 de marzo. Si entonces se suprime un día del calendario, para lo cual basta suprimir el día intercalado en un año bisiesto, el equinoccio volverá a caer el 21 de marzo. Suprimiendo, pues, los bisiestos milenarios múltiplos de 4000 se corrige el retraso de un día con gran aproximación. En esto consiste la reforma de Moreau, que añade un tercer miembro corrector a la regla gregoriana suprimiendo los bisiestos milenarios múltiplos de 4000.

Se obtiene así un año medio a_m del calendario:

$$a_m = 365^d + 1/4 - 3/400 - 1/4000 = 365^d,24225 \quad (12)$$

cuya diferencia con el año trópico a_t es:

$$a_m - a_t = 0^d,000051218 + 0^d,00006138T \quad (13)$$

Aunque el año a_m de Moreau se ajusta peor al año trópico que el a_m de Maedler, la reforma propuesta por Moreau ofrece la ventaja de conservar en la práctica la regla gregoriana de los bisiestos, completada con la supresión de un bisiesto cada 4000 años. Obsérvese, que el ciclo de intercalación de años bisiestos es de 4 años en el Calendario Juliano, de 400 en el Gregoriano y de 4000 en el calendario propuesto por Moreau.

En 1961 el español I. García Serrano propuso la supresión de un bisiesto juliano cada 124 años, con lo cual el año medio del calendario sería igual a $365d + 1/4 - 1/124 = 365d,24139548$; y en 1962 el belga J. Warzée propuso la supresión de 4 bisiestos seculares julianos cada 500 años, obteniéndose un año medio de $365d + 1/4 - 4/500 = 365d,242$. Es curioso observar, que este valor coincide con el año del calendario maya de Cepán. En ambos casos, los años medios obtenidos resultan más cortos que el año trópico en 1900, de forma que su diferencia con el año trópico va disminuyendo lentamente hasta quedar eliminada al cabo de 4288 y 3236 años, respectivamente, contando los años a partir de 1900. Sin embargo, todas estas modificaciones de la regla gregoriana de los años bisiestos y otras similares, encaminadas todas ellas a ajustarse con mayor exactitud el año medio solar trópico, son totalmente innecesarias en la actualidad para los fines prácticos del calendario. Sufren además, de un serio defecto, ya que carecen en general de la sencillez de la regla gregoriana, que es su gran virtud. Por otra parte, el ajuste no es nunca exacto, ni puede serlo a causa de la inconmensurabilidad del año trópico en días.

Una reforma astronómica del calendario lleva consigo una discontinuidad en la escala básica del mismo, con las consiguientes complicaciones cronológicas, y solo debe efectuarse cuando sea absolutamente necesaria y ofrezca garantías de estabilidad para el futuro. Hoy día, tal reforma no es absolutamente necesaria, pues la exactitud astronómica del calendario gregoriano es suficiente para la vida social y sus pequeños defectos astronómicos resultan inapreciables en las aplicaciones prácticas.

La duración de una reforma astronómica efectuada en la actualidad resulta además problemática. El descubrimiento de la falta de uniformidad de la escala de tiempo universal, en efecto, ha producido una revolución en la medida práctica del tiempo, que repercute lógicamente en el calendario.

Se han introducido escalas de tiempo nuevas tales como las escalas TE, TA, TUC sin lograrse una solución definitiva al problema de la medida exacta del tiempo en la vida social.

Si bien la corrección del calendario gregoriano no parece ser urgente, sí lo es, en cambio la reforma práctica de su caótica estructura externa. El año del calendario, en efecto, está dividido caprichosamente en meses desiguales de 28, 29, 30 y 31 días. La semana adoptada casi universalmente como unidad laboral de tiempo, no está integrada en los meses. De donde resulta una variación relativa de hasta el 11% en el número de días laborables, que varían entre 24 y 27, según los meses. Los inconvenientes originados por tales variaciones en la organización y distribución del trabajo y los salarios son mayores de lo que puede creerse. Los cálculos de intereses y salarios se complican notablemente, a causa de tales variaciones irregulares del calendario. Las estadísticas quedan falseadas, si no se tienen en cuenta esas variaciones. Se ha dado el caso, por ejemplo, de estadísticas indicadoras de un descenso mensual en la producción, cuando en realidad la producción diaria iba en aumento. La misma economía doméstica se encuentra en un desequilibrio permanente, ya que un salario mensual fijo debe distribuirse con frecuencia en un número

diferente de días. La programación de actividades sociales diversas -laborales, económicas, escolares, científicas, etc.- no se puede hacer en la práctica por anticipado, hasta que no se han publicado los calendarios anuales correspondientes. La movilidad de la Pascua, que puede oscilar 35 días desde el 22 de marzo hasta el 25 de abril origina perturbación en la duración de los trimestres escolares y en numerosas actividades judiciales, económicas, turísticas, etc., particularmente en los países cristianos, en los que la fiesta de Semana Santa tiene una gran importancia. En una palabra, un calendario irregular y variable, como lo es el gregoriano, no resulta adecuado para regular las actividades de una sociedad laboral cada vez más organizada y compleja.

Se han propuesto muchos planes para reformar la estructura externa del calendario gregoriano, pero prácticamente solo ha sobrevivido el llamado calendario mundial, preprogramado por la organización "The World Calendar Association" que se adapta esencialmente al esquema propuesto en 1834 por el sacerdote italiano M. Mastrofini. Su propuesta es bien sencilla: sacar el último día del año del ciclo semanal y considerarlo un día de fiesta mundial, que no pertenece a ninguna semana. El resultado de este simple artificio es casi milagroso: el año común del calendario queda con 364 días, exactamente 52 semanas, que se repiten sin variación en los mismos días del mes. De esta forma, todos los años comunes son iguales. Para conseguir que también los años bisiestos del calendario gregoriano, de 366 días, se adapten al mismo esquema, basta variar dos días del ciclo semanal, con lo cual el año bisiesto consta también de 52 semanas. Reducidos así todos los años a un número entero de semanas, se puede reestructurar el calendario de una forma racional y única. El calendario gregoriano se convierte en un calendario perpetuo, en el cual todos los años son idénticos, con un día suplementario de fiesta mundial en los años comunes y dos en los bisiestos. En este calendario el año será dividido en 4 trimestres iguales de 3 meses, 13 semanas o 91 días.

Cada mes tendrá 26 días laborables, más los domingos. Todos los años comenzarán en domingos, el día 1 de enero, y terminarían en sábado. Todos los trimestres comenzarían igualmente en domingo y terminarían en sábado, siendo el primer mes de cada trimestre de 31 días y los otros dos de 30. El día 365 de los años comunes, considerado como día de fiesta mundial, se colocaría entre el 30 de diciembre y el 1 de enero y se denominaría "día de fin de año". En los bisiestos, el día 366 se colocaría entre el 30 de junio y el 1 de julio y se llamaría día bisiesto. Estos dos días suplementarios, llamados también "días en blanco" o simplemente "días mundiales" serían así incorporados al calendario.

El calendario mundial satisface a las necesidades laborales de una ordenación racional del tiempo, pero a costa de interrumpir la continuidad del ciclo semanal. Tal discontinuidad del ciclo semanal tiene repercusiones cronológicas y afecta a la determinación de la fecha de la Pascua. Estas dificultades, unidas a la dificultad práctica de cambiar los diferentes calendarios actualmente en vigor, han impedido hasta ahora la adopción del calendario mundial.

(Continuará)