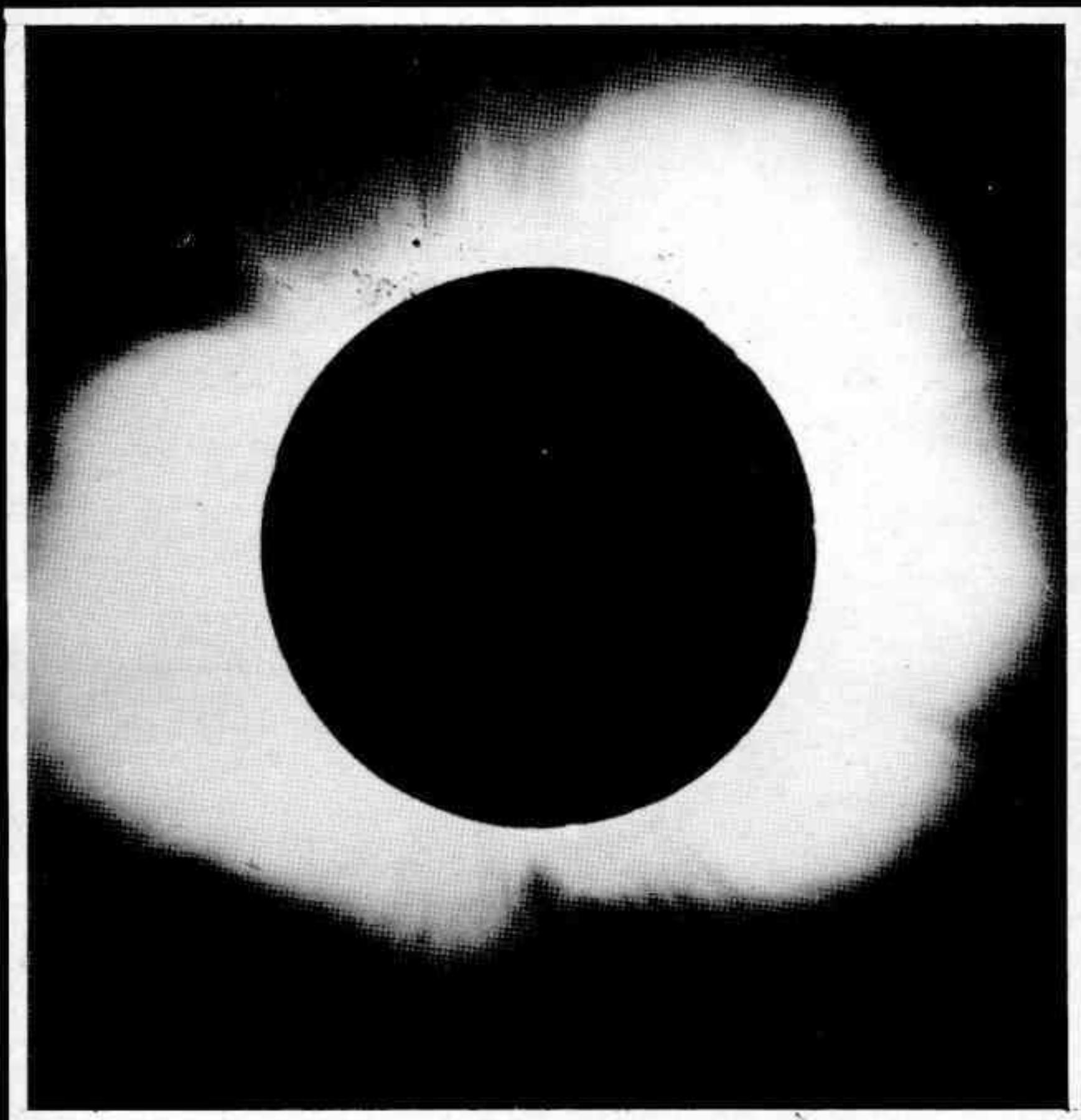


REVISTA ASTRONOMICA



ENERO
JUNIO
1984
N° 228/229

EDITORIAL

Como el lector habrá apreciado las circunstancias por las cuales atraviesa Revista Astronómica no son óptimas, se apartan bastante de serlo. La situación económica del país provoca que el tiempo dedicado a las tareas ad honorem por los asociados sea cada vez menor, pues el tiempo libre resulta escaso, es por este motivo que el Lic. Alejandro Di Baja ha renunciado a la dirección de la revista; hechos como este ya se venían produciendo en diferentes cargos del staff. Estas contingencias producen como consecuencia la no formación de un equipo estable y bien interrelacionado que lleve adelante comodamente la realización de la revista.

Paralelamente se producía en la imprenta un sistemático atraso en las diferentes etapas de la impresión de la publicación, que a pesar de los intentos de los miembros de la Subcomisión de la revista y las promesas de la imprenta, este aumentaba en vez de disminuir. Para cambiar este estado de cosas hemos resuelto tomar en nuestras manos las etapas de tipeado y diagramación, verdaderos cuellos de botella en la imprenta.

Para poder reducir el considerable atraso al que hemos llegado nos vemos en la necesidad de publicar un número doble. Con las medidas adoptadas y el nuevo grupo de trabajo constituido, pensamos en breve tiempo poner la revista al día publicando números normales.

Finalmente quisiéramos pedir la colaboración del lector para poder hacer una mejor Revista Astronómica, la misma podría ser efectuada a través de artículos o simplemente enviando sugerencias sobre cambios, nuevas secciones, o temas a desarrollar, pues es nuestro anhelo satisfacer todos los gustos, en la medida que nos sea posible, pero es indudable que muchas cosas se nos escapan, por ello su idea puede ayudar a crecer a la Revista.

El Director

REVISTA ASTRONOMICA

N° 228/229
Enero-Junio 1984
TOMO LVI

AG ISSN 0044-9253
REGISTRO NACIONAL
DE LA PROPIEDAD
INTELLECTUAL N° 231533

La dirección de la Revista no se responsabiliza por las opiniones vertidas por los autores de los artículos publicados o por los datos contenidos en ellos.

Patricias Argentinas 550 (1405)
Bs.As.
T.E. 88-3366.

DIRECTOR:

Carlos Manuel Rúa

SECRETARIOS:

Srta. Silvina Villegas

Srta. Glenda López

REDACTORES

Sr. Ambrosio Juan Camponovo

Lic. Alejandro Di Baja (h)

Dr. Angel Papetti

Sr. Carlos Rúa

Sr. Mario Vattuone

Sr. Manuel López Alvarez

Srta. Adela Lucia Vázquez

TRADUCTORES:

Lic. Alejandro Di Baja (h)

Dr. Angel Papetti

Sr. Mario Vattuone

DIAGRAMACION:

Sr. Rene Marcelo Sourigues

Sr. José María Cavalchini

Srta. Patricia Olivelli

CANJE

Sr. Ariel Otero Estrada

EFEMERIDES:

Ing. Cristián Rusquellas

PRESIDENTE:

Ing. Cristián Rusquellas

VICEPRESIDENTE:

Cont. Claudio Horacio Cuello

SECRETARIO:

Prof. Luciano Ayala

PRO-SECRETARIO:

Alejandro Blain

TESORERO:

Sr. Eduardo De Tommaso

PRO-TESORERO:

Ing. Benjamín Trajtenberg

VOCALES TITULARES:

Carlos M. Antonioli

Flora Beatriz Clauré

Roberto Remi Frommel

Mario Vattuone

Ariel Otero Estrada

Carlos Manuel Rúa

VOCALES SUPLENTE:

Bernardo Lupiañez

Lic. Alejandro Di Baja (h)

Liliana Graciela Quarleri

COMISION REVISORA DE CUENTAS:

Ctdor. Salvador Antonio Farace

Sr. Carlos E. Gondell

Sr. Augusto Osorio

Impreso en:

Agencia Periodística CID

Avda. de Mayo 666, 2°

Tel. 30-2471



REVISTA ASTRONOMICA



Fundador : CARLOS CARDALDA

Organo de la Asociación Argentina

Amigos de la Astronomía

SUMARIO

CORONAS ESTELARES

por Jorge Sahade

Pág. 2

EL TELESCOPIO ESPACIAL

por John N. Bahcall y Lyman Spitzer, Jr.

Pág. 9

LOS COMETAS Y EL ORIGEN DE LA VIDA

por A. H. Delsemme

Pág. 22

NOTICIAS DE LA ASOCIACION

Pág. 31

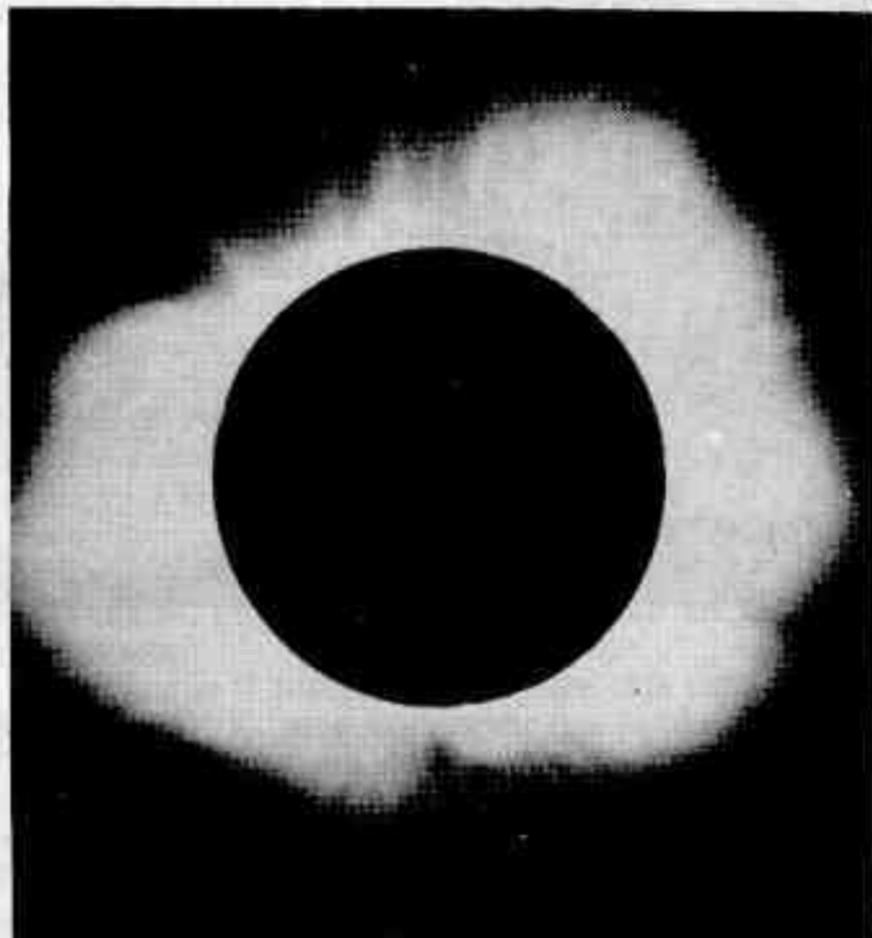
INDICE GENERAL 1983

Pág. 32

NUESTRA TAPA

Eclipse total de sol.
Se aprecia la corona
solar sólo visible en
estos casos debido a
su baja luminosidad
frente a la fotosfera
(ver el artículo
sobre coronas
estelares).

Fotografía de los
Observatorios Hale.



Enero - Junio de 1984 • 1

Coronas Estelares*

por Jorge Sahade**

Instituto Argentino de Radioastronomía
C.C. 5, 1984 Villa Elisa

La existencia de una formación gaseosa, denominada **corona**, alrededor del Sol es un hecho de todos conocido, y su observación a simple vista ha sido y es posible durante los eclipses totales de Sol, gracias a que, en esas circunstancias, el disco de la Luna llega a obstruir totalmente la luz que emite el disco solar. Se puede, entonces, ver una zona luminosa que rodea al Sol y se extiende aparentemente hasta distancias mayores que un radio solar a partir del borde.

Seguramente la presencia de la corona fue adverti-

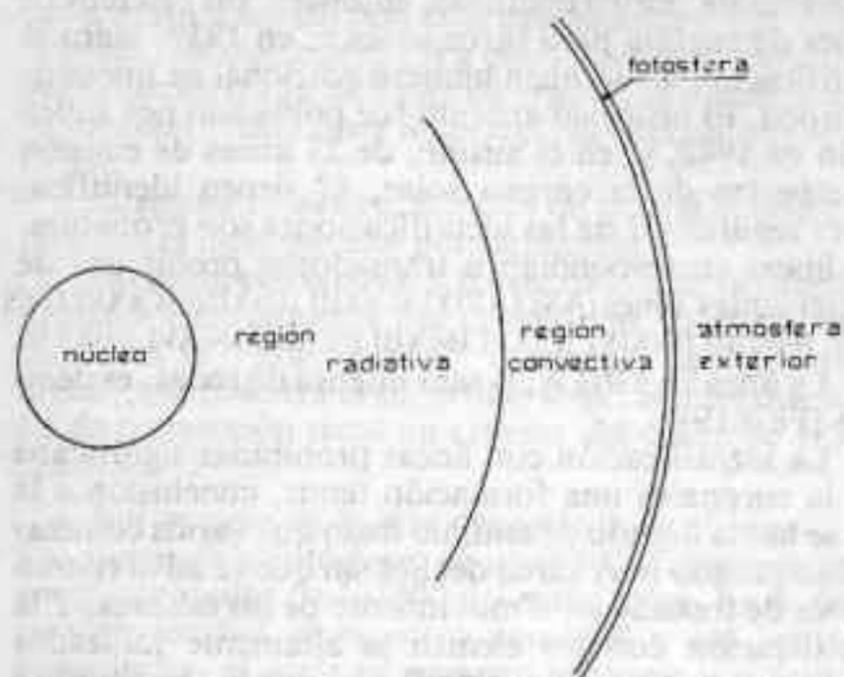
da desde la más remota antigüedad, pero si bien el primer registro de un eclipse data del año 2137 A.C. (Shu Ching), las referencias a la observación de la corona que habitualmente se encuentran no van más lejos en el tiempo que la mención a Plutarco, el ensayista y biógrafo griego que vivió por el siglo I a II de nuestra era, quien, al comentar los eclipses solares, hacía notar que "siempre aparece alrededor de la circunferencia de la Luna, alguna luz que no permite la oscuridad completa".



3. Fotografía de la corona solar en X, tomada desde el Skylab

*Conferencia pronunciada en la Asociación el 16 de Abril de 1983

**Miembro de la Carrera del Investigador Científico, CONICET



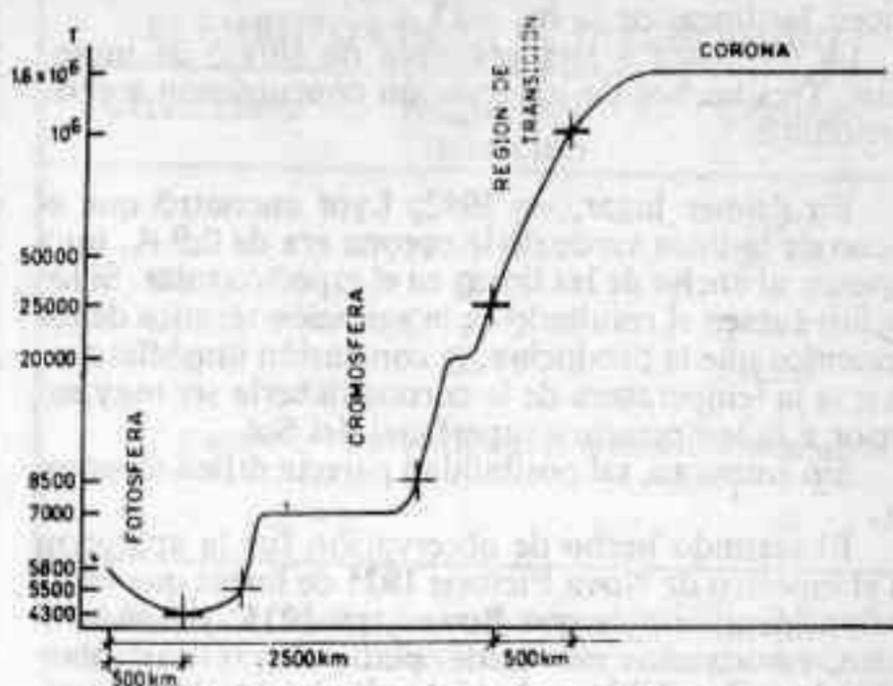
1. Esquema del Sol.

El astrónomo aficionado Bailey, al describir el eclipse total del Sol de 1842, decía que "el cuerpo oscuro de la Luna quedó de pronto rodeado de una corona o de una especie de halo cuya forma y magnitud relativa son similares a los que los pintores dibujan alrededor de la cabeza de los santos y que los franceses denominan aureola... El ancho de la corona, medido desde la circunferencia de la Luna, me pareció ser casi la mitad del diámetro lunar. La luz era más intensa hacia el borde de la Luna y, gradual y uniformemente, se iba atenuando hacia afuera, y tomaba la forma de rayos divergentes que se iban dividiendo y cuya longitud era desigual, de modo que en ninguna parte de la corona pude descubrir la forma regular y bien definida de un anillo que marcará el borde exterior...

El progreso en nuestro conocimiento de la corona prometía ser lento si teníamos que limitarnos a observarla sólo durante los eclipses, que no ocurren con demasiada frecuencia y cuya duración es, en general, corta. Felizmente, el astrónomo francés Lyot diseñó un instrumento que denominó coronógrafo y que comenzó a utilizar en 1930. Este instrumento producía eclipses artificiales de Sol y permitía la investigación de la corona en cualquier momento.

Un primer problema que se planteó fue el de decidir si la corona es una formación vinculada con la Tierra, con la Luna o con el Sol. Képler, en 1605, consideró que lo que se observaba era simplemente la atmósfera lunar, y semejante afirmación, dada la autoridad del que la había hecho, influyó para que durante unos dos siglos no se pensara en la posibilidad de alguna alternativa. Por cierto que éste no es el único caso en que un error conceptual en boca de un astrónomo prestigioso ha detenido el progreso del conocimiento astronómico por décadas y aún por siglos. Pero llegó un momento en que empezaron a surgir grandes dudas acerca de lo acertado de la afirmación de Képler y, entonces, se despertó un interés extraordinario por efectuar observaciones durante

REVISTA ASTRONÓMICA



2. Esquema de la envoltura exterior del Sol, en términos de temperatura y distancia desde el limbo solar.

los eclipses totales de Sol y mediante ellas, tratar de contestar los interrogantes que habían surgido y que iban surgiendo.

La nueva era comenzó con el eclipse de 1842 que fue seguido por un número apreciable de astrónomos de distintos países. Y desde entonces se fueron acumulando resultados de observaciones -visuales primero, fotográficas después- que permitieron llegar a la conclusión de que el aspecto, la estructura y la extensión de la corona cambiaba de eclipse a eclipse. En 1896 Young pudo establecer la correlación que existe entre el aspecto de la corona y el ciclo de las manchas solares, confirmando, así, lo que el P. Secchi había sugerido más de veinte años atrás, en 1875, y disipando las dudas sobre el origen solar de la corona. Dicha correlación es en el sentido de que en el máximo de manchas la extensión de la corona es más o menos la misma en todas direcciones, mientras que el mínimo de manchas la corona se extiende más en la dirección ecuatorial.

En verdad, ya en 1869, se habían encontrado evidencias observacionales que sugerían que la corona es una formación vinculada al Sol. En el eclipse de ese año, Young y Harkness habían descubierto, mediante un espectroscopio, que la corona emite una línea intensa en la región del verde, en 5303 Å, que hasta entonces no había sido observada en ningún otro objeto y cuya identificación constituyó un problema que recién quedó resuelto en 1939, es decir, casi 3/4 de siglo más tarde.

Hasta el año 1930 se había detectado un total de 18 líneas coronales, ninguna de las cuales podía ser tampoco identificada.

Dado que la fotosfera solar tiene una temperatura de unos 6000° K, parecía evidente que la identificación de las líneas de emisión del espectro de la corona debía corresponder a elementos químicos en estados de ionización bajos. Pero resultaba imposible atribuir esas líneas a elementos conocidos y, ya desde la detección de la línea en ~ 5300 Å, se recurrió al expediente de pensar que se originaban en un elemento desconocido hasta en-

tonces, que se designó con el nombre de "coronio". Sin embargo el "coronio" no parecía tener lugar en la tabla periódica de los elementos. ¿Qué explicación tenían, entonces, las líneas de la corona?

La respuesta a esta pregunta no surgió de inmediato. Tres hechos de observación concurren a proporcionarla.

En primer lugar, en 1932, Lyot encontró que el ancho de la línea verde de la corona era de 0,9 Å, muy superior al ancho de las líneas en el espectro solar. Si los anchos fuesen el resultado de la agitación térmica de los elementos que la producían, la conclusión inmediata sería que la temperatura de la corona debería ser muy superior a la temperatura superficial del Sol.

Sin embargo, tal posibilidad parecía difícil de aceptar.

El segundo hecho de observación fue la aparición en el espectro de Nova Pictoris 1925 de líneas que no se podían identificar, y que Bowen, en 1935, y Bowen y Edlén, cuatro años más tarde, pudieron explicar como transiciones prohibidas de hierro ionizado cinco veces ([Fe VI]) o aún seis veces ([Fe VII]). Es decir, se trataba de transiciones que normalmente -salvo en el caso de masas gaseosas muy pocas densas, muy tenues- tienen muy poca probabilidad de producirse.

En tercer término, en 1933, Adams y Joy descubrieron en el espectro de la nova recurrente RS Ophiuchi, días después de la explosión de ese año, algunas líneas de emisión que coincidían en posición con líneas no identificadas del espectro de la corona solar.

Los hechos de observación que he mencionado sugirieron a Grotrian que, a lo mejor, las "misteriosas" líneas de emisión que aparecían en el espectro de la corona correspondían a transiciones prohibidas de elementos altamente ionizados. Y utilizando estudios reali-

zados por Edlén de los niveles de energía en los espectros de algunos iones, en 1939, Grotrian pudo identificar dos líneas de la corona con [Fe X] y [Fe XI], respectivamente. Edlén continuó, entonces, sus cálculos de niveles de energía para otros iones y, en 1939, logró la identificación de un buen número adicional de líneas de la corona. El histórico artículo fue publicado por Edlén recién en 1942, y, en el mismo, de 23 líneas de emisión del espectro de la corona solar, 17 tienen identificaciones seguras y 2 de las identificaciones son probables. Las líneas correspondían a transiciones prohibidas de los siguientes iones [AX] [AXIV] [CaXII] [CaXIII] [CaXV] [FeX] [FeXI] [FeXIII] [FeXIV] [FeXV] [NiXII] [NiXIII] [NiXV] [NiXVI]

La línea en 5303 Å, la más intensa de todas, es debida a [Fe XIV].

La identificación con líneas prohibidas significaba que la corona es una formación tenue, conclusión a la que se había llegado de antiguo dado que varios cometas habían pasado muy cerca del Sol sin que se advirtieran efectos de frenado en el movimiento de los mismos. Y la identificación con los elementos altamente ionizados que hemos mencionado, significaba que la temperatura de la corona tenía que ser del orden del millón de grados, en contraste con los casi 6000° de la superficie solar. Si bien los hechos de observación apuntaban inexorablemente a esta conclusión, debieron transcurrir unos años, aunque pocos, hasta 1945, antes de que fuera totalmente aceptada. Y, entonces, ya no quedó dudas de que los perfiles de las líneas de emisión eran perfiles ensanchados por la velocidad térmica. Así, el ancho de la línea de [Fe XIV] en 5303 Å, corresponde a un movimiento de los iones con una velocidad media de 25,5 km s⁻¹, la que se alcanza en un medio a la temperatura de 2 x 10⁶ °K.

La Figura 1 muestra un esquema del Sol en el que distinguimos el interior, la fotosfera y la envoltura exte-

Tabla 1
"CAPAS" ATMOSFERICAS EN EL SOL

| Parámetro | Fotosfera | Cromósfera | Región de Transición | Corona |
|-------------------------------------|---|---|---------------------------------------|---|
| Calentamiento No radiactivo | presente no dominante | domina el balance de energía | | |
| Andar de la temperatura | disminuye | aumenta gradualmente | aumenta pronunciadamente | aumenta ligeramente |
| Extensión geométrica (km) | 500 | 2000 | 500 | varios R. |
| Rango de temperaturas | 6000°-4300° | 4300°-25000° 50000° | 25000°-1 x 10 ⁶ ° 5000° | 1-3 x 10 ⁶ ° |
| Mecanismo dominante de enfriamiento | radiación en continuo y líneas | radiación en líneas de resonancia y subordinadas; continuos de H,H- | radiación en líneas del UV y EUV | radiación X y FUV conducción térmica |
| Estructuras importantes | manchas, fáculas, granulación, tubos de flujo | mallas, fáculas cromosféricas, espículas, prominencias | mallas, regiones activa | lazos magnéticos, agujeros coronales |

rior. En el interior, a su vez distinguimos, según nos enseña la teoría:

la **región central**, que contiene alrededor del 10 % de la masa total del Sol, una densidad una 110 veces la densidad media, que es $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, y cuya temperatura es del orden de los 15 millones de grados; es donde se genera mediante reacciones nucleares, la energía que irradia el Sol;

la **región radiativa**, a través de la cual la energía se propaga principalmente por radiación; y

la **región convectiva**, a través de la cual la energía se propaga esencialmente por convección, lo que se manifiesta en la "granulación" o aspecto de "granos de arroz" que muestra la superficie solar. Se cree que la zona de convección tiene un espesor del orden de $1/3$ del radio sol.

Por encima de lo que denominamos el interior del Sol, tenemos la **fotósfera**, de unos 500 kilómetros de espesor, alrededor de $1/1000$ del radio solar. En la fotósfera se forman el espectro continuo y las líneas de Fraunhofer, es decir, el espectro continuo y el de líneas de absorción del Sol. La fotósfera alcanza, en el borde exterior, la temperatura mínima del orden de los 4300°K .

Y rodeando todo lo anterior, tenemos la así denominada "envoltura exterior".

Gracias al resultado de las observaciones efectuadas con distintas técnicas y en distintos rangos de energía, hoy aceptamos que la envoltura exterior del Sol está caracterizada por una distribución compleja de temperatura y densidad. Para facilitar la descripción de esa envoltura y circunscribir el objeto del análisis, se han asignado nombres a diferentes regiones de la misma. En esencia, distinguimos tres regiones que designamos con los nombres de **cromósfera**, **región de transición** y **corona**. La Figura 2 muestra un esquema de la envoltura exterior del Sol.

La cromósfera puede ser observada durante eclipses totales de Sol en que el disco de la Luna cubre durante algunos segundos la fotósfera. Entonces se ven gases incandescentes que brillan, para la vista, en un color rojo muy intenso ya que la mayor parte de la radiación visible aparece en $H\alpha$. De ahí el nombre de "cromósfera" que se adoptó. El espectro de la cromósfera es de emisión y ha recibido, en inglés, la designación del espectro "flash", espectro relámpago, en castellano.

Los elementos que predominan en el espectro de la cromósfera son el hidrógeno y el helio, neutro [He I] e ionizado [He II], lo que ya indica que la temperatura de la zona donde se produce ese espectro es superior a la temperatura de la fotósfera.

Se acostumbra describir la cromósfera distinguiendo tres regiones, a saber, la **cromósfera inferior**, la **cromósfera intermedia** y la **cromósfera superior**. Dado el tema de esta exposición, en todo lo que sigue haremos abstracción de los fenómenos relacionados con la actividad solar; consideramos simplemente el Sol calmo.

La cromósfera inferior está inmediatamente encima de la fotósfera, tiene un espesor del orden de la fotósfera, unos 400 kilómetros, y está caracterizada porque en esa zona la temperatura experimenta un leve ascenso.

La cromósfera intermedia abarca un espesor unas tres veces mayor a través del cual la temperatura aumenta desde unos 5500° hasta unos 8500°K , y posee una zona de temperatura constante ("plateau" o meseta) a los 7000° .

En la cromósfera superior, que llega hasta unos 2500 kilómetros por encima del limbo solar, la tempera-

Tabla 2
ELEMENTOS PARA EL DIAGNOSTICO

| Cromósfera | Región de Transición | Corona |
|-------------------|----------------------|-----------------|
| Ca II | O VI, C V | Mg X |
| $\text{H}\alpha$ | N V, N IV | Si XII |
| Fe II | S IV | |
| $\text{Ly}\alpha$ | C IV, C III | []* |
| Mg II | Si IV | rad.X |

* transiciones prohibidas de elementos altamente ionizados.

tura aumenta, primero abruptamente y luego más lentamente. En lo que se refiere a la temperatura máxima en la cromósfera superior, algunos investigadores la fijan en unos 25000°K , otros, en unos 50000°K , y aún se mencionan valores tan altos como 100000°K . En 20000°K hay una zona de temperatura constante, cuyo espesor es quizás un 50 % del espesor de la fotósfera.

La zona entre la cromósfera y la corona recibe el nombre de región de transición y tiene apenas un espesor de unos 500 kilómetros en los cuales la temperatura asciende de los 25000 ó 50000 ó 100000 grados Kelvin hasta un millón de grados.

La corona, que, como dijimos ya, puede ser observada visualmente durante los eclipses totales de Sol, pero sólo si el disco aparente de la Luna llega a ser suficientemente grande, relativamente al del Sol, como para ocultar la cromósfera. La corona visible se extiende a varios radios solares, y esencialmente, se caracteriza por una "meseta" de temperatura alrededor de los 1,6 ó 2 millones de grados. En verdad, la corona, a través del así llamado **viento solar** se extiende más allá de los límites del sistema planetario; su densidad es de unos 10^8 partículas por centímetro cúbico a $1 R_\odot$ y es de cerca de 10^3 cm^{-3} a $20 R_\odot$ de distancia; cerca de la Tierra, es de 5-10 partículas por cm^3 .

Un objeto a la temperatura del millón de grados emite radiación en el rango de energías correspondiente a la radiación X blanda, es decir, entre 10 y 100 Å, y a radiación ultravioleta extrema, es decir, entre los 100 y 1000 Å. La Figura 3 muestra una fotografía de la corona solar en radiación X. Fotografar el Sol en radiación X tiene la ventaja de que se puede obtener una imagen de la corona sobre el disco solar y establecer correspondencias entre la actividad que se advierte en la fotósfera y detalles de la estructura de la corona.

Fotografías como la que muestra la Figura 3 han permitido confirmar la existencia -sugerida por Waldmeier unos veinticinco años atrás- y estudiar el comportamiento de los **agujeros coronales**, zonas de temperatura y densidad baja dentro de la corona.

La Tabla 1 resume la información relacionada con la envoltura gaseosa alrededor del Sol.

De inmediato surge una pregunta crucial. ¿Cómo es posible que se generen temperaturas tan elevadas como las que caracterizan a la envoltura exterior del Sol si, en su superficie, la misma no alcanza los 6000 grados? En realidad, no lo sabemos exactamente. La explicación sugerida en un principio se basaba en la idea de que el campo de velocidades que se crea en la región convectiva del Sol genera ondas acústicas y otros tipos de ondas mecánicas que, a su vez, generan un flujo de energía mecánica que produciría el calentamiento. Volveremos sobre este punto un poco más adelante. Lo importante es destacar que el origen de las altas temperaturas no es

térmicos y, por consiguiente, que nos encontramos con evidencias de la existencia de fuentes no térmicas de energía en las estrellas.

Otra pregunta surge también de inmediato. Si el Sol posee una envoltura exterior, extendida, caracterizada por una distribución de temperaturas y densidades que definen las regiones que hemos designado como cromósfera, región de transición y corona, en que la temperatura llega al millón de grados, ¿ocurre lo mismo en las demás estrellas?

En lo que se refiere a cromósferas, en la región fotográfica, es decir, desde tierra, sólo es posible detectar emisiones que se originen en ellas, si se trata de estrellas gigantes o supergigantes. Esto es así, en gran medida, porque sus atmósferas son muy extendidas y, por consiguiente, las cromósferas llegan hasta una distancia apreciable del disco estelar y producen líneas de emisión. En parte, la emisión puede resultar del calentamiento no térmico de la cromósfera.

En los espectros de las estrellas gigantes y supergigantes de tipo tardío -F (ocasionalmente), G, K, M- las líneas de calcio ionizado (Ca II-H y K) muestran una estructura en la cual se destaca una emisión central: la emisión es de origen cromosférico y su ancho está correlacionado con la luminosidad absoluta de la estrella, según descubrieron Wilson y Bappu en 1957. En el ultravioleta, Ly α y el doblete de resonancia de Mg II muestran una correlación similar a la que caracteriza al Ca II (y a H α) en la región fotográfica; esas líneas se pueden detectar en las estrellas tardías, aún siendo enanas. La Tabla 2 resume los elementos que se utilizan para diagnosticar cromósferas en las estrellas.

La conclusión es que las estrellas enanas y gigantes de tipo F2 y más tardío poseen cromósferas. Las supergigantes, en cambio, sólo poseen cromósferas si están ubicadas hacia el rojo de la franja de inestabilidad de las cefeidas.

Los sistemas binarios de tipo RS Canum Venaticorum, casi todos los sistemas W Ursae Majoris, algunas binarias de largo período, y las estrellas T Tauri y UV Ceti poseen también cromósferas.

Entre las estrellas tempranas, hasta ahora no se ha encontrado evidencias de que, en general, estén rodeadas de una cromósfera, pero la conclusión no es necesariamente definitiva. Por de pronto, AB Aurigae, una estrella Ae, muestra emisiones de Ca II, de Mg II y de He I en 5876 Å.

Algunos astrónomos consideran que, a lo mejor, en las estrellas en que no se puede observar Mg II en emi-

sión, ello ocurre porque esa emisión no alcanza a ser visible contra el fondo brillante de la fotosfera. Habría que tratar, en cambio, de detectar, en el infrarrojo, exceso de flujo debido a emisión libre-libre de la cromósfera. En 1980 y 1981 se detectó, con el Sistema Muy Extenso de Radiotelescopios (VLA -Very Large Array, en inglés) del Observatorio Nacional de Radioastronomía de los Estados Unidos, emisión en 6 cm de algunas estrellas enanas de tipo tardío. Esa emisión es variable y los valores que alcanza sobrepasa hasta en un factor del orden de 250 de flujo predicho en base a la radiación X que emite y en el supuesto de una temperatura de 10 millones de grados. Esa emisión proviene de las coronas respectivas, y el mecanismo parece ser emisión de girorresonancia, es decir, emisión de ciclotrón de electrones Maxwellianos no relativistas atrapados en campos magnéticos. Si así fuere, la emisión en microrondas detectada proporcionaría un medio para calcular la intensidad del campo magnético. En el caso de la estrella χ^1 Orionis (G0 V), el flujo observado en 6 cm puede interpretarse como producido por un campo magnético de 300 gauss.

Completemos la información mencionando que hay mediciones directas de los diámetros de las zonas que emiten el espectro continuo y de las zonas que emiten en H α en estrellas gigantes rojas tales como α Orionis (M2 Iab) y 119 Tauri (M2 Ib). En el primer caso se utilizó espectroscopía de banda angosta por el método de interferometría de manchas ("speckle", en inglés), resultando para la región que emite en H α un diámetro cinco veces mayor que el de la región que el continuo. En el segundo caso se hicieron observaciones de banda angosta, en ocasión de la ocultación de la estrella por la Luna, resultando que la región que produce H α tiene un diámetro doble del de la región responsable del espectro continuo.

En lo que se refiere a regiones de transición y coronas, ya hemos hecho referencia a que en el espectro fotográfico de la estrella simbiótica y nova recurrente RS Oph se habían encontrado, en cierta época, algunas de las líneas de emisión que aparecen en el espectro de la corona solar, hecho que ayudó a descifrar el enigma que estaba planteado.

Otra estrella simbiótica y nova recurrente, T Coronae Borealis, que es una binaria de 227,6 días de período orbital, también ha mostrado líneas de emisión de [Fe XIV] en su espectro. Y otros objetos simbióticos y novas llegan a presentar líneas espectrales, de iones tales como [Fe X], [Ca VII], etc., que sugieren que en las tenues envolturas que los rodean, las temperaturas que prevalecen son mucho mayores que las de las estrellas centrales.

Pero contestar la pregunta de manera general, es decir, para poder establecer si todas las estrellas poseen regiones de transición y coronas, o poder decir qué tipos de estrellas las poseen, es necesario un análisis que requiere observaciones en el ultravioleta y en el rango de frecuencia correspondientes a radiación X.

El ultravioleta resulta útil para decidir sobre la existencia de regiones de transición y coronas porque en esa zona del espectro se encuentran las líneas de resonancia de elementos altamente ionizados, tales como C IV, N V, O VI, O V, Si IV, S VI, que requieren, para su formación, temperaturas del orden de las que son válidas en las regiones de transición, y de iones tales como Mg X y Si XIII, que requieren temperaturas coronales. La Tabla 3 da la lista de las líneas de resonancia de los elementos indicados, con sus longitudes de onda y las temperaturas a que se forman.

El satélite ultravioleta de la NASA/ESA/SERC, denominado IUE (International Ultraviolet Explorer), lanzado al espacio en 1978 y aún en operaciones, sólo proporciona información de la región de longitudes de

REVISTA ASTRONOMICA

Tabla 3
LINEAS DE RESONANCIA * DE
ELEMENTOS MUY IONIZADOS

| Ion | λ (Å) | | T |
|--------|---------------|--------|-------------------|
| C III | 977,0 | | 5×10^4 |
| C IV | 1548,2 | 1550,8 | $1,3 \times 10^5$ |
| N IV | 765,1 | | |
| N V | 1238,8 | 1242,8 | 2×10^5 |
| O V | 629,7 | | $1,8 \times 10^5$ |
| O VI | 1031,0 | 1037,6 | 2×10^5 |
| Mg X | 609,9 | 624,9 | 10^6 |
| Al III | 1854,7 | 1862,7 | 2×10^4 |
| Si IV | 1393,7 | 1402,7 | 3×10^4 |
| Si XII | 499,2 | 521,1 | $1,8 \times 10^6$ |
| Mg II | 2795,5 | 2802,7 | $6,5 \times 10^3$ |

* líneas relativamente intensas más fácilmente excitables.

Tabla 4

LUMINOSIDADES EN X

| Tipo Espectral o Estrella | $\log L_x$ (ergs $(m^{-2} s^{-1})$) | " $\log L_x$ " | $\frac{\log L_x}{\log L_{bol}}$ |
|--|---|--------------------|---------------------------------|
| OB enanas (muy variable) | 31-33 | 32,5 | -6 |
| A enanas >100 x | <26-31 | | |
| F enanas | 28-30 | 29 | -5,5 |
| GK enanas fulguración solar región solar activa agujero coronal (\odot) | 26-30 31-33 ' | 28 29,3 26,8 | -6 -4,3 -7 |
| M enanas ($d Me \gg dM$) fulguraciones | 26-30 28-31 | | -4 |
| O supergigantes | | 34 | |
| G gigantes α Agr G2 Ib β Agr G0 Ib | 28-30 | <-7 | |
| M supergigantes α Ori M2 Iab α Sco M1 Ib | <29,3 | | <-8 |
| Sistemas RS CVn | 30,3-31,3 | | |

onda mayores que 1150 Å y, por consiguiente, sólo permite detectar regiones de transición.

La presencia de regiones de transición a través de líneas de emisión es clara en los espectros ultravioletas de la mayor parte de las estrellas F, G y K, a partir de F2 o hacia el rojo de la franja de inestabilidad de la cefeidas, para las más luminosas. Las estrellas Me enanas también poseen regiones de transición, pero, en el caso de las estrellas M enanas sin emisión de H_{α} las líneas que diagnostican la presencia de regiones de transición son muy débiles o están ausentes. Es posible que las regiones de transición de las estrellas enanas de tipo M sean demasiado débiles.

En las estrellas de tipo temprano las líneas de resonancia de los elementos altamente ionizados aparecen en absorción con perfiles que pueden ser asimétricos, o aparecen con perfiles P Cygni, indicando, así, pérdida de masa.

Dijimos que las coronas, es decir, las formaciones gaseosas exteriores cuya temperaturas son del orden del millón de grados, emiten radiación X blanda. Hasta el lanzamiento del satélite Einstein (HEAO-2) en 1978, nuestros conocimientos acerca de los tipos de estrellas que poseen coronas era muy restringido, en parte por la sensibilidad relativamente baja de los detectores utilizados con anterioridad. Ahora la información que poseemos es más amplia y nos permite afirmar que se ha detectado radiación X no sólo de estrellas de los tipos espectrales O, B y A, es decir, de estrellas calientes, sino también de estrellas de todas las edades y etapas de evolución. Las únicas estrellas en las cuales aún no se ha detectado radiación X son las gigantes y supergigantes de tipos K a M.

La comparación entre las observaciones de Bootis (Arcturus), de tipo K2 III y Centauri A, de tipo G2 V, en el ultravioleta y en X, sugiere que el flujo de la cro-

mósfera es de 3 a 20 veces menor en las gigantes rojas respecto a las enanas. En el caso de las coronas, la relación es en el mismo sentido pero la relación es superior a 1000. Por otra parte, existen evidencias de que en las gigantes y supergigantes rojas las cromósferas se extienden a distancias de varios radios estelares, y que aparentemente las coronas son muy débiles o inexistentes (Stencel, 1982).

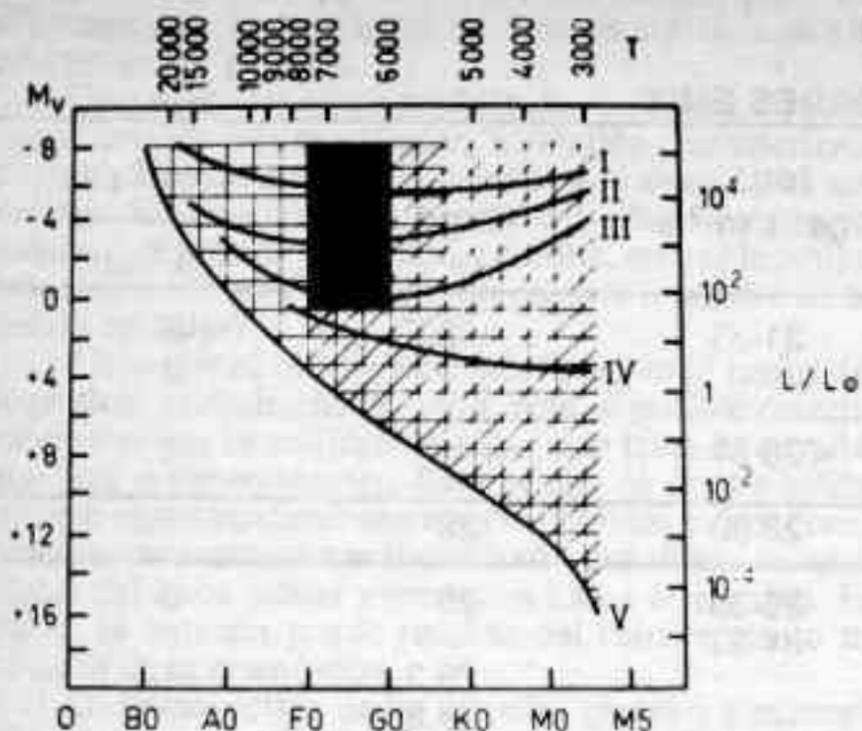
La dispersión de valores de las luminosidades en X para estrellas del mismo tipo espectral y clase de luminosidad es grande, según se puede advertir en la Tabla 4, es un hecho de observación que permite concluir que la temperatura efectiva y la gravedad no son los principales parámetros que determinan las propiedades de las coronas estelares (Linsky, 1981).

Si recordamos lo que dijimos al principio en el sentido de que las designaciones de cromósfera, región de transición y corona se utilizan únicamente para facilitar la descripción de la envoltura exterior y precisar de qué valores de temperatura y densidad estamos hablando, entonces podríamos resumir nuestras conclusiones de la siguiente manera:

- 1) todas las estrellas están rodeadas de una atmósfera extendida;
- 2) en el balance de energía de esas atmósferas extendidas predominan las fuentes no térmicas;
- 3) el perfil de temperatura y el perfil de densidad dependen, en general, del tipo de objeto de que se trate.

La Figura 4 resume, en líneas generales, la situación.

Hemos hablado de un perfil de temperatura y de un perfil de densidad. Conviene que recalquemos que la presencia de ciertas líneas sugiere las temperaturas de las zonas en que se forman, y que la relación de las intensidades de determinadas líneas nos permite inferir las densidades electrónicas.



4. Diagrama esquematizado de Hertzsprung-Russell en el que se indican las clases de luminosidad (I a V). La zona gris corresponde a la franja de inestabilidad de las cefeidas. Sobre los ejes de las abscisas hemos indicado la correspondencia entre tipo espectral y temperatura superficial, y, sobre los ejes de las ordenadas, la correspondencia entre magnitud visual absoluta y luminosidad relativa al Sol.

El rayado oblicuo cubre la zona de las estrellas en las que se ha encontrado evidencia de la presencia de cromósferas; la zona con el rayado vertical corresponde a las estrellas con regiones de transición; y la zona con el rayado horizontal, a las estrellas que poseen coronas.

Al hablar del Sol, habíamos mencionado que algunos astrónomos creen que la energía mecánica cuya disipación da lugar a las altas temperaturas imperantes en la envoltura exterior, se genera en la región convectiva del interior solar. Ahora bien, la teoría nos dice que en las estrellas cuya temperatura superficial es superior a los 6500° , es decir, en las estrellas más tempranas que A5, el interior es radiativo, no existen zonas convectivas cerca de la superficie. Sin embargo, todas las estrellas parecen estar rodeadas de una atmósfera extendida en que las temperaturas no son de origen térmico. Las conclusiones posibles parecen ser dos, a saber:

o la teoría de los interiores estelares está equivocada, o la energía no térmica no se genera -por lo menos, no siempre- en una zona de convección vecina a la superficie.

Existen astrónomos que se inclinan por la idea de que la energía no térmica está vinculada de alguna manera con los campos magnéticos. Como ya se ha dicho, la forma y extensión de la corona solar están correlacionadas con el ciclo de la actividad solar que, a su vez, está vinculado con el campo magnético. La corona es un gas completamente ionizado -un plasma- y, por consiguiente, un excelente conductor. El campo magnético que es generado por las corrientes eléctricas que se producen, interactúa con el campo magnético general y da lugar a la complicada estructura de la corona. Dicha estructura contiene los agujeros coronales (formaciones abiertas) en los que aparentemente se origina el viento solar, y los lazos coronales (formaciones cerradas) que irradian más energía que las regiones vecinas. En los lazos coronales el campo magnético es muy intenso. Ciertas formaciones cromosféricas como las mallas ("network") y las fáculas coronales ("plages") son también asientos de campos magnéticos intensos (~ 2000 gauss).

Es posible que los dos mecanismos de calentamiento operen al mismo tiempo en estrellas tardías, en grados relativos que variarán según el caso. Pero también

es posible que aún no hayamos encontrado la clave de la solución del problema. De todos modos, parecería que, de alguna manera, los campos magnéticos deben desempeñar un papel importante en el proceso.

Se puede pensar en otro tipo de fuentes de energía no térmica. Por ejemplo, pero no para el Sol evidentemente, en disipación de velocidades de rotación y/o expansión. Si consideramos el caso de sistemas binarios interactuantes, nos encontramos que, en general, sus espectros ultravioletas también muestran líneas de resonancia de elementos altamente ionizados, que requieren, para producirse, temperaturas del orden de los 100000 grados. ¿Cuáles pueden ser las fuentes de energía no térmica que generan esas temperaturas? Como decía en el artículo sobre "Radioemisión en Binarias Cerradas", publicado en REVISTA ASTRONOMICA, N° 222, páginas 9-16, "La energía no térmica puede resultar de la disipación de ondas de choque que se generan cuando la corriente gaseosa (que proviene de la componente secundaria del sistema) interactúa con el disco de acreción que rodee a la estrella primaria (Lubow y Shu, 1975; Shu, 1976); cuando el material que abandona el sistema interactúa con la envoltura exterior, tal como lo sugiere Florkowski (1980), o cuando el flujo supersónico que proviene de una de las componentes del sistema se encuentra con la compañera (Sahade y Zorec, 1981)".

El estudio de las envolturas exteriores ha entrado en una fase quizás más apasionante que nunca gracias a la información que nos han brindado los satélites que permiten observar en el dominio del ultravioleta y en el rango de radiación X. Sin duda que el progreso podrá ser considerable con la próxima generación de satélites astronómicos y la utilización del así llamado "taxi" espacial. Mientras tanto, los estudios teóricos siguen un curso acelerado y sus resultados son de gran interés. Citaré tan sólo que Hearn, Kuin y Martens han encontrado, en 1982, que las coronas que se generan con flujos grandes de energía mecánica no son estables. La formación gaseosa oscila entre una en la cual existe una sola corona a otra en la cual hay dos coronas, es decir, dos zonas de temperatura máxima. Es interesante mencionar en este contexto que las estrellas Wolf-Rayet son objetos que poseen una envoltura exterior muy extendida, la cual está caracterizada por dos máximos de temperatura electrónica, según encontramos hace tres años (Sahade, 1980).

Hasta hace algún tiempo, el Sol era la única estrella que podía ser investigada en detalle. El estudio de las atmósferas extendidas en otras estrellas se reducía a aquéllas cuyos espectros tienen líneas de emisión o líneas que muestran efecto de dilución, pero, aún en esos casos, existía una limitación muy grande impuesta por la reducida información disponible o que se podía recoger.

El vertiginoso progreso tecnológico de los últimos decenios se ha traducido y se va traduciendo en una revolución en la Astronomía que parece no tener solución de continuidad. Una revolución en los recursos técnicos para obtener y para manejar la información, en la técnica misma de la observación, en la sensibilidad de los detectores, en la ampliación sin límites del dominio del espectro electromagnético que se puede investigar, etc., etc., etc. Tratar de transmitir todo esto sería tarea imposible para una sola persona y demandaría mucho tiempo. Hoy hemos simplemente echado una rápida ojeada a los efectos de esa revolución en lo que se refiere a nuestro conocimiento de la existencia de envolturas gaseosas extendidas alrededor de las estrellas. Es sólo uno de los resultados apasionantes del progreso astronómico reciente. Y aún no está dicha la última palabra.

Mi agradecimiento a la señora Margarita Trotz por la confección de las Figuras 1, 2 y 4.

El Telescopio Espacial

por John N. Bahcall y Lyman Spitzer, Jr

"Reproducido con autorización. Copyright © 1982. Scientific American, Inc. y Prensa Científica, S.A. Reservados todos los derechos"

La atmósfera terrestre es una ventana imperfecta sobre el universo. Las ondas electromagnéticas de la parte óptica del espectro (ondas más largas que los rayos X y más cortas que las de radio) penetran hasta la superficie de la Tierra sólo a través de unas pocas y estrechas bandas espectrales. La más ancha de las bandas transmitidas viene a corresponder a los colores de la luz visible; las ondas de las regiones ultravioleta e infrarroja vecinas las absorbe, casi en su integridad, la atmósfera. Por si fuera poco, la turbulencia que caracteriza a ésta desfigura las imágenes de los objetos celestes, aun cuando se contemplen con los más potentes telescopios instalados en nuestros observatorios terrestres.

Viene de lejos, pues, la ponderación de las ventajas que resultarían si se acometieran observaciones astronómicas desde fuera de la atmósfera. En los últimos decenios se ha adquirido bastante pericia en el manejo remoto de telescopios transportados por encima de la mayor parte, o incluso de la totalidad, de la atmósfera a bordo de cohetes suborbitales, globos para grandes alturas y satélites artificiales. Estas empresas han aportado descubrimientos importantes y obligado a revisar algunas teorías sobre la estructura y evolución del universo.

El paso siguiente a dar en este programa de exploración lo constituye el Telescopio Espacial, que pondrá en órbita alrededor de la Tierra el transbordador espacial de los Estados Unidos en 1985, de cumplirse lo proyectado. El ingenio será un telescopio reflector corriente con posibilidades poco corrientes. Será el mayor telescopio astronómico jamás puesto en órbita. Y la primera instalación científica internacional a largo plazo situada en el espacio.

De acuerdo con el proyecto, el Telescopio Espacial, en fase de construcción, constituirá un observatorio astronómico de uso múltiple. Tendrá un es-

pejo primario de 2.4 metros, capaz de concentrar la radiación electromagnética en la totalidad de la parte óptica del espectro. Desde un comienzo estará equipado con un conjunto de instrumentos científicos que cumplirán las misiones siguientes: registrar imágenes astronómicas de resolución extremadamente alta, detectar objetos extremadamente débiles, recoger diversas clases de datos espectrográficos y hacer medidas muy precisas de la posición de fuentes radiantes en el cielo. Las observaciones se harán desde una altura de unos 500 kilómetros, muy por encima de las capas atmosféricas perturbadoras.

En el desarrollo de los objetivos del Telescopio Espacial han intervenido un nutrido grupo de científicos e ingenieros, que han venido trabajando durante casi un decenio bajo la supervisión de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). Las empresas contratantes encargadas de la construcción son la Perkin-Elmer Corporation (responsable del propio telescopio) y la Lockheed Missiles and Space Company, Inc. (responsable de los sistemas auxiliares del vehículo espacial y de la integración de los componentes en un sistema que funcione correctamente). El coste total del proyecto se estima en la actualidad en 750 millones de dólares.

Se le ha asignado una vida útil de 15 años, aunque en principio no hay razón que impida su funcionamiento durante muchos decenios. Un elemento esencial para asegurar tan larga vida útil (y mantener los costos dentro de límites razonables) es la disponibilidad del transbordador espacial, que no se limitará a instalar el telescopio, sino que atenderá a su mantenimiento de una manera regular. Astronautas del transbordador visitarán el Telescopio Espacial siempre que los instrumentos a bordo del observatorio necesiten re-

paso, reparación o sustitución. A intervalos más dilatados (cada cinco años quizá) se traerá a la Tierra el Telescopio Espacial entero para restaurar el espejo y demás componentes delicados. El telescopio será después devuelto a su órbita.

Dotado de la instrumentación adecuada, responderá a ondas electromagnéticas cuyas longitudes de onda varíen desde 115 nanómetros (milmillonésimas de metro) en la región ultravioleta extrema del espectro hasta el millón aproximado de nanómetros (un milímetro), en el infrarrojo lejano. Así, la banda espectral accesible al telescopio puede extenderse sobre un intervalo de longitudes de onda que varíen en un factor de 10.000. Potencia que contrasta con la de los telescopios instalados en tierra, que tienen una visión clara de colores cuya longitud de onda varíe desde 300 hasta 1000 nanómetros aproximadamente, es decir, en un factor que no llega a 10.

Al hallarse inmune a los efectos degradadores de la turbulencia atmosférica, el telescopio podrá obtener imágenes de los objetos celestes mucho más nítidas que las de sus homólogos terrestres, incluso en las mismas longitudes de onda observables desde el suelo. La máxima resolución espacial que se alcanzará con el nuevo ingenio será de una décima de segundo de arco; compárese ello con este otro dato: la mayoría de las imágenes astronómicas hechas con telescopios terrestres tienen resoluciones no muy superiores a un segundo de arco. Esta resolución, diez veces mejor, consentirá observaciones más detalladas de los objetos extensos. Se espera también que los astrónomos lleguen a ver estrellas unas siete veces más alejadas del sistema solar de lo que alcanzan con los medios actualmente disponibles.

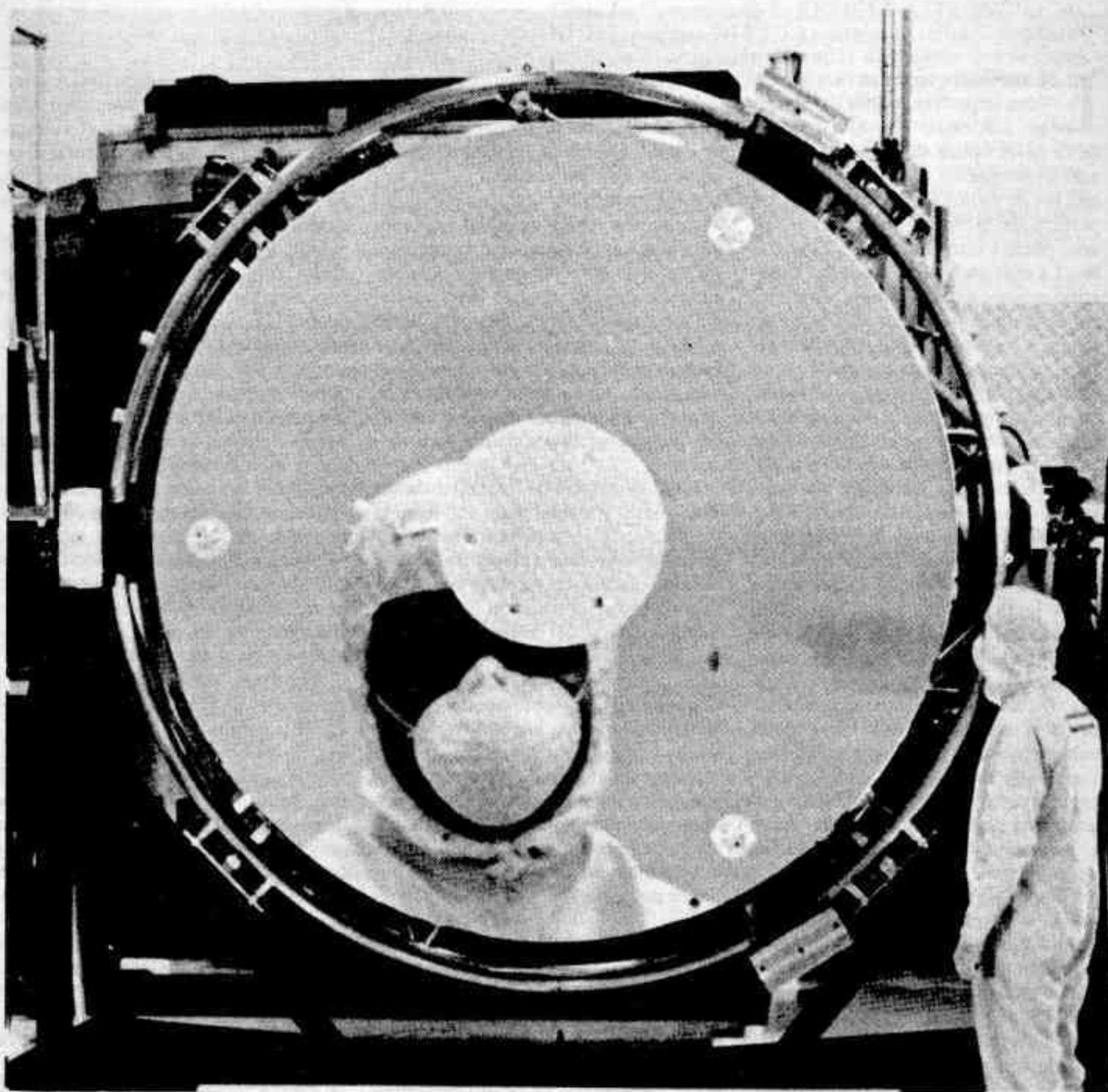
El programa de observaciones para el Telescopio Espacial será administrado en nombre de la NASA por el Con-

sorcio Universitario para la Investigación Astronómica (AURA), en el que se integran 17 universidades y que nació para sacarle el mayor rendimiento posible a distintas instalaciones de la National Science Foundation, entre ellas los Observatorios nacionales de Kitt Peak en Arizona y Cerro Tololo en Chile. El centro de la elaboración y análisis iniciales de los datos procedentes del telescopio será el Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, cen-

tro que está construyendo el AURA en el campus de la Universidad Johns Hopkins. El primer director del Instituto es Riccardo Giacconi, que dirigió los grupos científicos de los dos satélites de rayos X *Uhuru* y *Einstein*, de gran éxito. Del funcionamiento del Telescopio Espacial se ocuparán, en responsabilidad mancomunada, el Instituto y el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA en Greenbelt, Maryland. El Centro Goddard ejercerá el control

directo del satélite y servirá de punto colector de los datos transmitidos desde aquél hasta la Tierra.

La Agencia Espacial Europea (ESA) cubre aproximadamente el 15 por ciento del coste del Telescopio Espacial. Poseerá su propio centro de análisis de datos en la oficina central del Observatorio Meridional Europeo en Munich. La ESA suministra los paneles solares que proporcionan energía eléctrica al observatorio, una cámara de alta reso-



ESPEJO PRIMARIO del Telescopio Espacial, fotografiado en la factoría de Wilton, Connecticut, propiedad de la Perkin-Elmer Corporation, inmediatamente después de que se hubiera recubierto su superficie anterior de una película reflectora de aluminio de ocho diezmilésimas de milímetro de espesor, seguida de una capa protectora de fluoruro de magnesio de 2,5 diezmilésimas de milímetro de espesor. El espejo, construido de vidrio de sílice fundida, tiene un coeficiente de dilatación térmica extremadamente bajo, un diámetro de 2,4 metros y pesa unos 785 kilogramos. Está formado por un núcleo celular ligero de 25 centímetros de espesor intercalado entre dos placas, de 2,5

centímetros de espesor cada una. En el curso de los 28 meses que duró el esmerilado y pulido necesario hasta dar a la superficie la forma apropiada, que es la de un hiperboloide cóncavo, se eliminó de la placa anterior un kilogramo de material. La persona enmascarada que se ve reflejada en el espejo está de pie junto al fotógrafo a unos 18 metros del espejo. Otro técnico, también enmascarado y provisto de un traje especial para preservar la limpieza de la superficie del espejo, está a la derecha. El orificio que ocupa el centro geométrico del espejo a través del cual pasará la luz del espejo secundario del telescopio se encuentra temporalmente cubierto por una placa metálica.

lución para objetos débiles para su sección instrumental y cierto número de científicos y técnicos que se incorporarán al personal del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial. En contrapartida, los astrónomos europeos tendrán derecho al 15 por ciento del tiempo de observación. También trabajarán con el telescopio astrónomos de otras partes del mundo. Será, pues, un verdadero observatorio internacional.

Las primeras observaciones astronómicas desde el espacio se remontan a finales del decenio de 1940: se realizaron con cohetes V-2 capturados a los alemanes. Algunos de estos primitivos cohetes de combustible líquido llegaron a los Estados Unidos al terminar la segunda guerra mundial; se emplearon para enviar instrumentos científicos muy por encima de la atmósfera durante varios minutos de observación. Más tarde se desarrollaron cohetes menores de combustible sólido destinados, de una manera específica, a la investigación: elevaban una carga útil de alrededor de 45 kilogramos hasta una altura máxima de 160 kilómetros, dando un tiempo de observación, por encima de la influencia perturbadora de la atmósfera, de varios minutos de duración. El subsiguiente desarrollo de equipos electrónicos ligeros de estado sólido

posibilitó la construcción de instrumentos científicos de capacidad y complicación crecientes para tales misiones, sin tener que aumentar prohibitivamente la potencia necesaria para elevarlos.

La primera aplicación de la tecnología de gran altitud fue el estudio del Sol. En 1946, un cohete elevaba un espectrómetro desarrollado por investigadores del Observatorio Naval de los Estados Unidos; se obtuvo el primer espectrograma solar en el ultravioleta, donde se revelaban características de absorción que no se habían detectado antes en la radiación procedente de ningún objeto celeste. Hasta 1957 no se pudo registrar la radiación ultravioleta de una estrella. La resolución espectrográfica de esta primitiva medida era tosca, con una anchura de banda de varias decenas de nanómetros. Los cohetes de la primera generación no podían apuntarse con precisión; giraban libres en el espacio y ello impedía que suministraran la larga exposición necesaria para una medida precisa de la débil radiación procedente de una estrella distante. En el decenio de 1960 se elaboraron técnicas para apuntar los instrumentos transportados por cohetes hacia una estrella, utilizando pequeños giroscopios que proporcionaron un sis-

tema de referencia inercial. Se registraron así espectrogramas estelares con una anchura de banda de una décima de nanómetro, aproximadamente. Este éxito marcó el comienzo de una activa investigación acerca de muchos aspectos de las atmósferas estelares y de la materia interestelar.

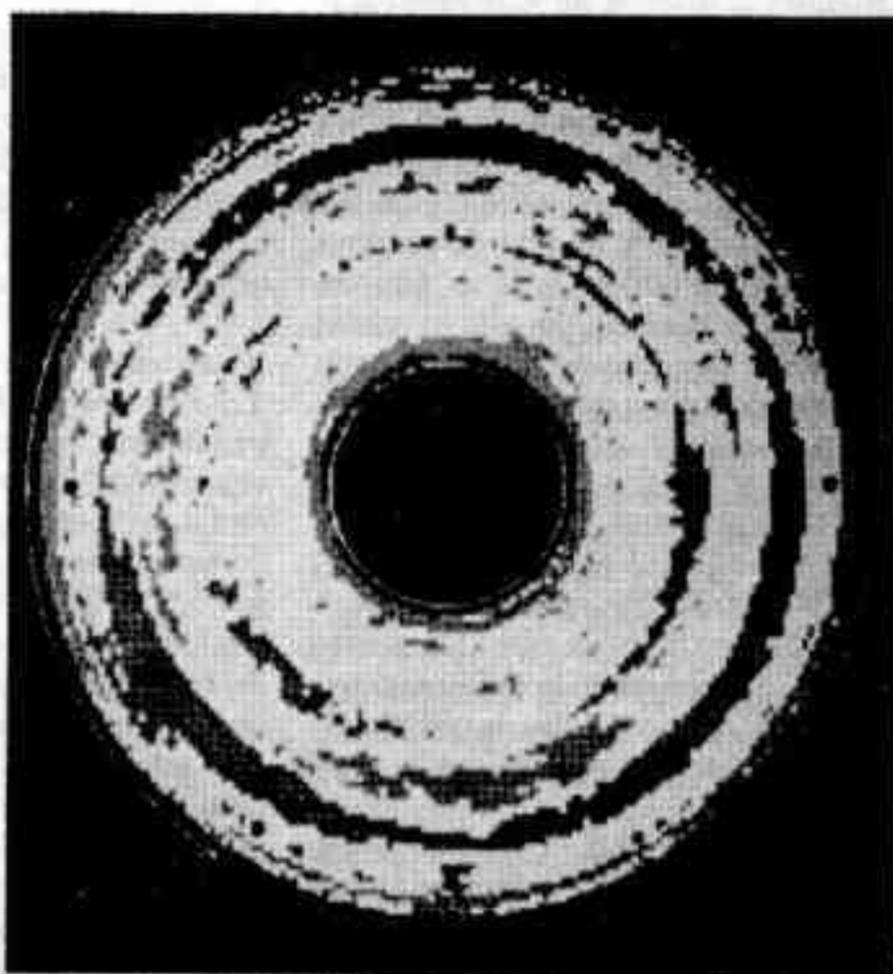
Mientras tanto, otro grupo de astrónomos empleaba globos para elevar telescopios ópticos hasta unos 30 kilómetros de altura, por encima de las partes más densas de la atmósfera. A fines del decenio de 1950, un telescopio de 30 centímetros de este tipo, el llamado *Stratoscope I*, sacó fotografías del Sol de una nitidez extraordinaria. A lo largo de la década siguiente, su sucesor, el *Stratoscope II* de 90 centímetros, tomó varias fotografías de planetas y sistemas de estrellas con una resolución próxima a la décima de segundo de arco.

Los satélites artificiales, que podían permanecer en órbita años enteros, constituyen una plataforma para montar un telescopio óptico mucho mejor que un cohete suborbital o un globo. A medida que la tecnología aeroespacial ha progresado, los satélites se han convertido en los vehículos más idóneos para la astronomía extraterrestre.

Al igual que ocurrió con los primitivos cohetes y globos, las primeras ob-



MAPAS TOPOGRAFICOS en falso color de la superficie del espejo primario, realizados en la pantalla de un terminal de ordenador con capacidad gráfica para ayudar a determinar la acción correctora necesaria en cada uno de los 24 ciclos del proceso final de pulido, que duró ocho meses. Los mapas se basaron en medidas interferométricas precisas de la forma de la superficie. Los dos mapas presentados se hicieron al principio y al final del proceso de pulido controlado por ordenador. Las zonas blancas representan la superficie media del espejo; las zonas en azul oscuro y rojo oscuro altas y bajas, respecti-



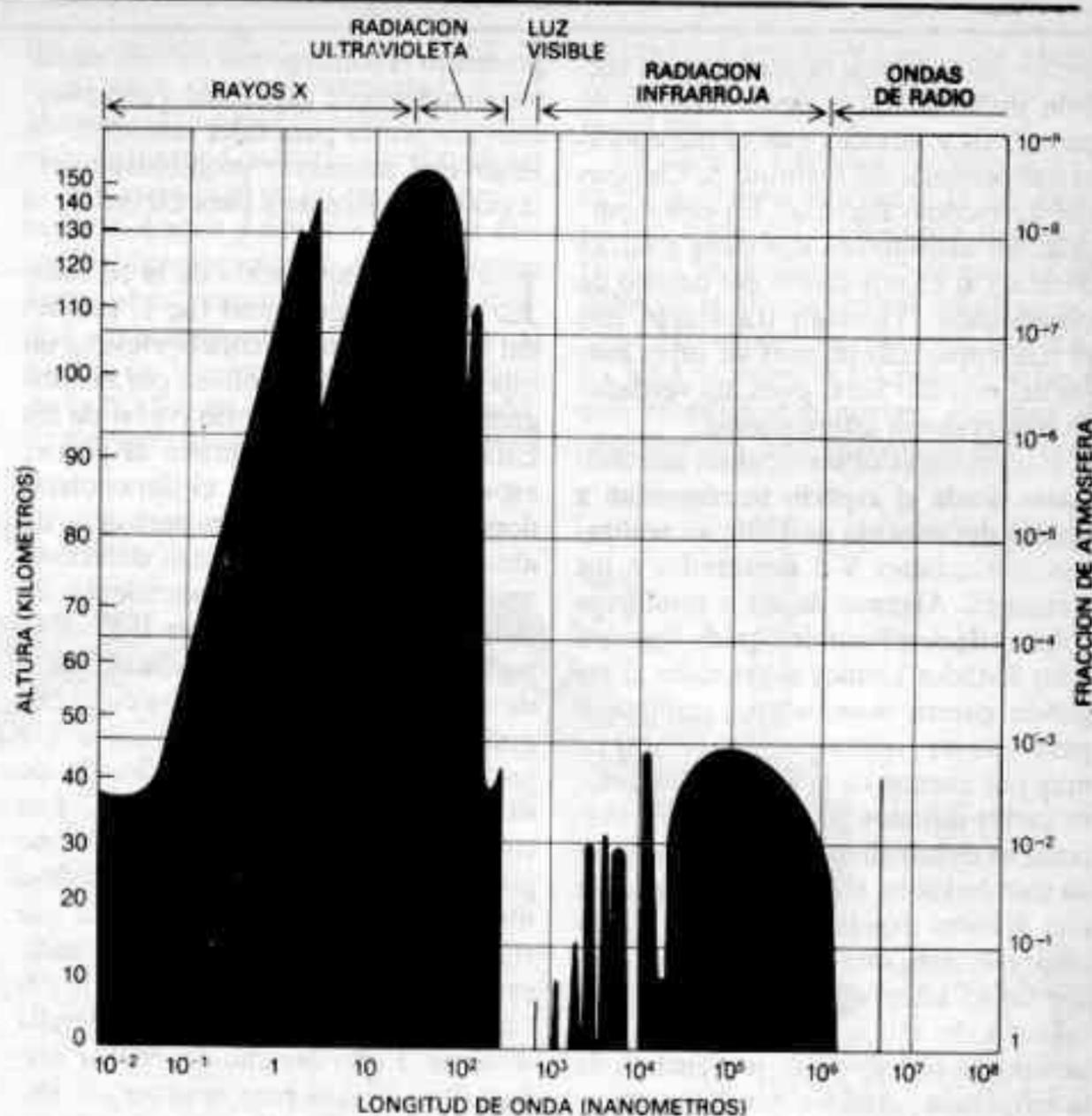
vamente. Al principio, las desviaciones con respecto a la superficie prescrita llegaban a alcanzar 2,5 milésimas de milímetro (o micrómetros); al final, la máxima desviación se había reducido a menos de la centésima parte de esa cifra en la mayor parte de la superficie del espejo. El espejo primario pulido es el mejor gran espejo astronómico jamás construido. Según Perkin-Elmer, "la superficie está tan cerca de la forma perfecta, que si el diámetro se aumentara hasta la anchura de los Estados Unidos continentales, no habría colina o valle que se separase de la superficie media en más de 60 milímetros".

servaciones que se hicieron con los satélites fueron del Sol. El proceso de hallar un objeto en el cielo y apuntar un telescopio hacia él es mucho más fácil con el Sol que con otra estrella menos cercana. Desde la década de 1960, la NASA ha construido y puesto en funcionamiento una serie de Observatorios Solares Orbitales, equipados con diversos instrumentos que permitieran estudiar su atmósfera.

Los primeros satélites NASA proyectados para observaciones estelares se designaron Observatorios Astronómicos Orbitales. Dos satélites de este tipo trabajaron satisfactoriamente, uno de 1968 a 1973 y el otro desde 1972 hasta 1981. Ambos se usaron, sobre todo, para analizar la radiación ultravioleta de las estrellas. El primero tenía una resolución espectrográfica bastante baja: su anchura de banda de medida era de 1,2 nanómetros. El segundo, *Copernicus* de nombre, era muy superior en este punto: poseía una anchura de banda de 0,005 nanómetros. El desarrollo de sistemas de guía precisos para tales satélites constituyó un notable éxito tecnológico. El telescopio del *Copernicus*, cuyo espejo medía 80 centímetros de diámetro, podía apuntar hacia una estrella durante varios minutos con una desviación máxima de 0,02 segundos de arco.

Los dos Observatorios Astronómicos Orbitales aportaron un verdadero aluvión de datos. Así, observaciones hechas con el *Copernicus* mostraron que gran parte del hidrógeno de las nubes interestelares estaba en forma de moléculas, no de átomos individuales. Se halló que muchos átomos de oxígeno de las regiones entre las nubes estaban altamente ionizados, lo que revelaba que el gas entre las nubes estaba muy caliente: del orden de un millón de grados Kelvin. Los datos de los satélites pusieron también de manifiesto que la relación cósmica de los átomos de deuterio, o hidrógeno pesado, a los de hidrógeno ordinario era de uno a 100.000, aproximadamente. De acuerdo con algunas teorías cosmológicas, esta medida apoya la idea de que el universo continuará expandiéndose por siempre.

El último telescopio óptico en llegar al espacio ha sido el Explorador Ultravioleta Internacional, un satélite desarrollado conjuntamente por la NASA, la ESA y el Consejo Británico de Investigación Científica. Ha venido midiendo, desde 1978, el espectro ultravioleta de objetos bastante débiles. Aunque el rendimiento de este instrumento está limitado por el tamaño de su espejo



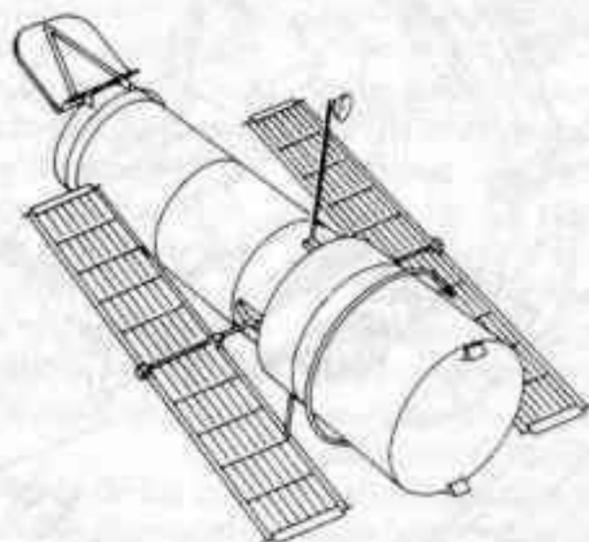
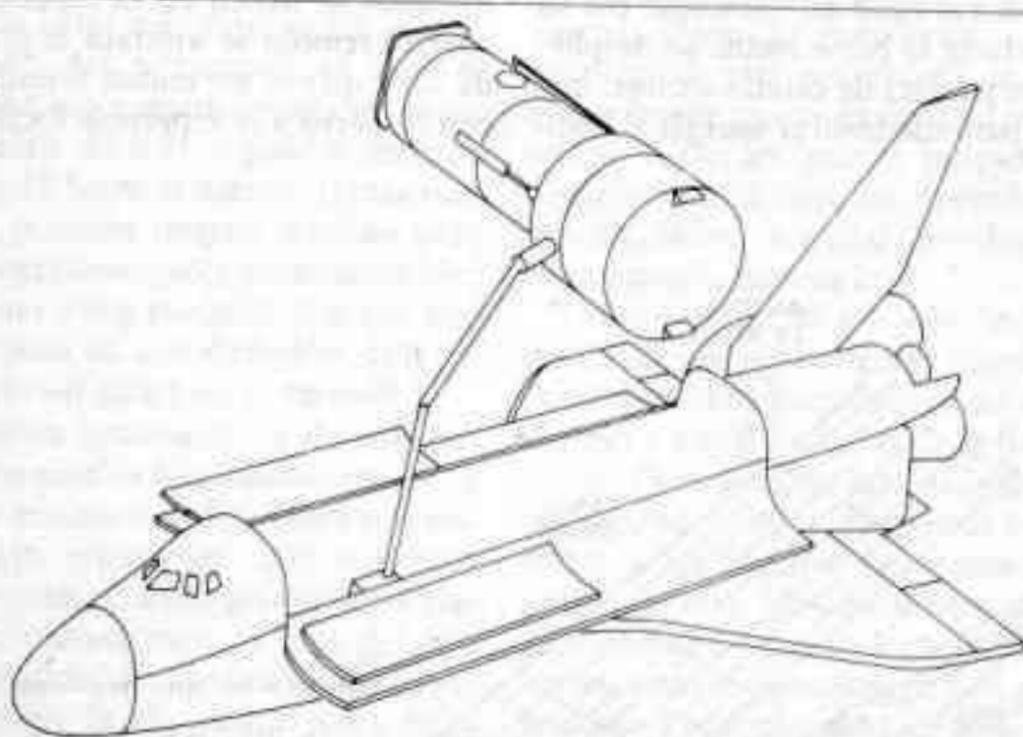
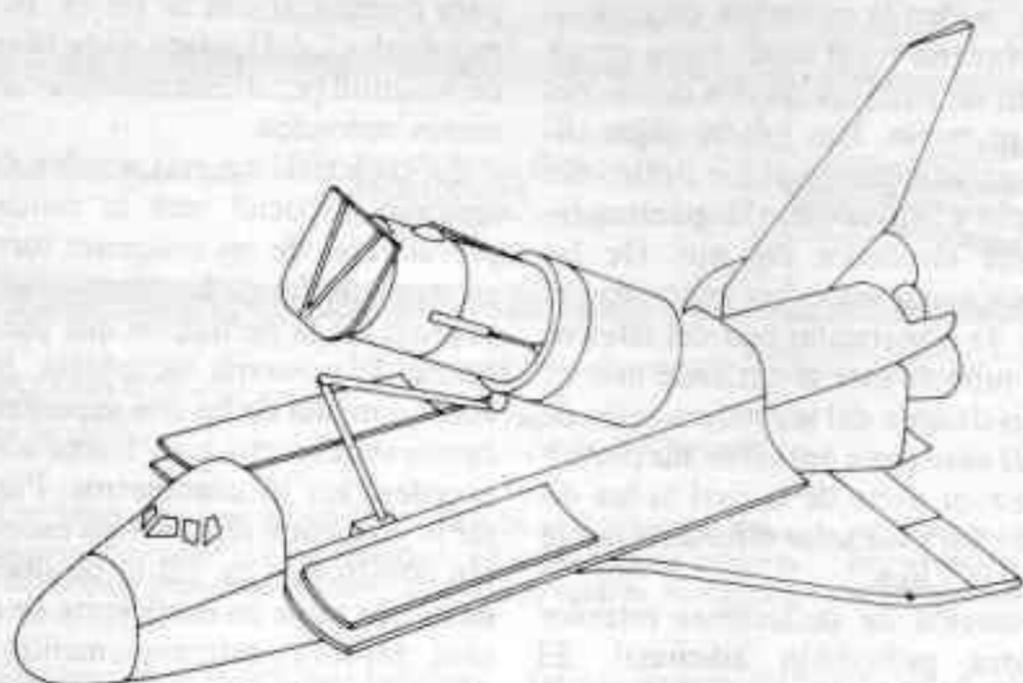
LA ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA de la radiación electromagnética limita la astronomía óptica desde la Tierra principalmente a la estrecha banda espectral correspondiente a la luz visible. La radiación en las vecinas regiones ultravioleta e infrarroja queda casi totalmente detenida. El borde superior de las zonas grises indica la frontera donde la intensidad de la radiación en cada longitud de onda se reduce a la mitad de su valor original. Un nanómetro es una milmillonésima de metro, vale decir, 10 unidades Ångström.

(que tiene 46 centímetros de diámetro), se ha mostrado particularmente eficaz en la obtención de espectrogramas ultravioletas de núcleos de galaxias y en el análisis del gas interestelar en regiones remotas de nuestra galaxia.

La idea de un telescopio espacial mucho mayor fue tomando cuerpo lentamente a lo largo de los últimos veinte años. La primera noticia oficial de tal proyecto apareció en 1962 en el informe de un grupo de científicos, presentado a la NASA por la Academia Nacional de Ciencias, sobre el estudio del futuro de la ciencia espacial. El grupo recomendaba la construcción de un gran telescopio espacial como un corolario lógico del programa científico en ese campo de los Estados Unidos. La recomendación se repitió por un grupo de estudio semejante en 1965. Poco después, la Academia Nacional estableció un comité presidido por uno de los autores (Spitzer) para definir los objetivos científicos que cumpliría un telescopio espacial dotado de una abertura aproximada de tres metros. El informe de este último grupo se publicó

en 1969. Pese a las muchas ventajas reseñadas para un telescopio espacial de semejante tamaño, la mayoría de los astrónomos estaban por aquel entonces demasiado embebidos en sus ocupaciones como para tomar parte activa en promover su desarrollo. La astronomía convencional (la de los telescopios instalados en la Tierra) acababa de entrar en una emocionante "edad de oro" con el descubrimiento de fenómenos del calibre de los cuasars, la radiación cósmica de fondo en microondas y las estrellas de neutrones pulsantes; no había muchos científicos dispuestos a dedicar largos años de esfuerzo en el desarrollo de un equipo tan complicado y costoso como un gran telescopio espacial.

En 1972, otro comité de la Academia Nacional de Ciencias, presidido por Jesse L. Greenstein, del Instituto de Tecnología de California, programó el elenco de necesidades y prioridades de la astronomía para el decenio de 1970; de nuevo llamó la atención sobre las potencialidades de un gran telescopio espacial. Aunque la naturaleza y coste de tal instrumento apenas si quedaban por entonces esbozados, se consideró



EL TRANSBORDADOR ESPACIAL transportará el Telescopio Espacial hasta una altura aproximada de 500 kilómetros y lo pondrá entonces en órbita con ayuda del brazo mecánico. Los paneles solares de alimentación eléctrica, las antenas de comunicaciones y la puerta de apertura, todos ellos retraídos mientras el satélite es transportado en la bodega del transbordador, se desplegarán después de la puesta en órbita del satélite. El transbordador visitará periódicamente el telescopio para su mantenimiento, reparación y sustitución de piezas. Cada cinco años se traerá el satélite, de una pieza, para su restauración.

como un objetivo a largo plazo realista y deseable.

La NASA había reunido en el interin un pequeño grupo de astrónomos bajo la dirección de Nancy G. Roman con el fin de evaluar y discutir, desde el punto de vista científico, los estudios sobre la viabilidad del telescopio espacial que estaban realizándose en el Centro Goddard y en el Centro de Vuelos Espaciales George C. Marshall en Huntsville, Alabama. Aportaron su ayuda, en un comienzo, representantes de instituciones académicas, centros de investigación de la NASA e industrias contratantes.

En 1973, la NASA llamó a científicos de varias instituciones académicas para recabar su auxilio y opinión sobre el proyecto básico del telescopio y sus instrumentos. El grupo trabajó conjuntamente con los científicos e ingenieros de la NASA: se trataba de determinar qué objetivos eran viables y cuyo el orden de precedencia. El grueso de la orientación científica principal se debió a un grupo de 12 personas (en el que participaron los autores) presidido por C. R. O'Dell, de la Universidad de Chicago. Para dedicar toda su valía y fuerzas al proyecto, todavía sin financiación, O'Dell renunció a sus cargos de profesor y director del Departamento de Astronomía de la Universidad de Chicago y del Observatorio de Yerkes.

En 1977, la NASA convocó a un nuevo grupo de 60 científicos de 38 instituciones para participar en el proyecto y desarrollo del observatorio. Al frente de la dirección científica de este intento vuelve a estar O'Dell. En la composición actual del grupo de trabajo se aprecian personal de confianza de la NASA, jefes de investigación responsables de los instrumentos científicos iniciales, varios científicos interdisciplinarios (Bahcall es uno de ellos) y especialistas en tratamiento de datos, operaciones con vehículos espaciales y óptica de telescopios.

Faltó muy poco para que no se yugulara el programa del Telescopio Espacial. Entre 1974 y 1978, el proyecto estuvo en peligro constante de suspensión o aplazamiento indefinido a raíz de las correspondientes revisiones del presupuesto por parte del Congreso y la Presidencia. Tras un intenso período de contactos y visitas, en el que participaron no sólo cientos de astrónomos, sino también muchos científicos de otros campos, llegó por fin, en 1977, la autorización para su construcción. El programa pasó su primer examen presupuestario en el Congreso en 1978. Desde entonces, ha recibido en todas las

ocasiones una respuesta informada y favorable de la Colina del Capitolio.

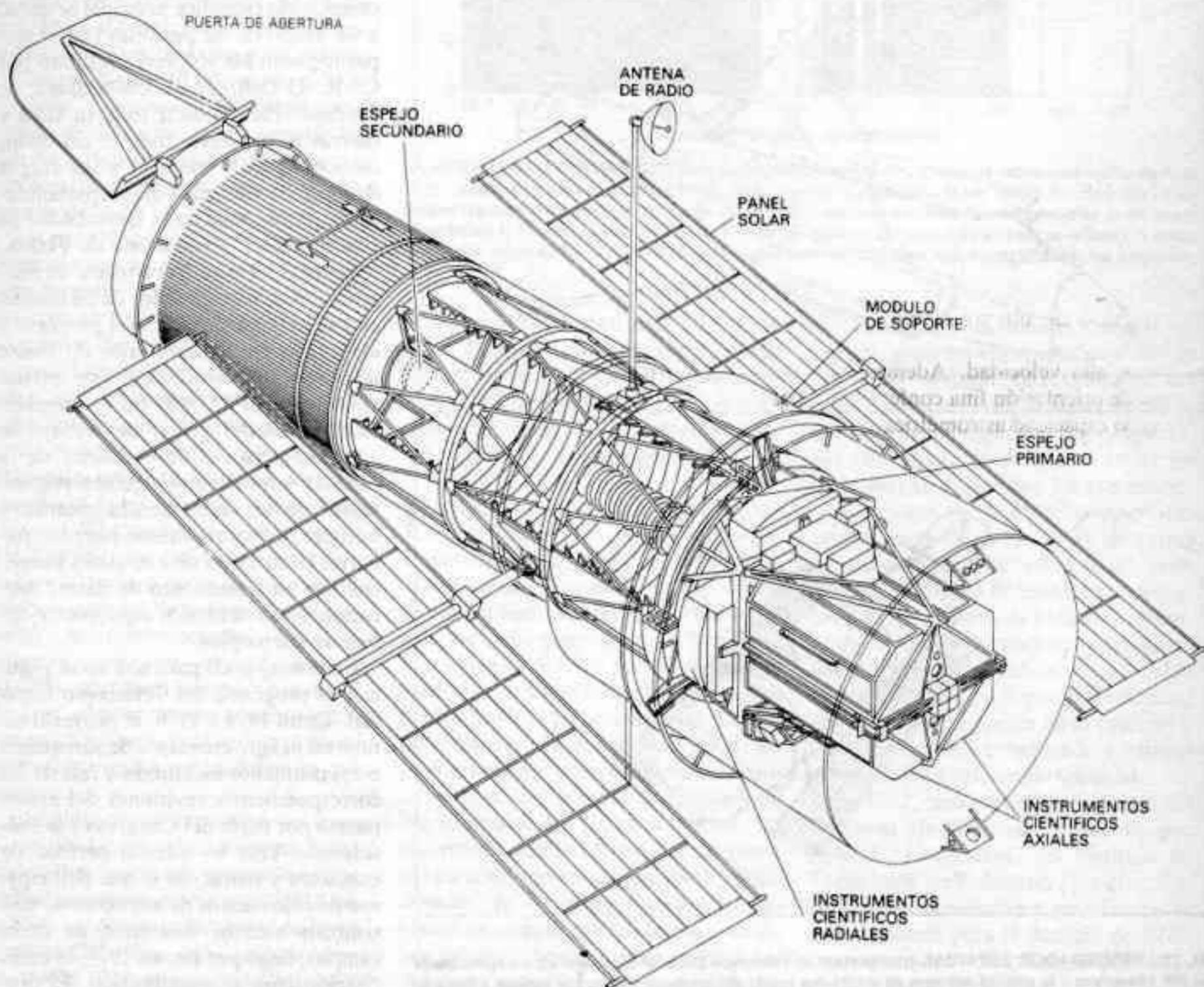
Para cuando se recibió la aprobación formal, los estudios acometidos con todo pormenor por la NASA habían resultado en un proyecto completo, que en su mayor parte se está siguiendo en la práctica de la construcción del observatorio. Consta el telescopio de dos superficies reflectoras hiperboloidales: el espejo cóncavo primario de 239 centímetros y un espejo secundario convexo mucho menor montado a unos 5 metros delante del primario. La luz incidente en el espejo primario es reflejada hacia el secundario; éste la dirige a través de un orificio situado en el centro del primario; la imagen se forma en un foco que está a más de un metro por detrás del primario. Se trata, pues, de un modelo de telescopio perteneciente al tipo Ritchey-Chrétien de sistema óptico Cassegrain.

Los instrumentos científicos que detectan y miden la radiación concentrada en el plano focal se albergan en un conjunto de cajas montadas detrás del espejo primario. Hay cuatro cajas alineadas paralelamente al eje óptico del telescopio y otras cuatro dispuestas radialmente alrededor del eje. De las cuatro cajas radiales, tres acomodan el sistema de orientación fina del telescopio. El tubo de éste se extiende más de 3 metros delante del secundario a fin de proteger el sistema óptico de luz parásita, la mayor parte de la cual es luz directa del Sol y luz solar difundida por la Tierra y la Luna.

Un sistema de deflectores internos suministra protección adicional. El equipo electrónico y otros dispositivos están alojados en una sección toroidal que rodea al tubo del telescopio por su base. Hacia la parte media se despliegan dos paneles de células solares, que sirven para suministrar energía al equi-

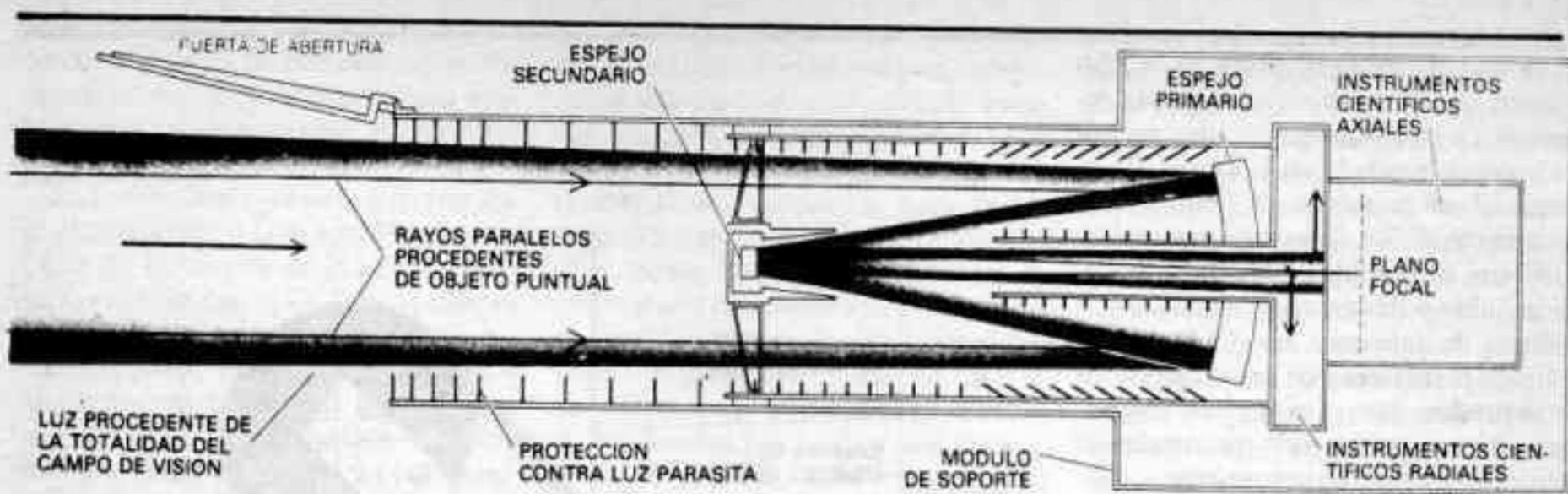
po, y dos radio-antenas paraboloideas para comunicar con la Tierra. El cuerpo cilíndrico del satélite mide 14 metros de longitud por 4,5 de diámetro, en números redondos.

La característica más notable del Telescopio Espacial será la calidad sin precedentes de las imágenes formadas en su plano focal. Las superficies ópticas rayarán la perfección que puede alcanzar la moderna tecnología: la desviación media de las dos superficies reflectoras respecto a su forma ideal no excederá los 10 nanómetros. Para evitar la distorsión térmica, los espejos están contruidos de vidrio de sílice fundida, que tiene un coeficiente de dilatación térmica extremadamente bajo. Además, se mantendrán termostáticamente a temperatura casi constante mientras se hallen en el espacio. Por control remoto se ajustará la posición de los espejos, en mutua referencia y con respecto a la superficie focal, para



EN ESTA PERSPECTIVA DE CONJUNTO del Telescopio Espacial en su configuración desplegada, los componentes internos se han dibujado en negro y los externos aparecen en rojo. El cuerpo cilíndrico del ingenio tiene aproxi-

madamente 13 metros de longitud y 4,25 de diámetro. Los instrumentos científicos se han construido de manera que puedan ser reemplazados por un astronauta provisto de traje espacial que trabajará desde el transbordador.



LA TRAYECTORIA DE LOS RAYOS LUMINOSOS en el Telescopio Espacial se dice que es "doblada": La luz procedente del espejo cóncavo primario se refleja en el espejo secundario convexo y atraviesa un agujero, en el centro

del primario, antes de llegar al foco en el plano imagen, situado en la sección instrumental a varios decímetros por detrás del espejo primario. Técnicamente, el telescopio se llama tipo Ritchey-Chrétien del sistema óptico Cassegrain.

dar una imagen lo más definida posible. El sistema de orientación fina tomará una referencia en las imágenes estelares de la parte más externa del campo de visión del telescopio; se espera, pues, que logre mantener el eje óptico fijo dentro de 0,01 segundos de arco durante 10 horas al menos. (Unas ruedas de reacción interna servirán para apuntar el telescopio y mantenerlo fijo; al ordenar a una rueda de éstas que gire más deprisa en una dirección, el telescopio entero girará en la opuesta.)

Desde su lanzamiento y durante sus primeros años de funcionamiento, en la sección destinada a ellos habrá seis instrumentos principales. Son los cinco primeros: una cámara gran angular/planetaria, cámara para objetos débiles, espectrógrafo de objetos débiles, espectrógrafo de alta resolución y fotómetro de alta velocidad. Además, el sistema de orientación fina conferirá al telescopio capacidad astrométrica, esto es, capacidad para medir las posiciones exactas de las estrellas. Aunque los dos espejos tendrán un alto rendimiento de reflexión para la radiación a todas las longitudes de onda en la región óptica del espectro, no se incluirá ningún instrumento sensible a la radiación infrarroja en la fase preliminar. Sin embargo, todas las características del observatorio se han programado con la idea de acomodar una posible inclusión futura de un instrumento sensible a la radiación con longitudes de onda de hasta un milímetro.

Las aberturas de entrada de los cuatro instrumentos montados axialmente están en el plano focal del telescopio. Allí el campo total de visión, que mide 28 minutos de arco en unidades angulares, tiene casi medio metro de diámetro lineal; la escala resultante de la imagen en el plano focal es de 3,58 segundos de arco por milímetro. Mediante órdenes adecuadas de orientación, se puede di-

rigir la imagen de cualquier objeto en el campo de visión hacia cualquiera de los cuatro instrumentos axiales o hacia el quinto, montado radialmente. Cada instrumento está proyectado de modo que se puede retirar en órbita e instalar en su lugar un nuevo instrumento, siempre que lo haga un operador del transbordador espacial provisto del traje espacial adecuado.

Un ordenador de a bordo, independiente de los instrumentos científicos, controlará el funcionamiento del observatorio y tomará a su cargo el flujo de datos. El ordenador será reprogramable, posibilitando la reforma de los métodos a medida que se adquiera experiencia con los instrumentos. Los astrónomos y controladores de vehículos espaciales comunicarán con el Telescopio Espacial mediante el Sistema de Seguimiento y Transmisión de Datos de la NASA. Todos los datos se transmitirán a la Tierra mediante este sistema, para ser entregados, por último, al Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial.

Los investigadores jefes de fila que habrían de hacerse cargo del desarrollo del conjunto inicial de instrumentos fueron elegidos tras una minuciosa y exigente selección. Para cuando se lance el satélite, cada investigador jefe, con sus respectivos colaboradores, habrán empleado más de ocho años construyendo un instrumento de aplicación general para uso potencial de todos los astrónomos. En recompensa a semejante esfuerzo, cada investigador principal y su equipo dispondrá de más de un mes de tiempo de observación.

El investigador responsable de la cámara gran-angular/planetaria es James A. Westphal, del Cal Tech. Este instrumento, como su nombre sugiere, puede operar de dos modos distintos: como cámara de gran campo o como cámara

de alta resolución apropiada, entre otras cosas, para realizar observaciones planetarias. En cada modo, el sistema de detección está constituido por cuatro dispositivos de carga acoplada (CCD) o "pastillas" microelectrónicas de silicio que convierten una disposición de luz incidente en una secuencia de señales eléctricas. Cada "pastilla" es un cuadrado que mide casi un centímetro y cuarto de lado y está subdividida en una distribución de pixels, o elementos de imagen, con 800 de ellos por lado. Por tanto, cada pastilla alberga un total de 640.000 pixels; la imagen mosaico de cuatro partes formada por un conjunto de cuatro CCD tendrá más de 2,5 millones de pixels. Cada pixel suministra una señal eléctrica proporcional al número de fotones, o cuantos de radiación electromagnética, que inciden sobre él durante la exposición.

La cámara planetaria y de gran campo está montada en el lado del telescopio que generalmente quedará al otro lado del Sol. La luz incidente que pasa a lo largo del eje óptico del telescopio se dirige hacia el exterior en ángulo recto mediante un espejo plano desviador, sostenido por un brazo rígido y situado formando un ángulo de 45 grados con el eje óptico. El espejo diagonal desvía sólo la parte central del haz incidente; el resto de la luz rodea el espejo para llegar a los otros instrumentos.

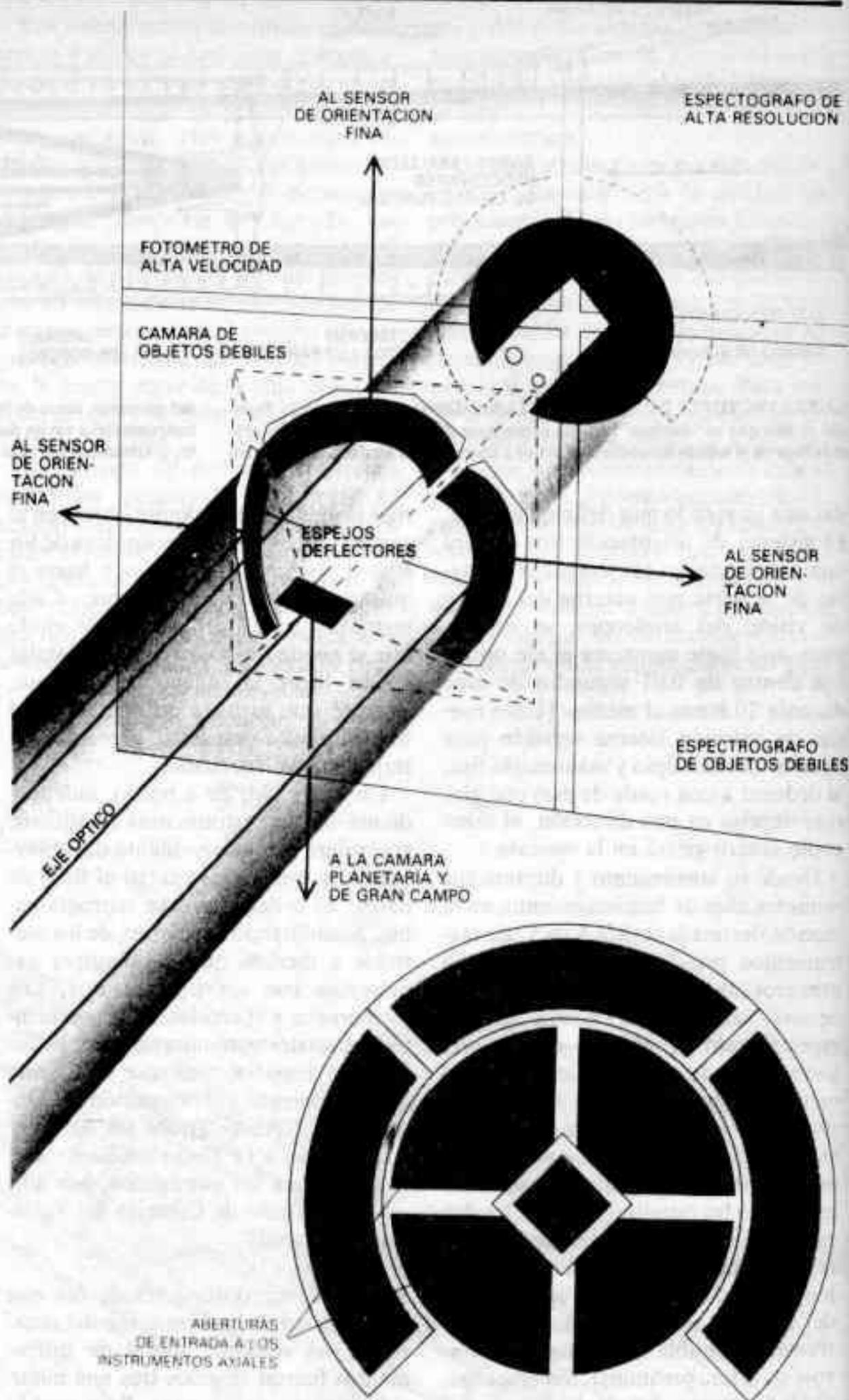
En el modo de gran campo, la cámara tiene un campo de visión cuadrado de 2,67 minutos de arco por lado, el mayor campo logrado hasta ahora en instrumento alguno. En este modo, cada pixel subtiende un ángulo de 0,1 segundos de arco. En cierto sentido, la cámara de gran campo compromete la resolución angular del telescopio a fin de proporcionar un campo de visión suficientemente grande que permita estudiar fuentes extensas; nebulosas planetarias, galaxias y cúmulos de galaxias.

Aun así, el campo de visión es mucho menor que el campo que se puede registrar en una placa fotográfica por un telescopio instalado en la Tierra. En el espacial, el campo queda limitado por el tamaño de los detectores microelectrónicos disponibles para la adquisición, almacenamiento y digitalización remota de imágenes. Los CCD para la cámara planetaria y de gran campo, suministrados por Texas Instruments, Inc., tienen más pixels que cualquier otro CCD usado en astronomía.

En el modo planetario, el campo de visión cuadrado de la cámara cubre, aproximadamente, una quinta parte del área del cielo que cubre en el modo de gran campo; en el modo planetario el campo mide 68,7 segundos de arco por lado; un pixel subtiende aquí un ángulo de 0,043 segundos de arco. La cámara planetaria aprovecha la casi totalidad de la resolución del sistema óptico, proporcionando al mismo tiempo un campo de visión que es más que adecuado para imágenes de disco completo de los planetas. La alta sensibilidad del sistema de detección CCD consiente el corto tiempo de exposición requerido para ciertas observaciones planetarias. Muchos astrónomos emplearían también el modo planetario para estudios de alta resolución de objetos galácticos y extragalácticos extensos.

La cámara planetaria y de gran campo sobresale entre los instrumentos del Telescopio Espacial por varios motivos. Recogerá, con gran diferencia, el mayor número de bits de información: más de 30 millones de bits por imagen. La respuesta espectral del detector será también la más amplia disponible entre todos los instrumentos del telescopio: la cámara será sensible a longitudes de onda que se extienden desde 115 nanómetros, en la región ultravioleta lejana, hasta 1100 nanómetros en el infrarrojo próximo. La amplia cobertura espectral se ha conseguido recubriendo los CCD con un fósforo orgánico, llamado Coroneno, que convierte fotones de radiación ultravioleta en fotones visibles, detectables por los sensores de silicio. La excelente respuesta en el extremo rojo de la banda visible es atribuible a la natural sensibilidad de los CCD.

Los CCD empleados tanto en el modo de gran campo como en el modo planetario tienen un bajo nivel de "ruido" eléctrico de fondo; resultan, pues, idóneos para construir imágenes de fuentes débiles. Parte del ruido en un dispositivo de esta clase es térmico, y se reducirá enfriando termoeléctricamente los detectores hasta aproximadamente -95 grados Celsius. El calor genera-



LUZ INCIDENTE DESVIADA en distintas direcciones por un sistema de pequeños espejos deflectores situados cerca del centro de la sección de instrumentos del Telescopio Espacial detrás del espejo primario. El espejo plano en forma de diamante montado diagonalmente sobre el eje óptico dirige la luz hacia fuera hasta la cámara planetaria y de gran campo montada radialmente. Los tres espejos planos en forma de arco, dispuestos alrededor de la parte más externa del haz incidente, envían la luz a tres sensores del equipo de orientación fina, también montados radialmente. La luz que logra evitar esos cuatro espejos se reúne en el plano imagen en las aberturas de entrada próximas a la parte anterior de las cuatro cajas de instrumentos montadas axialmente. Las proyecciones de los espejos deflectores sobre el plano focal aparecen en gris oscuro, en la vista en plano de la parte inferior. Como los espejos deflectores interceptan el haz incidente a bastante distancia del plano focal, las zonas oscurecidas por éstos quedan ligeramente agrandadas; las zonas adicionales en penumbra están representadas por el enmarcado en gris claro de las zonas correspondientes a las proyecciones de los espejos. En el plano focal, el campo de visión es de 28 minutos de arco de diámetro angular. La cámara planetaria y de gran campo ve una región cuadrada de unos tres minutos de arco por lado en el centro del campo. El resto del campo hasta un radio de nueve minutos de arco se divide en cuadrantes, cada uno de los cuales es el campo de visión de uno de los cuatro instrumentos que están montados axialmente. La parte más externa del campo, entre los 9 y 14 minutos de arco del eje óptico, es explorada por el sistema de orientación fina, que tiene por misión no solamente apuntar el telescopio espacial sino también tomar mediciones precisas de la posición que están ocupando las estrellas.

do por el sistema de enfriamiento se disipará mediante un radiador que formará parte de la superficie exterior del satélite.

La luz incidente sobre el instrumento se puede dirigir o bien sobre los cuatro CCD de la cámara de gran campo, o bien sobre los cuatro CCD de la cámara planetaria, merced a un espejo piramidal que puede hacerse girar 45 grados alrededor de su eje, lo que permite alojar dos sistemas ópticos esencialmente independientes en un solo compartimiento de instrumentos. Cualquiera de los 48 filtros se puede intercalar en el camino óptico. Así, la cámara de gran campo y planetaria es un instrumento extremadamente versátil que sirve para una amplia variedad de necesidades astronómicas. Mencionaremos aquí sólo dos de las muchas investigaciones que se emprenderán con este instrumento.

En ambos modos la cámara se empleará para obtener una serie de imágenes de ciertas estrellas próximas con el

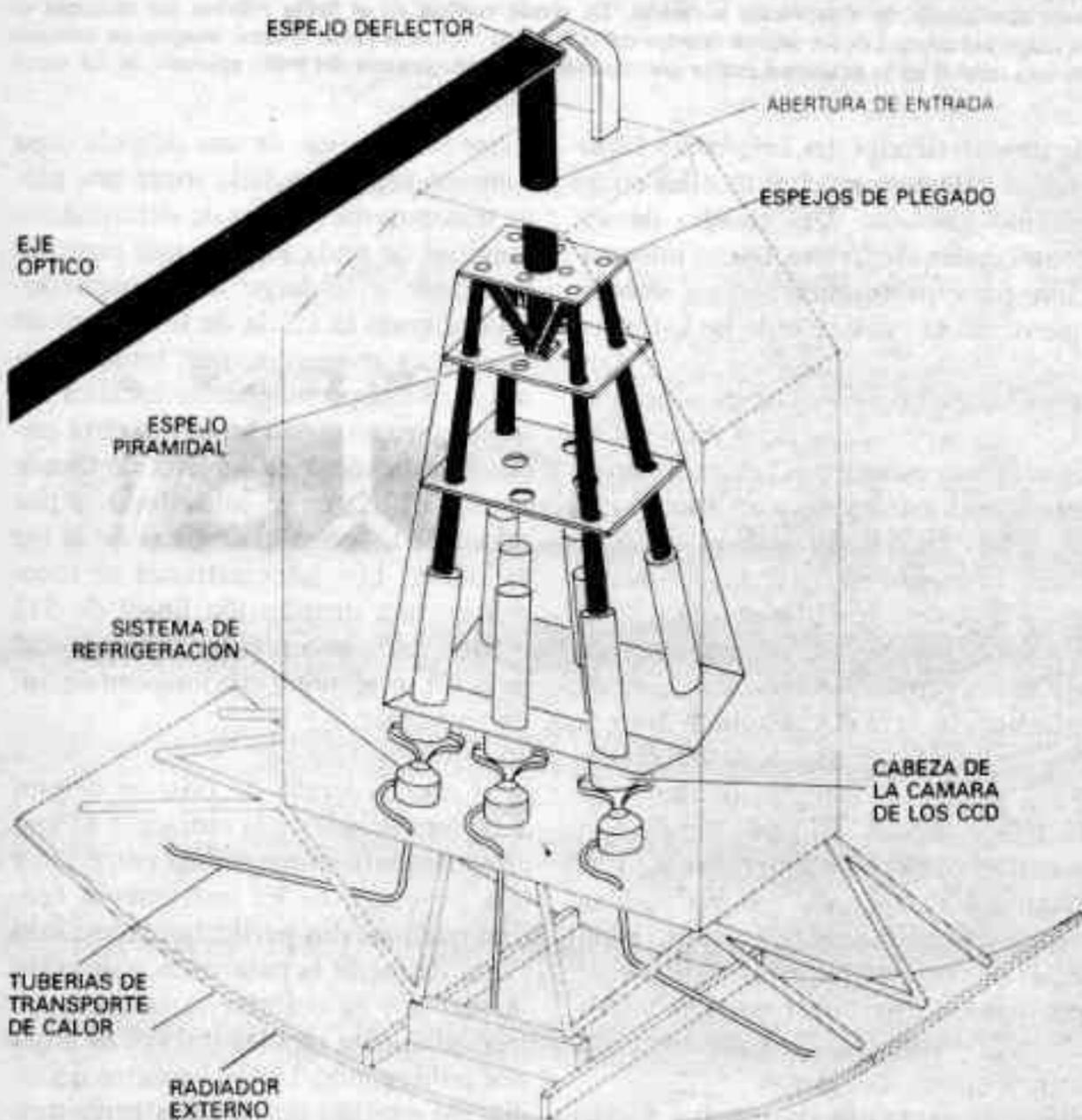
propósito de averiguar si tienen compañeros planetarios. La decena de estrellas seleccionadas para el estudio lo han sido porque todas ellas tienen un movimiento propio grande (es decir, movimiento a través del cielo). Si alguna de ellas posee un sistema planetario, y merced a la extraordinaria resolución y precisa orientación del Telescopio Espacial, podrían detectarse "balanceos" periódicos en la trayectoria de la estrella producidos por la atracción gravitatoria de un compañero invisible. Las medidas son difíciles, pero el ingenio espacial está capacitado para resolver la vieja cuestión de si hay sistemas planetarios semejantes al sistema solar entre las estrellas próximas.

Los quasars son los objetos del universo más distantes y de mayor energía conocidos. Cada fuente compacta de esas emite del orden de 100 veces más energía que una galaxia brillante integrada por 10.000 millones de estrellas. Se han propuesto varias teorías rivales que pretenden explicar de qué manera

un quasar produce tan enorme cantidad de energía en un espacio tan pequeño; pero ocurre que determinadas comprobaciones observacionales, cruciales y necesarias para decidir sobre la cuestión, son irrealizables con instrumentos que tengan su base de asiento en el suelo. Parten algunas teorías de la idea de que los quasars constituyen galaxias "enfermas"; en otras palabras, se supone que los quasars representan un estado transitorio, valetudinario, en la evolución de una galaxia que, por lo demás, es normal. Para someter a prueba esas teorías se obtendrán imágenes de los quasars en alta resolución con la cámara planetaria y de gran campo para determinar si los brillantes objetos que aparecen como fuentes puntuales desde la Tierra están rodeados por la luz más débil y difusa de una galaxia. Hasta debería poderse decidir si el quasar representa una fase enfermiza de las galaxias jóvenes o de las antiguas. Esta pregunta fundamental no admite hoy contestación, debido a la falta de nitidez que presentan las imágenes obtenidas con los instrumentos de nuestras instalaciones terrestres.

La cámara para objetos débiles que proporcionará la ESA es uno de los cuatro instrumentos montados axialmente. Tiene por cometido principal aprovechar todo el potencial óptico del telescopio. Detectará con éste los objetos visibles más débiles y registrará imágenes que encierren la máxima resolución angular que se puede alcanzar con el sistema óptico. F. Macchetto, de la ESA, es el científico que dirige el proyecto de la cámara para objetos débiles.

Dicha cámara complementa en varios aspectos la cámara planetaria y de gran campo. La de objetos débiles tendrá una mayor resolución espacial, mientras que la segunda tendrá un mayor campo de visión. En la región espectral entre 120 y 400 nanómetros, la cámara para objetos débiles conseguirá una imagen antes que la planetaria y de gran campo. Sin embargo, en las longitudes de onda mayores, hacia el rojo, la cámara planetaria y de gran campo será más rápida. Además de construir imágenes, la cámara para objetos débiles podrá determinar la polarización de la radiación detectada y tomar mediciones espectroscópicas de objetos puntuales y de objetos extensos. No se trata de duplicar el trabajo sino de asegurarse de que, siendo sus funciones muy parecidas, haya al menos en servicio una de ellas entre los instrumentos iniciales, en la hipótesis de que fallase la otra.



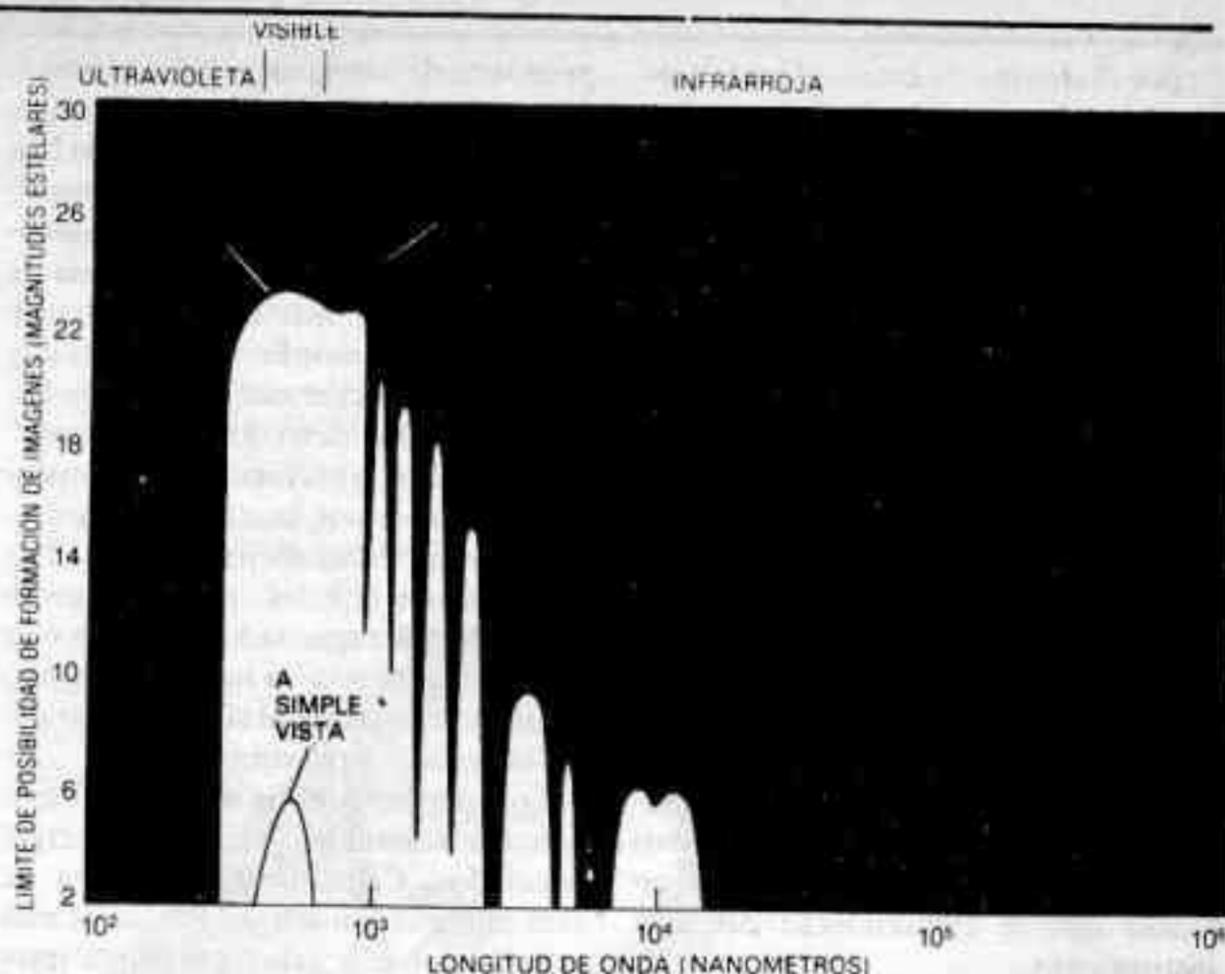
LA CÁMARA PLANETARIA Y DE GRAN CAMPO es uno de los instrumentos a incluir en el Telescopio Espacial durante sus primeros años de funcionamiento. La cámara está proyectada para funcionar de dos modos. En cada uno de ellos, el sistema de detección consta de una distribución rectangular de cuatro "pastillas" de silicio sensibles a la luz, llamadas dispositivos de carga acoplada (CCD). La luz incidente, reflejada en el compartimiento de instrumentos montado radialmente por el espejo deflector diagonal, puede dirigirse hacia cualquiera de los cuatro CCD de la cámara de gran campo o los cuatro CCD de la cámara planetaria de alta resolución mediante un espejo piramidal que gira hasta 45 grados alrededor de su eje. En el camino del haz podrá introducirse un filtro cualquiera de entre 48 distintos. El radiador externo sirve para disipar el calor generado por el sistema de refrigeración asociado a los detectores.

En la cámara de objetos débiles se han previsto dos sistemas ópticos análogos e independientes para formar la imagen de una fuente puntual. Uno posee un campo de visión cuadrado muy pequeño, de 11 segundos de arco por lado; tiene un tamaño de pixel de sólo 0,022 segundos de arco. El campo de visión del otro sistema abarca 22 segundos de arco por lado y ofrece un tamaño de pixel de 0,044 segundos de arco. En ambos, el detector está constituido por un dispositivo intensificador de imagen semejante al tubo de rayos catódicos sensible a la luz en una cámara de televisión. A diferencia de los CCD de la cámara planetaria y de gran campo, un detector de esta clase cuenta fotones uno a uno.

La cámara de objetos débiles se ha proyectado de suerte que las imágenes de una fuente puntual producida por el telescopio sean exploradas por varios pixels. De aquí que sea el instrumento a elegir cuando se necesiten la máxima resolución posible y el máximo contraste contra el fondo del cielo. La cámara se hallará habilitada también para abordar estudios espectroscópicos y polarimétricos de objetos comparativamente débiles. Podrá enfocar objetos extremadamente débiles con un tamaño de pixel menor incluso (aproximadamente 0,007 segundos de arco).

Se espera que las tareas científicas de la cámara planetaria y de gran ángulo y de la de objetos débiles se superpongan. En razón de la resolución específica, campo de visión y región espectral requerida, un observador podrá elegir trabajar con una u otra. Mencionaremos aquí un tipo de observación en el que se recomienda el recurso a la cámara de objetos débiles.

Los cúmulos globulares son conjuntos esféricos de millones de estrellas que se ven desde la Tierra en una noche clara con un telescopio pequeño o incluso con gemelos. Como todas las estrellas del cúmulo se encuentran a la misma distancia del sistema solar, se pueden poner a prueba los modelos teóricos de la evolución estelar mediante el simple recuento del número de estrellas de cada clase en el cúmulo. La teoría clásica predice que cada cúmulo globular debe contener entre 10.000 y 100.000 de las estrellas llamadas enanas blancas. Estos objetos compactos representan la última fase en la evolución de las estrellas que han agotado su combustible nuclear, se han enfriado y han colapsado. En razón de su extrema debilidad, no pueden verse las enanas blancas a las grandes distancias de los cúmulos globulares con instrumentos instalados en el suelo. Pero la cámara



DOMINIO DE LONGITUDES DE ONDA potencialmente accesible al Telescopio Espacial. Se extiende desde la parte ultravioleta lejana del espectro (izquierda) hasta el infrarrojo lejano (derecha). Para comparación, se indican también las bandas espectrales que pueden contemplarse a simple vista y con auxilio de un gran telescopio instalado en la Tierra (en este caso el telescopio Hale de 5 metros del Monte Palomar) bajo condiciones de observación normales. La escala vertical da el brillo relativo (en términos de la magnitud estelar) de los objetos celestes más débiles de los que se puede obtener imagen; un aumento de una unidad en la magnitud estelar corresponde a una disminución del brillo aparente de 2,5 veces.

de objetos débiles del Telescopio Espacial, si detectará muchas de ellas en un cúmulo globular. Del estudio de sus propiedades sacaremos buena información para profundizar en el conocimiento de la evolución de las estrellas.

El Telescopio Espacial dispondrá de dos espectrógrafos, o dispositivos ópticos que escinden la luz incidente de una fuente astronómica en haces separados de acuerdo con su longitud de onda. En espectroscopía, la resolución suele definirse como la relación de la longitud de onda de la luz incidente a la mínima separación que se puede medir entre dos longitudes de onda. Uno de los dos espectrógrafos a bordo del observatorio, el de objetos débiles, contemplará objetos estelares débiles con una resolución espectrográfica de 1000 (equivalente a medir una anchura de banda de una milésima parte de la longitud de onda). El investigador jefe del proyecto de este instrumento es Richard J. Harms, de la Universidad de California en San Diego.

El espectrógrafo de objetos débiles irá equipado con dos sistemas de detectores. Los dos son dispositivos llamados Digicon: uno es sensible a la luz roja y el otro a la azul y la ultravioleta. El sensor Digicon se basa en el efecto fotoeléctrico. La luz incidente es dispersada según su longitud de onda mediante una red de difracción, e incide

sobre la superficie de una delgada capa fotocatódica depositada sobre una placa transparente. La luz de determinada longitud de onda alcanza una posición particular a lo largo del fotocátodo, produciendo la salida de un chorro de electrones conocidos por fotoelectrones. Un campo magnético focaliza los fotoelectrones hacia un punto cuya posición dependerá de aquella de donde emerja el haz en el fotocátodo, y por tanto, de la longitud de onda de la luz incidente. Los fotoelectrones se recogen en una distribución lineal de 512 diodos; cada uno registra la intensidad de la luz incidente a una longitud de onda particular.

El espectrógrafo de objetos débiles será sensible a la radiación de longitud de onda comprendida entre 115 y 800 nanómetros. El instrumento tendrá, además, dos particularidades: será capaz de medir la polarización de la luz incidente y de detectar variaciones extremadamente rápidas (tal vez de algunos milisegundos) en el espectro de radiación emitido por fuentes brillantes. Habida cuenta de que la investigación de muchos problemas astronómicos depende del análisis espectral de la radiación procedente de objetos extremadamente débiles, se espera que el instrumento sea uno de los más activos en el Telescopio Espacial. Midiendo los espectros de cuasars muy distantes, por

ejemplo, averiguaremos qué propiedades adornaban al universo de hace más de 10.000 millones de años, el 85 por ciento del tiempo transcurrido desde el origen (si, como supone el modelo cosmológico corriente de la gran explosión, el tiempo tuvo en realidad un origen). Se espera que los espectrogramas de los cuasars más distantes indiquen la constitución de la materia en esa fase primitiva de la evolución del universo.

La investigación de ciertas cuestiones astronómicas requiere una resolución mayor que la que se puede alcanzar con el espectrógrafo de objetos débiles, porque la anchura de muchos rasgos de la emisión y la absorción es menor que la anchura de banda de medida del instrumento. El espectrógrafo de alta resolución satisfará esta necesidad. Bajo condiciones de funcionamiento normal, tendrá una resolución de 20.000. Las estrechas características espectrales que ni siquiera podrían detectarse con el espectrógrafo de objetos débiles, de resolución más baja, se medirán con

precisión, informándonos de cuales serían las condiciones físicas bajo las cuales se emitió la radiación. El espectrógrafo de alta resolución tendrá también un modo de operación en resolución ultra-alta, en el que la resolución espectrográfica se mejorará multiplicándola por aproximadamente 5 hasta alcanzar alrededor de 100.000. El investigador jefe a cuyo cargo corre el espectrógrafo de alta resolución es John C. Brandt, de Goddard.

Esa elevada resolución del segundo espectrógrafo se cobra su precio. Dividir el espectro en un número mucho mayor de bandas al objeto de calcular el flujo de fotones que discurre por cada banda comporta rebajar el número de fotones detectado en cada banda. Así, la mayor resolución se traduce en menor sensibilidad, y la mayor cantidad de información suministrada por el espectrógrafo de alta sensibilidad se puede obtener sólo para estrellas que brillen 60 veces más que las que

pueden estudiarse con el espectrógrafo de objetos débiles. Esta diferencia corresponde a unas 4,5 magnitudes estelares. Para el modo de resolución ultra-alta, la diferencia de brillo corresponde a un factor de más de 300, equivalente a unas seis magnitudes estelares.

El espectrógrafo de alta resolución va equipado con seis redes de difracción intercambiables; cada red dispersa luz de diferentes longitudes de onda en direcciones distintas. Un espejo o red de la cámara forma entonces una imagen del espectro sobre la superficie emisora de electrones de un sensor Digicon. Girando el armazón circular sobre el que están montadas las redes, llevaremos cualquiera de ellas hasta el camino óptico del instrumento, lo que permite obtener lecturas espectroscópicas para cualquier longitud de onda entre 110 y 320 nanómetros.

Este espectrógrafo, con su resolución normal, estará preparado para observar estrellas muy débiles, incluso las de magnitud 13, lo que viene a suponer



MEJORA DE DIEZ VECES en la resolución espacial: tal progreso se espera lograr con el Telescopio Espacial, lo que permitirá a los astrónomos realizar observaciones más detalladas de objetos extensos. En esta simulación, la foto-

grafía de la izquierda representa la imagen de una galaxia espiral obtenida con el telescopio Hale de 5 metros y la fotografía a la derecha representa la correspondiente imagen obtenida con el Telescopio Espacial. En realidad, la

unas seis magnitudes estelares más débiles que las distinguibles con el telescopio *Copernicus*. Aunque no cabe hablar de un gran adelanto en lo que a sensibilidad se refiere sobre el espectrógrafo del Explorador Ultravioleta Internacional —unas cuatro magnitudes—, la resolución espectrográfica y la precisión fotométrica serán apreciablemente mejores en el instrumento del Telescopio Espacial.

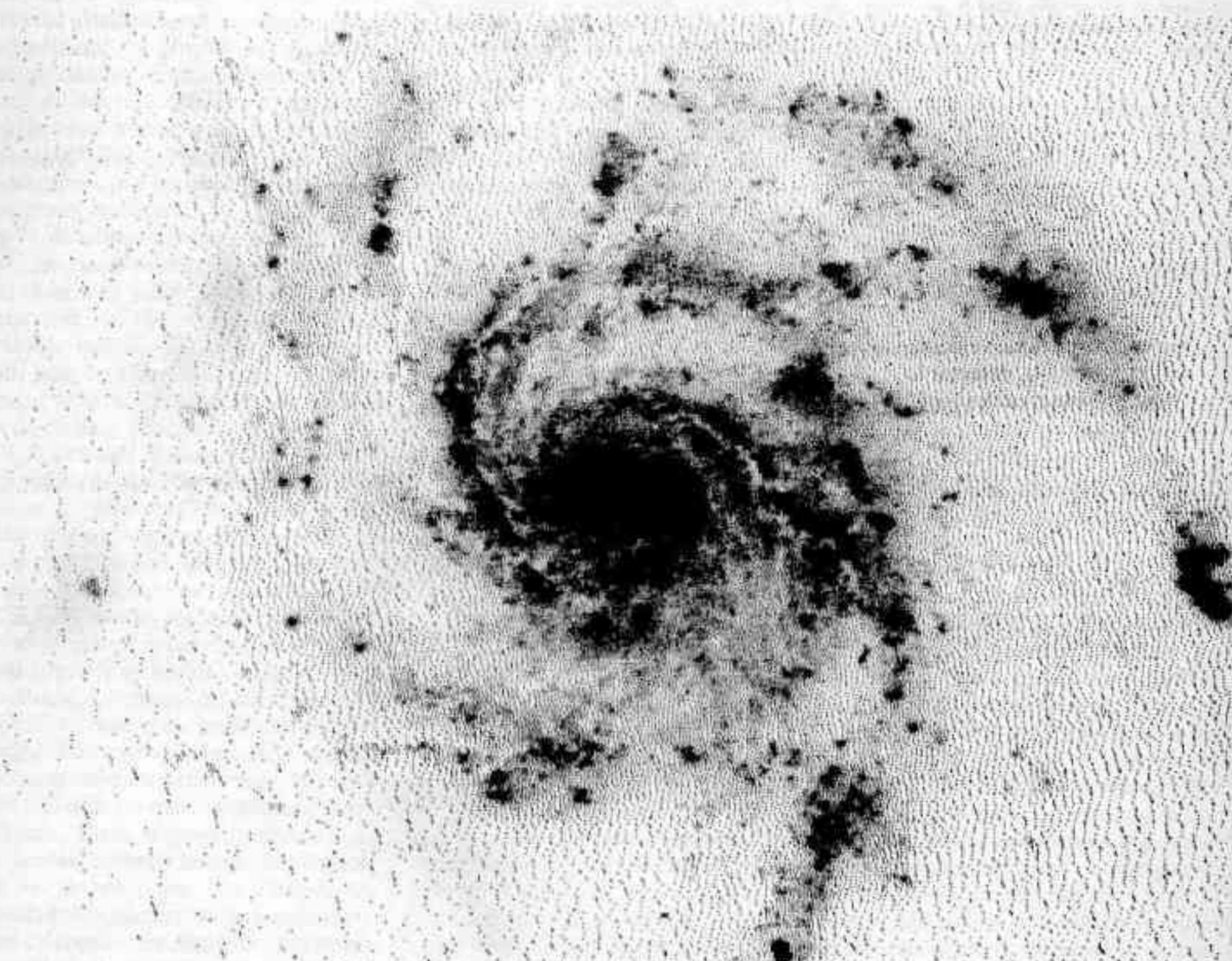
La potencia de este instrumento abrirá interesantes líneas de investigación. El espectrógrafo de alta resolución facilitará, por ejemplo, el estudio del gas interestelar en puntos de nuestra galaxia y de otras donde ahora no se puede observar. Medidas preliminares realizadas por el Explorador Ultravioleta Internacional han mostrado que, en el gas en el "halo" galáctico entre la Tierra y la galaxia vecina más próxima (una de las dos nubes de Magallanes), hay átomos de carbono a los que faltan tres electrones, lo que indica que la temperatura en esta región es de alre-

dedor de 100.000 grados Kelvin. Con el espectrógrafo de alta resolución se obtendrán datos mucho más precisos, que quizá revelen la relación entre este gas y la materia todavía más caliente detectada por el *Copernicus*. Las medidas que se tomen sobre cómo varían las propiedades de nuestra galaxia de un lugar a otro aportarán las claves que se necesitan sobre la evolución del sistema como un todo.

El espectrógrafo de alta resolución se aplicará también al estudio de nubes interestelares. Las observaciones de tales nubes hechas desde la Tierra apenas han podido detectar algunas rayas oscuras en el espectro, originadas cuando el gas de la nube absorbe la radiación procedente de las estrellas del fondo. En muchos casos, cada línea de absorción se divide en configuraciones múltiples, que pueden atribuirse a nubes distintas a lo largo de la misma visual. Las nubes se mueven con diferentes velocidades acercándose al sistema solar o alejándose de él, lo que altera las longi-

tudes de onda características cuando absorben radiación. La separación de las líneas de absorción permite estudiar las nubes en sí mismas, siempre que sea suficiente la resolución del espectrógrafo. Con el de alta resolución llegaremos a analizar un amplio intervalo de características de absorción de varios átomos y moléculas y, por tanto, determinar las condiciones físicas de cada nube. Nuestro conocimiento sobre la manera en que tales nubes se agrupan y contraen para formar estrellas quizá dependa, ineludiblemente, de los resultados de tales estudios.

A Robert C. Bless y sus colaboradores, de la Universidad de Wisconsin en Madison, se les ha asignado el desarrollo del fotómetro de alta velocidad. Será su cometido realizar medidas de alta precisión, y con una resolución extraordinaria en tiempo, de la intensidad de la luz procedente de fuentes astronómicas a lo largo de un amplio intervalo de longitudes de onda. El fotó-



fotografía de la derecha es una versión digitalizada de una fotografía de una galaxia próxima tomada con el telescopio de 5 metros y la de la izquierda es una versión borrosa de la misma imagen obtenida desenfocando el original en

una cuantía proporcional a la diferencia en la resolución efectiva que puede conseguirse con los dos instrumentos. Esta simulación fue preparada por John L. Tonry, adscrito al Instituto norteamericano de Estudios Avanzados.

metro podrá distinguir sucesos que disten en el tiempo 10 microsegundos escasos. A causa de las fluctuaciones de la atmósfera, resultan difíciles, si no imposibles, las observaciones terrestres de fuentes cuya variación en el tiempo sea de este orden.

El fotómetro de alta velocidad es el más sencillo de cuantos instrumentos conformen el grupo inicial que se instalará a bordo del Telescopio Espacial. Carece de partes móviles. Su éxito depende enteramente de la finura con que se pueda orientar el vehículo espacial para dirigir la luz de un blanco astronómico sobre una de sus 100 o más combinaciones de filtros espectrales y aberturas de entrada. El fotómetro posee cuatro detectores independientes, enfocados magnéticamente, que se llaman disectores de imagen; su funcionamiento recuerda al de los tubos fotomultiplicadores, salvo en que se puede limitar su respuesta a la presencia de fotoelectrones procedentes de la pequeña región del fotocátodo sobre el cual está incidiendo la luz. Cada disector de imagen se monta detrás de una placa que soporta un conjunto de filtros y aberturas de entrada.

La respuesta espectral global del disector de imagen se extiende de 115 a 650 nanómetros. El instrumento está también equipado con un tubo fotomultiplicador sensible al rojo y un sistema para medir la polarización de la radiación ultravioleta con ayuda de uno de los disectores de imagen.

El fotómetro de alta velocidad podrá, en principio, detectar los menores objetos observables con cualquier instrumento del Telescopio Espacial. La posibilidad de llegar a distinguir entre sucesos separados en el tiempo por sólo 10 microsegundos implica, según la teoría especial de la relatividad, que se puedan detectar también variaciones en la intensidad de emisión de una estrella de diámetro no mayor de tres kilómetros: una dimensión lineal extraordinariamente pequeña para una estrella. De hecho, se acerca al diámetro que tendría el Sol si se comprimiésemos hasta la densidad que lo transformara en un agujero negro. Lo que nos lleva de la mano a otra peculiaridad: uno de los programas de observación previstos para el fotómetro de alta velocidad es la búsqueda de variaciones de suma rapidez en sistemas astronómicos de los que se sospecha alojen un agujero negro, en la esperanza de hallar ulteriores indicaciones de la existencia de esos entes escurridizos. El fotómetro de alta velocidad se usará también para observaciones menos

exóticas: verbigracia: identificación de objetos ópticamente débiles observados sobre todo en longitudes de onda de radio o de rayos X.

Bajo las mejores condiciones de observación, las medidas de posición de cualquier estrella realizadas desde el suelo están limitadas por el tamaño del borroso "disco visible" de la estrella, que por lo general suele tener un segundo de arco de diámetro, al menos. En la determinación de la distancia angular entre dos estrellas es típica una incertidumbre de 0.1 segundos de arco, es decir, una décima parte del diámetro de la imagen estelar, para una sola observación. Promediando muchas observaciones, la incertidumbre se reduce a aproximadamente 0.01 segundos de arco. Los errores accidentales se traducen en las correspondientes incertidumbres en la determinación del paralaje de una estrella. (El paralaje es la variación angular media de la posición aparente de una estrella resultante de la revolución de la Tierra alrededor del Sol.) La determinación de distancias que trascienden el sistema solar se basa en gran medida en la determinación del paralaje de estrellas bastante próximas. Como la medida de una imagen estelar con el Telescopio Espacial se realizará con error inferior a 0.002 segundos de arco, la determinación de la posición de las estrellas, y por tanto del paralaje estelar, deberá ser cinco veces mejor que con los telescopios terrestres. Esa quintuple mejora en la precisión de las medidas de paralaje estelar encierra una importancia fundamental en toda la astronomía estelar. Por ejemplo, conociendo la distancia precisa de ciertos cúmulos de estrellas bastante jóvenes de nuestra galaxia, los astrónomos determinarán el brillo absoluto de las estrellas en los cúmulos. A su vez, este conocimiento permitirá prolongar la escala calibrada de distancia, que se basa en la comparación de los brillos aparente y absoluto, hasta estrellas que se encuentran mucho más alejadas.

La razón de que se haya incorporado en el ingenio espacial un instrumento exclusivo para astrometría es la siguiente: el sistema de orientación fina, suficientemente preciso, realizará las necesarias medidas de la distancia angular entre estrellas. William H. Jefferys, de la Universidad de Texas en Austin, dirige el grupo de astrometría.

El tiempo de observación del nuevo y potente telescopio se repartirá entre astrónomos de todas las partes del mundo a través del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, que tendrá la responsabilidad de facilitar el uso

científico más eficaz. A fin de proporcionar a los astrónomos visitantes los sistemas de funcionamiento que rindan más, ayudar y aconsejar a los observadores sobre el mejor uso de los distintos instrumentos y crear una estimulante atmósfera de investigación, se está reclutando astrónomos de primera fila en los Estados Unidos y fuera de esa nación que deseen entrar en la plantilla del Instituto. Dedicarían la mitad de su tiempo a las necesidades del centro y la otra mitad quedaría disponible para sus propios programas de investigación. El nuevo instituto asesorará a la NASA acerca de las líneas generales de la política a seguir en asuntos relacionados con el Telescopio Espacial. Se pretende asegurar la participación de los astrónomos ajenos al Instituto en la política de éste a través de la creación de comités externos.

El Instituto solicitará propuestas externas para programas de observación específicos. Con ayuda de grupos de evaluación independientes, examinará las propuestas y seleccionará los proyectos más prometedores para su inclusión en el programa de trabajo del Telescopio. En muchos casos, los programas seleccionados se combinarán con los presentados por los grupos originales que se encargaron de los instrumentos científicos del telescopio, por otros miembros del grupo de trabajo del Telescopio y por los grupos europeos. El programa final y la preparación de la lista completa de instrucciones para el ordenador de mando será preparado por la NASA, que se reserva la responsabilidad del funcionamiento diario del observatorio.

Los astrónomos del Instituto aconsejarán a los astrónomos externos sobre la formulación de planes de observación. Otros astrónomos de la plantilla vigilarán el mantenimiento de la calibración de los instrumentos y de la elaboración inicial de los datos. Especialistas en ordenadores ayudarán a desarrollar los programas adecuados a usar por los astrónomos en el análisis de los datos. Finalmente, el Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial pondrá en manos de los astrónomos los medios que necesiten a la hora de comunicar los resultados de sus estudios.

El Telescopio Espacial habrá de servir para resolver muchos rompecabezas astronómicos de carácter básico. Lo más emocionante, sin embargo, se producirá cuando las imágenes devueltas por el satélite revelen cosas que ninguno de la presente generación de astrónomos había soñado, fenómenos que quizá sólo la próxima generación tenga el privilegio de llegar a comprender.

Los Cometas y el Origen de la Vida

2ª Parte

A.H. Delsemme

Departamento de Física y Astronomía
Universidad de Toledo-Ohio-EE.UU.

(De una conferencia pronunciada por el autor en la 5ª Reunión Regional Europea de Astronomía, Lieja, Jul. 28 - Ago. 1º 1980 y publicada en "Variability in Stars and Galaxies". Traducción autorizada de la versión francesa publicada en L'Astronomie.)

6 - CRONOLOGIA

El cuadro IV presenta una cronología del Universo: el "Gran Estallido" en el origen de todas las cosas, se sitúa hace dieciséis mil millones de años. La supervivencia de los elementos radiactivos nos dice que nuestra Galaxia existía ya, sin duda, hace once mil millones de años. Las estrellas de primera generación elaboraban y dispersaban el carbono, el nitrógeno y el oxígeno en los subsiguientes cinco o seis mil millones de años. Las estrellas de las generaciones siguientes podían sin duda formar sistemas planetarios como el nuestro, en pequeña cantidad, hace ocho o diez mil millones de años. Nuestro Sistema Solar nació unos 4,6 mil millones de años atrás. Su edad —más específicamente el momento de la aglome-

ración de la materia sólida en cuerpos de un cierto tamaño— se conoce con gran precisión, particularmente gracias a la concordancia de las edades de todos los meteoritos: 4.560 millones de años. Los continentes, los océanos y la atmósfera primitiva se estabilizaron más o menos al final de los primeros quinientos millones de años y la vida apareció *inmediatamente* después, sin duda hace 3.800 millones de años, o quizás también antes, es decir, posiblemente aún antes de que la superficie de la Tierra se haya enfriado completamente del calor debido a su aglomeración.

Los últimos cinco mil millones de años se presentan más detalladamente en el cuadro V. Es aquí donde abordamos la geología, es decir, el segundo panel del tríptico

Cuadro III

LAS MOLECULAS INTERESTELARES Y COMETARIAS SE ASEMEJAN:

- 1 - Nueve moléculas cometarias se encuentran en el espacio:

CH C₂ CN CO CS HCN CH₃CN OH H₂O

Tres moléculas cometarias son fragmentos inmediatos de moléculas interestelares.

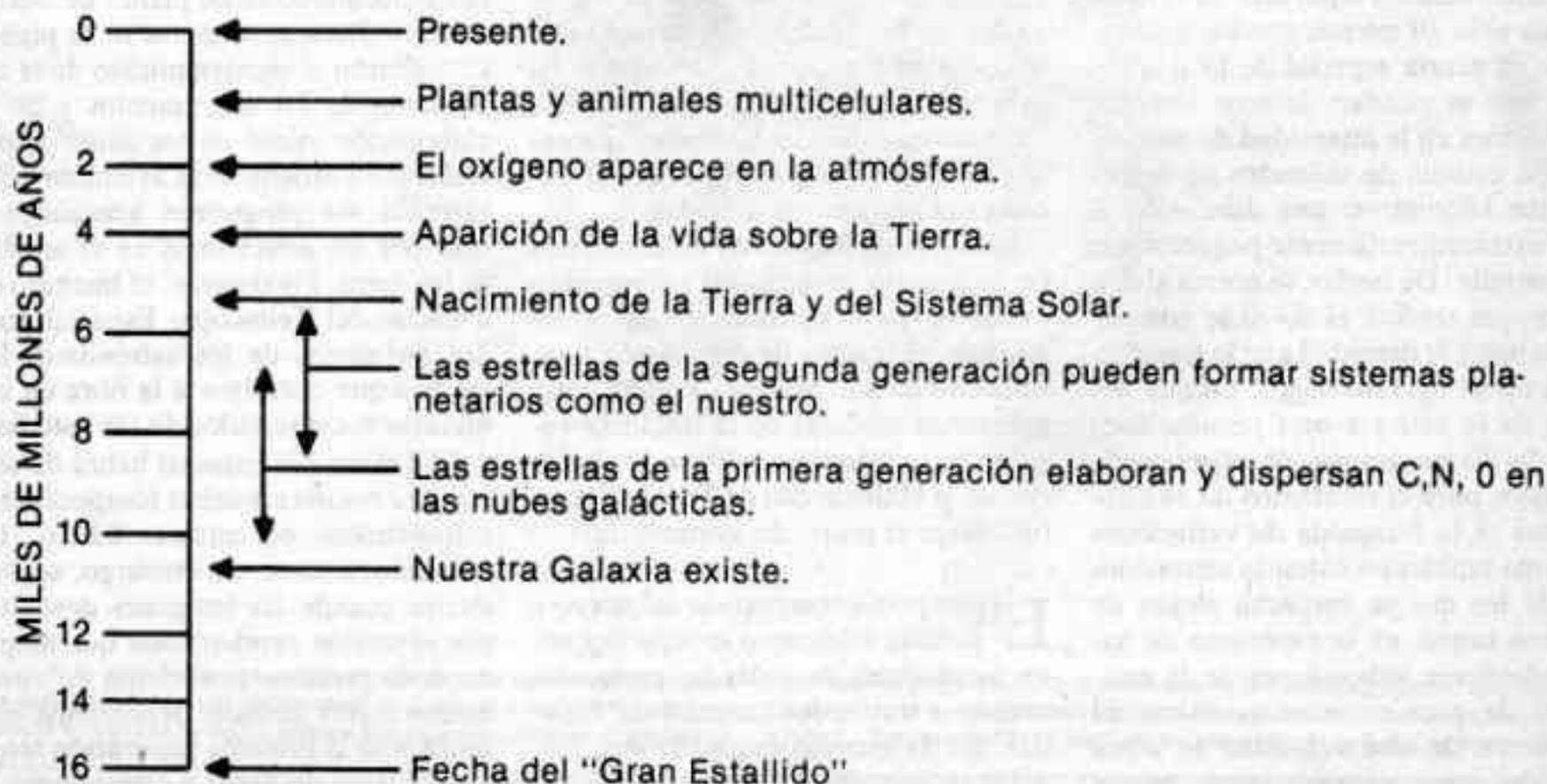
moléculas cometarias: C₃ NH NH₂

moléculas interestelares: C₃N NH₃

- 3 - Las moléculas interestelares orgánicas más complicadas (cuadro II) pueden dar *todas* los fragmentos moleculares observados en los cometas.

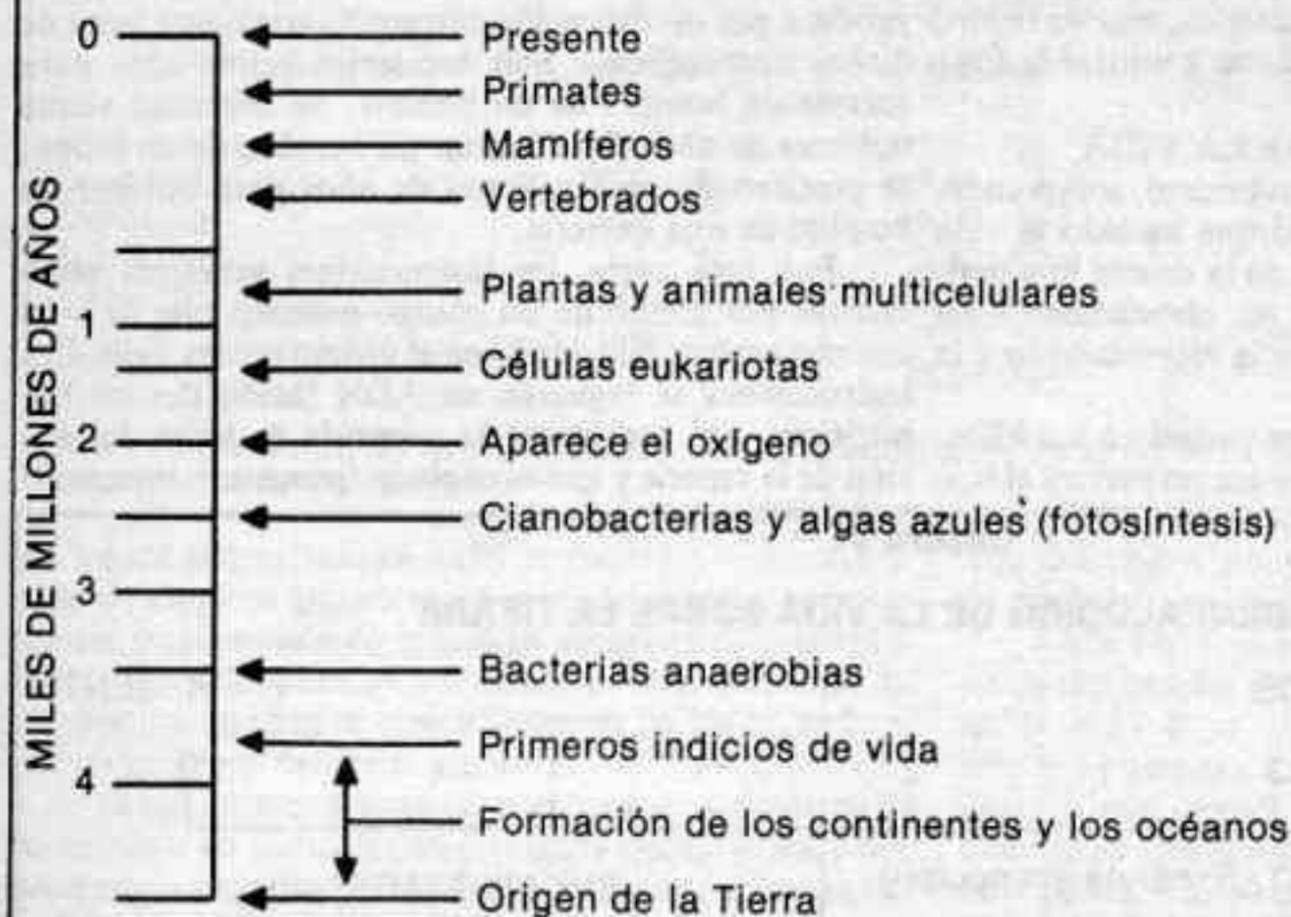
Cuadro IV

CRONOLOGIA DEL UNIVERSO



Cuadro V

CRONOLOGIA DE LA TIERRA



mencionado al comienzo. Esta ciencia ha establecido recientemente que los primeros miles de millones de años de la Tierra no han sido utilizados para hacer *aparecer* la vida, sino precisamente para hacerla *evolucionar*; evolucionar particularmente formas microscópicas hasta alcanzar las formas multicelulares de la talla del hombre. En los estratos geológicos anteriores a seiscientos millones de años, los primeros geólogos nos enseñaban que no existían fósiles. Era sencillamente (para decirlo de una manera un poco simplista) porque ellos no habían mirado en el microscopio. El triunfo de la geología de los últimos decenios es mostrarnos que la vida ha evolucionado continuamente durante tres o cuatro mil millones de años, pero a través de formas microscópicas que dejan huellas difíciles de observar e interpretar.

7 - HISTORIA DE LA VIDA

Las primeras formas de vida (al menos las que han sido detectadas) eran bacterias, principalmente esférulas de uno a diez micrómetros de diámetro, limitadas por una membrana y capaces de elaborar proteínas y ácidos nucleicos. El oxígeno de la atmósfera apareció muy tarde, como residuo de contaminación debido al metabolismo de las cianobacterias que habían prosperado muy bien y se estaban multiplicando profusamente. El oxígeno es, en cierto modo, un veneno que quema y destruye lo que toca; es uno de los milagros de la evolución de la vida que los animales y nosotros mismos pudiéramos no solamente sobrevivir al mismo, sino también utilizarlo.

La vida actual está dominada por las plantas y los animales multicelulares, que aparecieron y evolucionaron en los últimos quinientos millones de años. Sin embargo restan comunidades de bacterias anaerobias del género de aquellas que produjeron los estromatolitos fósiles, y que viven todavía en los fangos sulfurados y los pantanos ricos en metano, y también como parásitos o en simbiosis en nuestros intestinos. Se espera que su estudio nos revelará muchos sobre los orígenes de la vida ya que es evidente que el ochenta y cinco por ciento

de la historia total de la vida sobre la Tierra corresponde a los microbios, que se desarrollaron en las aguas de los océanos primitivos. No sorprende, por lo tanto, que el agua líquida sea el constituyente principal de *todas* las formas de la vida.

Las innovaciones más importantes introducidas por la evolución en los animales terrestres están destinadas a permitirles vivir en un medio hostil como consecuencia de la escasez de agua.

No nos equivoquemos: estas innovaciones aportadas por los primeros animales multicelulares han exigido una transformación tan fundamental como la que necesitaríamos desarrollar actualmente para habituarnos a vivir en el vacío del espacio.

Hay que rendirse a la evidencia, entonces, que la extraordinaria abundancia de todas las formas de vida ha salido de bacterias microscópicas que vivían en el mar hace tres mil millones de años. En el cuadro VI he representado una treintena de ramas del árbol genealógico de la vida sobre la Tierra. De hecho, conocemos más de dos millones de las mismas. Por otra parte, investigaciones publicadas en Julio de 1980 han ampliado considerablemente el árbol genealógico de las bacterias y lo han extendido a dos mil millones de años más. Estas investigaciones recientes han sido incorporadas al cuadro VI.

Si observamos actualmente las abundancias relativas de los elementos utilizados por la vida (cuadro VII), constatamos que los cinco elementos fundamentales, hidrógeno, oxígeno, carbono, nitrógeno y azufre, están aproximadamente en las mismas proporciones que en la escarcha interestelar o en la fracción volátil de los cometas. Las dos últimas columnas del cuadro VII provienen de modelos que he perfeccionado recientemente (octubre de 1980). Estos modelos representan promedios basados sobre las observaciones.

El calcio es una invención reciente de los animales evolucionados que tienen necesidad de una concha o de un esqueleto. Sólo el fósforo ha estado concentrado en

los animales primitivos. He aquí en dos palabras el porqué: en ausencia de oxígeno y de respiración, los fosfatos han suministrado probablemente la fuente de energía necesaria para las primeras bacterias, mucho tiempo antes que las algas azules aprendieran a utilizar la fotosíntesis para el mismo fin.

8 - EL FENOMENO DE LA VIDA

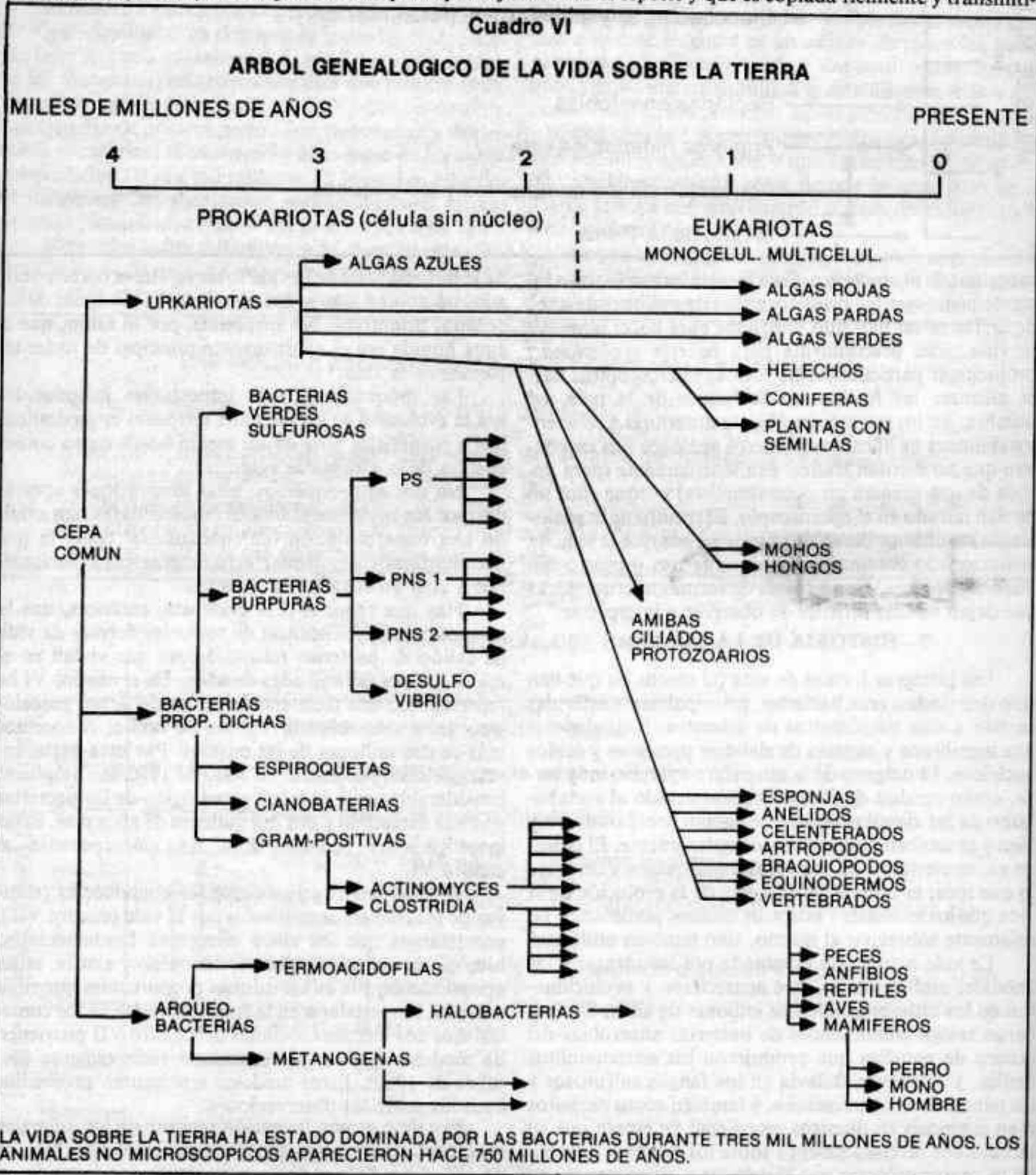
Sin tener que definir la vida en general, comprendemos bastante bien actualmente lo que ha sido la vida terrestre y podemos entonces dar de la misma una definición *operacional* satisfactoria; es esencialmente un proceso que ha permitido a la vez la *reproducción* y la *evolución*.

a) La *reproducción* fiel de los padres en sus hijos, que asegura que el hijo de un perro sea un perro y el hijo

de un hombre sea un hombre, se efectúa por copia y transmisión rigurosa de las instrucciones genéticas.

b) La *evolución* de las formas de la vida, lo que se produce por modificación extraordinariamente lenta de dichas instrucciones. Son necesarios veinte años para formar un hombre de un hombre. Se necesitan veinte millones de años para formar un hombre de un mono; se precisan dos mil millones de años para obtener un hombre de una bacteria.

Por otra parte, las instrucciones genéticas están escritas por medio de un código químico que ha sido completamente dilucidado en el último medio siglo. Las instrucciones se registran en ADN (ácido desoxiribonucleico), que representa la memoria de larga duración de la especie y que es copiada fielmente y transmiti-



LA VIDA SOBRE LA TIERRA HA ESTADO DOMINADA POR LAS BACTERIAS DURANTE TRES MIL MILLONES DE AÑOS. LOS ANIMALES NO MICROSCOPICOS APARECIERON HACE 750 MILLONES DE AÑOS.

Cuadro VII

Abundancias de los elementos utilizados por la vida (en número de átomos)

| | BACTERIAS | MAMIFEROS | ESCARCHA INTERESTELAR | FRACCION VOLATIL DE LOS COMETAS |
|-----------|-----------|-----------|-----------------------|---------------------------------|
| Hidrógeno | 63,0 % | 61,0 % | 55 % | 56 % |
| Oxígeno | 29,9 % | 26,0 % | 30 % | 31 % |
| Carbono | 6,4 % | 10,5 % | 13 % | 10 % |
| Nitrógeno | 1,4 % | 2,4 % | 1 % | 2,7 % |
| Fósforo | 0,12 % | 0,13 % | — | — |
| Azufre | 0,06 % | 0,13 % | 0,8 % | 0,3 % |
| Calcio | — | 0,23 % | — | — |

¡La comparación de la materia viviente se asemeja más a la de los cometas o de la escarcha interestelar que a la de la Tierra!

da a cada generación. El ADN es una cinta molecular lineal de longitud gigantesca; a menudo se halla, por otra parte, fragmentada en un cierto número de "cromosomas" (en el hombre, puede contener la cantidad de información que hay en cien millones de palabras, es decir en un centenar de libros gruesos).

Estas cinta está situada en el corazón del núcleo de la célula y en cierto modo protegida químicamente por una copia negativa de la misma. Estas dos cintas moleculares (positiva y negativa) están pues enrolladas en forma de doble hélice, como las dos hebras de un cordel retorcido.

Una sola (doble) copia se encuentra en cada una de las células de los animales multicelulares, así como en la única célula de los unicelulares.

La célula no tiene constantemente necesidad de todas las instrucciones que son conservadas esmeradamente en la caja fuerte del núcleo celular. Fragmentos del ADN son copiados y transmitidos por otra molécula casi idéntica, el ARN (ácido ribonucleico), que sale del núcleo para elaborar proteínas, según un proceso bien conocido pero demasiado complicado como para ser descrito en detalle. El ADN contiene las recetas para elaborar millares de proteínas de naturaleza diferente. Estas proteínas tienen todas una función específica: no sólo suministran los materiales de construcción del cuerpo (piel, músculos, cabellos, etc.), sino también obreros y arquitectos (las enzimas).

No obstante, por larga que sea la molécula de ADN, no es más que un mensaje cifrado que utiliza la repetición lineal de cuatro "cifras" solamente (cuatro bases diferentes) utilizadas evidentemente en un orden constantemente variable. El hilo que liga las bases y establece su orden, como el helio que asegura la continuidad de un collar de perlas, es una combinación regularmente repetida de moléculas de azúcar y de fosfato. En el ARN, una de las cuatro bases no tiene la misma composición química; tampoco la molécula de azúcar es la misma.

Por último, las proteínas elaboradas por el ARN son sartas de millares de perlas de veinte colores diferentes o, si ustedes prefieren, son frases escritas con un alfabeto de veinte "letras". Las "letras" son veinte amino-ácidos diferentes.

Para terminar, la transcripción se efectúa a razón de tres cifras (tres bases) por letra (por amino-ácidos). Cinco bases, dos azúcares, un fosfato y veinte amino-ácidos, un total de veintiocho moléculas diferentes, todas enfiladas con los átomos H, C, N, O, de las cuales

sólo dos tienen además un átomo de azufre y una sola (el fosforo) con un átomo de fósforo.

En la Fig 1. se hallará la estructura en doble hélice de las dos bandas de ADN en las cuales las bases (numeradas de 1 a 4) se adaptan geoméricamente, 3 se adapta sólo a 4 y rechaza 1 y 2. Todo esto funciona como una llave y una cerradura, como consecuencia de la geometría de tres dimensiones de cada molécula, que define la posición espacial de tres ligaduras hidrógeno. P y S designan respectivamente las moléculas de fosfato y de azúcar que, en la figura inferior, solamente se representan como dos cintas.

La mayor sorpresa procede evidentemente del hecho que todas las formas de vida, presentes y pasadas, utilizan y han utilizado siempre el mismo código, los mismos veinte amino-ácidos entre los centenares que existen; además, cada vez que hay dos ácidos simétricos, uno dextrógiro y otro levógiro, siempre es elegido este último. Finalmente, también las cinco bases son siempre las mismas, al igual que la clave que hace corresponder tres cifras del código a cada letra, es decir, a cada amino-ácido. Todas estas coincidencias son evidentemente la mejor prueba de que todas las formas de vida

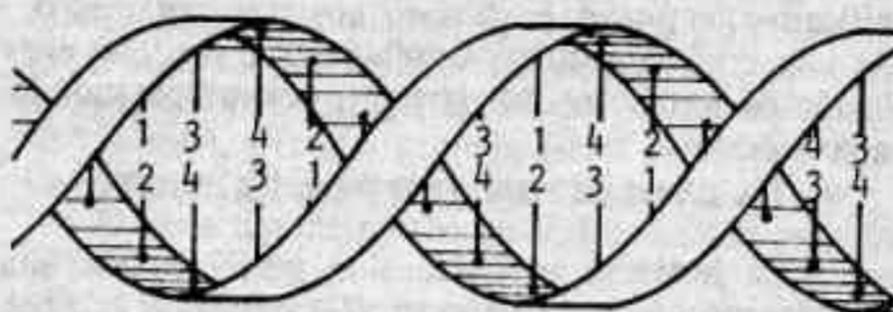


Figura 1 Estructura molecular del ADN Las dos cintas de azúcar-fosfato se enrollan en forma de doble hélice.

han evolucionado a partir de una misma cepa, es decir, de las primeras bacterias presentes en los océanos primordiales. A lo más, existen leves indicios de que en el origen ha sido utilizado quizás un código algo más sencillo, el cual se habría transformado en nuestro código actual.

Cuando se compara entonces (fig. 2) la cantidad de información máxima que puede ser colocada en las instrucciones genéticas de las diferentes formas de vida, se ve que esta receta se ha alargado y complicado constantemente (una medida directa de esta cantidad de información máxima se deduce fácilmente del peso molecular del ADN). Los biólogos explican la evolución creciente de las instrucciones genéticas por las mutaciones, errores al acaso en las cifras del código, que se puede comparar a errores de tecleo de la mecanógrafa, que introducen constantemente cambios insignificantes en las instrucciones. La mayor parte de los errores son evidentemente perjudiciales y son eliminados por selección natural. No obstante, cuando el error introducido es ligeramente favorable a la supervivencia, es conservado y conduce a la evolución de la especie. Sabemos, por otra parte, en la actualidad, que a lo largo del ADN hay, en todas las especies, largos pasajes que se utilizan y que no significan nada; frases incoherentes que datan de una función eliminada y olvidada desde hace mucho tiempo, o quizás puesta en reserva para una posible evolución ulterior.

Lo esencial para nuestro asunto es que la "receta" de elaboración de los seres vivos ha sido sistemáticamente más simple en el pasado. Los primeros organismos vivos debieron asemejarse a un virus moderno, con la diferencia que todos los virus que conocemos son parásitos de bacterias o de seres vivos más evolucionados y nunca pueden sobrevivir solos.

No es imposible que hayan seguido una evolución regresiva, perdiendo algunas de sus funciones, las que eran necesarias a su supervivencia independiente (después de todo, nuestros perros domésticos ¿no se han tornado también parásitos?). Conocemos el grado de complejidad de un virus (ver fig. 2) pero la fecha de aparición de un "protovirus" o más bien un "protobión" y la posibilidad de su existencia antes que las primeras bacterias permanecen por ahora hipotéticas (mis amigos biólogos detestan el término "protovirus" porque implica un parentesco cierto con el virus). No obstante, resulta interesante señalar que los virus tienen, o bien el ADN, o bien ARN, pero jamás ambos. La existencia simultánea del ADN y el ARN en las bacterias prokariotas más elementales parece constituir ya un gran paso en la evolución.

De todas maneras, la figura 2 sugiere que el mensaje genético se desarrolló a partir de bien poca cosa. Si la vida apareció sin recurrir a un mensaje genético significativo, entonces ha podido aparecer por medio de una evolución química prebiótica, o sea, una evolución de sustancias no vivientes, pero preparando la aparición de la vida.

9 - LA EVOLUCION QUIMICA PREBIOTICA

Esta hipótesis ya había sido propuesta por dos grandes precursores: Oparin en 1924 y Haldane en 1929. El estudio de la evolución química prebiótica recibió por primera vez un impulso importante en 1953, gracias a la experiencia de Urey y Miller, que se ha tornado clásica.

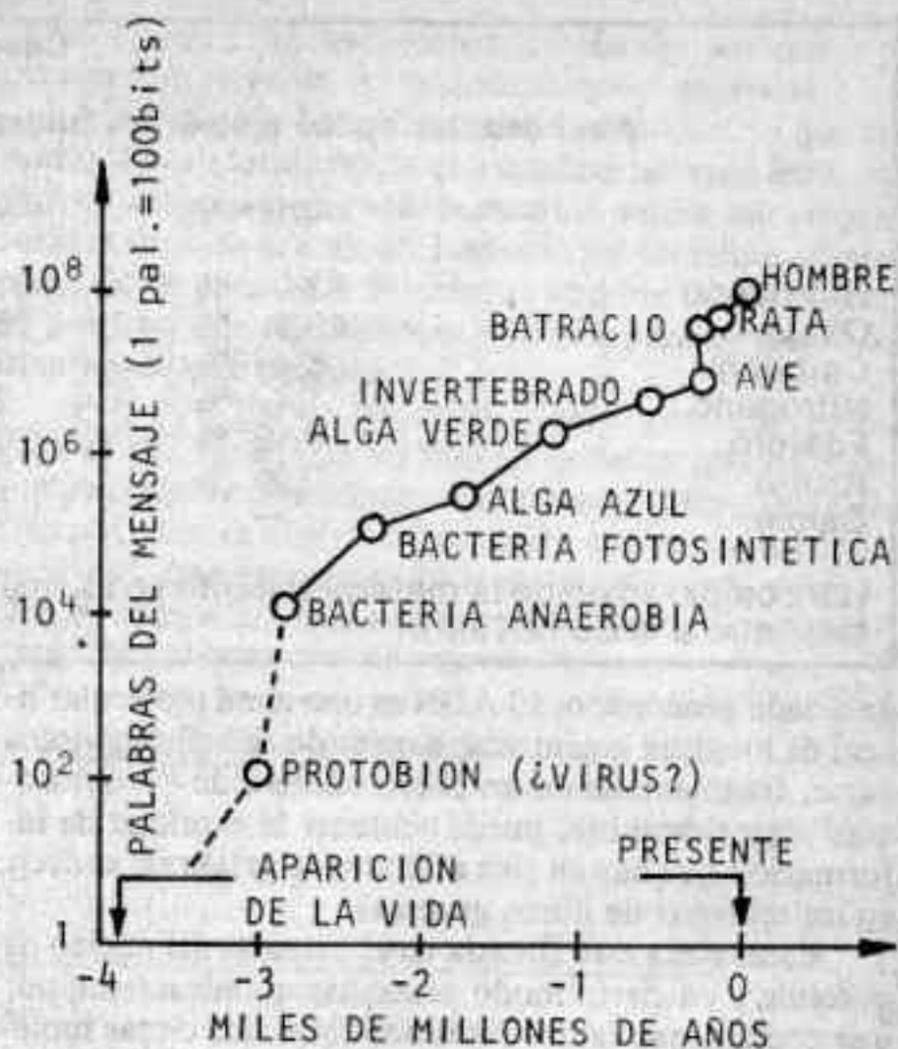


Figura 2

Utilizando metano, amoníaco y vapor de agua (que en esa época se creía formalmente que representaban la atmósfera primitiva de la Tierra), demostraron que una chispa eléctrica provoca en unos días la aparición de una sustancia parda, que se deposita sobre las paredes del balón de experimentación. Esta sustancia está compuesta principalmente por amino-ácidos en proporciones racémicas, es decir, 50% de la forma levógira y 50% de la forma dextrógira. La mayoría de los amino-ácidos presentan, en efecto, dos formas simétricas, una espejo de la otra.

La vida ha elegido ulteriormente sólo la forma levógira.

Posteriormente, la experiencia de Urey y Miller ha sido reproducida con numerosas variantes. Particularmente, se ha utilizado CO, CO₂ y nitrógeno en lugar de metano y amoníaco, luz ultravioleta en lugar de una chispa eléctrica. Con tal que no haya oxígeno libre, se elaboran casi siempre numerosos amino-ácidos, de los cuales la mayoría de aquellos utilizados por la vida, pero sin embargo siempre en proporciones racémicas. Es importante subrayar que se hallan numerosos amino-ácidos, también en proporciones racémicas, en los meteoritos primitivos llamados condritas carbonadas, lo que demuestra formalmente que los amino-ácidos se forman en condiciones extraterrestres antes de la aparición de la vida.

Se ha podido verificar recientemente que, cualesquiera sean las moléculas iniciales, la síntesis de los amino-ácidos acaba siempre por pasar por HCN (ácido cianhídrico) y CH₂O (formaldehído); esto es lo que los químicos llaman la síntesis de Strecker. Hemos visto que HCN y CH₂O se encuentran en el espacio interestelar y han sido conducidos probablemente bajo forma de escarcha interestelar en la nebulosa solar primitiva. No sorprende, entonces, que las condritas carbonadas contengan amino-ácidos, ni que los océanos primitivos los hayan recibido en abundancia.

En la evolución química molecular, el problema siguiente es el origen de las bases utilizadas en el ADN y el ARN. Es extremadamente fácil producir dos de las bases (la adenina y la guanina), nuevamente a partir del ácido cianhídrico. Los procesos de síntesis de las otras tres bases son más complicadas; los caminos que han sido propuestos son todavía controvertidos en la hora actual, pero las dificultades parecen provenir sobre todo de lagunas en nuestros conocimientos.

Finalmente, la síntesis de los azúcares y los fosfatos no presenta problema. Desde 1861 se conoce bien que los azúcares pueden obtenerse por polimerización del formaldehído. Por otra parte, los fosfatos biológicos se forman fácilmente a partir de los polifosfatos minerales.

La formación de largas cadenas moleculares, como la de arcilla. En el caso del ADN y del ARN, la energía de polimerización es entonces liberada por los fosfatos. Aunque la cuestión es todavía muy discutida, se ha propuesto, por ejemplo, que la catálisis mediante la arcilla favorece las formas levóginas, lo que explicaría la disimetría de la elección aparentemente arbitraria que ha sido hecha por la vida. Otra hipótesis hace remontar esta disimetría a las disimetrías fundamentales descubiertas recientemente en las propiedades de las partículas elementales.

Puede entonces resumirse la evolución química tal como aparece en la actualidad, por el siguiente escenario, que posiblemente se conserva un poco simplista. En el espacio interestelar, los átomos de H, C, N, O forman el ácido cianhídrico HCN, el formaldehído CH_2O y grandes cantidades de agua.

A continuación, en presencia de agua líquida y ausencia de oxígeno libre, el HCN forma las cinco bases, el CH_2O forma los azúcares, y junto forman los amino-ácidos. ¿Dónde ha sucedido esto? No resulta imposible que sea en los primitivos océanos. No obstante, la presencia de los amino-ácidos y de ciertas bases en las condritas carbonadas demuestra que también se forman en condiciones extraterrestres. Uno de los sitios más favorables podría ser en los núcleos cometarios. No resulta imposible que el centro de los núcleos cometarios haya sido calentado por sustancias radiactivas que en la actualidad se han extinguido, como el aluminio 26 cuyo producto de trasmutación (magnesio 26) ha sido descubierto en ciertas condritas carbonadas. Este proceso bastaría para provocar la existencia de una amplia cavidad llena de agua líquida, que podría subsistir millones de años en el corazón de los núcleos cometarios. Sin embargo, algunos indicios que poseemos sugieren más bien que los núcleos cometarios son homogéneos y no diferenciados.

Finalmente, las primeras cadenas moleculares de ADN y ARN han podido ser catalizadas por la arcilla que se encontraba en los primeros sedimentos de los bajos oceánicos. Para ir más allá de esta etapa es necesario hacer una especulación que llene la última laguna de nuestros conocimientos: debe imaginarse que la evolución química ha proseguido hasta el estadio de la célula primitiva.

Esta era precisamente la idea de Oparin, que había demostrado en laboratorio que soluciones acuosas de polímeros que se asemejan un poco al ADN, al ARN o a las proteínas, se separan espontáneamente en pequeñas gotitas coloidales del orden de algunos micrometros.

Estas gotitas coloidales, que se construyen una pared para separarse del agua más diluida que las rodea, serían entonces los antepasados de las células vivientes. Habría ya, desde el comienzo, una selección natural de las gotitas que tienen mayor posibilidad de sobrevivir, en particular asimilando fosfatos, primer alimento que suministraría la energía necesaria para la iniciación de la evolución. Las bases del ADN, al comienzo reunidas al azar, se reorganizarían así progresivamente en un orden que les asegurara la supervivencia, es decir, en un mensaje genético primitivo que evolucionaría lentamente por mutación hacia una significación y una complejidad mayores.

Las bacterias anaerobias primitivas utilizan los nutrientes de su ambiente primitivo, que provienen quizás de las fotosíntesis inorgánica debidas al ultravioleta solar. Las modificaciones en la atmósfera primitiva terminan por agotar estos nutrientes y obligan entonces a ciertas prokariotas (células sin núcleo) a inventar la fotosíntesis. Esta etapa de la evolución, que provocó la aparición de las algas azules fotosintéticas, fue larga y difícil, ya que parece haber requerido por lo menos mil millones de años. Por otra parte, la fotosíntesis produce un desecho inutilizable, un veneno que las algas azules se apresuran a arrojar en la atmósfera: es el oxígeno. Muy pronto las algas azules se multiplican tanto y tan bien en los océanos que su contaminante, el oxígeno, alcanza elevadas concentraciones en la atmósfera.

Es en esta época que aparecen las eukariotas, que son los primeros organismos monocelulares que poseen un verdadero núcleo en el centro de su célula. Este núcleo parece que apareció al comienzo por simbiosis de dos prokariotas que se ayudaban mutuamente para sobrevivir (Lynn Margulis). Finalmente, las eukariotas desarrollan los animales multicelulares, con una creciente especialización de las diferentes células que les permiten liberarse de los océanos.

El cuerpo de los mamíferos contiene aproximadamente 10^{15} células, con un millar de especializaciones diferentes. Esta asombrosa complejidad ha provenido íntegramente del proceso de selección de los organismos más aptos para la supervivencia. El desarrollo de nuestra conciencia de existir, tan importante para la evolución de la especie humana, habría provenido de la misma competición, porque esta conciencia representa un factor muy favorable para nuestra supervivencia.

He aquí entonces lo que sabemos de la vida sobre la Tierra y de su aparición. Las consecuencias son evidentes. Desde luego parece que la vida utiliza sobre todo los elementos más abundantes en el Universo y casi exactamente en su orden de abundancia: en primer lugar H, C, N, O, luego un poco de azufre y, por fin, trazas de fósforo. También parece que las 28 moléculas diferentes que han sido utilizadas por la vida sobre la Tierra (cinco bases, veinte amino-ácidos, dos azúcares y un fosfatos) son producidas casi automáticamente en gran abundancia, en parte en el espacio interestelar (quizás también en los cometas), y traídas sobre la Tierra con toda el agua necesaria para llenar los océanos terrestres.

El agua líquida parece ser una necesidad para desarrollar la química en cuestión, pero el agua (ver cuadro 2) es una de las moléculas más abundantes en el espacio interestelar.

En particular, el pequeño hombre verde que muere de sed y se arrastra por el desierto gritando: "¡jamo-

niaco!... ¡amoniaco!...” es francamente inverosímil. Es mucho más probable que grite —como lo haríamos nosotros—: ¡agua!... ¡agua!...”.

Finalmente, los amino-ácidos se forman con tal espontaneidad que era muy natural que los experimentos biológicos desembarcados sobre el planeta Marte en 1976 por los dos ingenios espaciales “Viking”, ensayaran detectar su presencia. En efecto, como la mínima cucharada de humus terrestre contiene grandes cantidades de los mismos, su completa ausencia sobre Marte constituyó una especie de desilusión; aunque ninguna conclusión definitiva pueda extraerse de dos minúsculos muestreos sobre un planeta enorme.

Evidentemente, quedan numerosas preguntas para las cuales no tenemos respuesta. Por ejemplo, los veinte amino-ácidos del código genético ¿deben ser siempre necesariamente los mismos en todas partes? La existencia del ADN y el ARN con tres bases idénticas y un diferente, sugiere que en la evolución se mezclaron dos códigos genéticos diferentes, pero ¿es posible escribir además otros tipos de código genético con moléculas diferentes? Sin siquiera intentar de cambiar los átomos fundamentales (porque además H, C, H, O son los más abundantes), la química del carbono es tan rica que se imagina fácilmente —quizás erróneamente— que pudiera combinarse otro código con bases orgánicas y amino-ácidos diferentes. Por último, no resulta imposible que el código genético actual sea el más sencillo posible, compatible con el grado de complejidad de la vida sobre la Tierra y que, por ello, sería el más probable.

Indicaciones preliminares sobre una evolución del código genético a partir de un código hipotético aún más simple, han sido sugeridas recientemente: en lugar de los tripletes de base, serían evidentemente suficientes dobletes para codificar numéricamente dieciséis amino-ácidos en lugar de veinte, pero esto haría perder la gran superabundancia que es uno de los factores estabilizadores del código actual.

10 - ESPECULACIONES AUN MAS ATREVIDAS

Hace algunos meses, un grupo de radioastrónomos norteamericanos propuso la identificación preliminar de una raya de rotación para la glicina (el más liviano de los amino-ácidos) en el espacio interestelar. Parece entonces que todavía no conocemos los límites de la química interestelar. Hoyle y Wickramashinghe (1977) constataron que el espectro de absorción de los granos interestelares es idéntico al de la polisacarosa. En lo que me concierne, esta identificación no es muy convincente, porque este espectro es un continuo sin rasgos marcados, o sea, sin una “impresión digital” típica. Los mismos autores proponen que la evolución bioquímica se ha continuado en los cometas, los que no solo habrían traído la vida sobre la Tierra hace cuatro mil millones de años, sino que continuarían trayendo constantemente nuevas formas de virus y bacterias, causantes de las epidemias de la Edad Media y también de nuevas formas de gripe e influenza. Por tanto, habría un fondo de verdad en la interpretación medieval de los cometas como presagio de mal augurio. Siguiendo las huellas del ruso Goldanskii (1977), que estudia teóricamente las posibilidades de llegar a la vida directamente en el espacio interestelar, Hoyle y Wickramashinghe acaban de proponer (1980) que los granos interestelares eran, sencillamente, ni más ni menos que *bacterias* recubiertas de una delgada película de carbono (sin duda bajo forma de carbi-

nos) para protegerlas de los efectos letales del ultravioleta de las estrellas; las colas de polvillos cometarios serían entonces el agente de dispersión de estas bacterias.

Esta especulación ha sido recibida bastante friamente en el Coloquio sobre Cometas y el Origen de la Vida, en Octubre de 1980 en la Universidad de Maryland. Como Hoyle y Wickramashinghe citan en su libro mi comparación de las abundancias cometarias con aquellas utilizadas por la vida, yo me atengo a decir que sus argumentos no me han convencido. En el estado actual de nuestra ignorancia, tales especulaciones no pueden ciertamente ser, fácilmente, ni demostradas ni refutadas. Fred Hoyle y Chandra Wickramashinghe son dos hombres de ciencia de gran valor; todos los astrónomos conocen la suma de contribuciones que Sir Fred ha aportado a nuestros conocimientos en astrofísica. No obstante parece haber permanecido el niño terrible de la astrofísica británica, en parte porque él se opone filosóficamente a aceptar otra cosa que no sea un estado estacionario en un Universo que sería necesariamente ilimitado en el tiempo. Aunque el descubrimiento de la radiación a 3°K lo haya conmovido intensamente, continúa sin embargo a tentar de reconstruir su teoría del estado estacionario y de incorporarle la vida. Como no hay argumentos realmente serios en uno u otro sentido, creo que es necesario abstenerse de prestar demasiada atención a estas especulaciones.

11 - PERSPECTIVAS

Son numerosas las cuestiones que ha evitado este artículo. Ante todo, tenemos los numerosos puntos de detalle que no han sido abordados para aligerar el tema. Por ejemplo, el papel de los lípidos en la construcción de la membrana semipermeable de la célula. A despecho del papel esencial de la membrana para separar la célula del medio exterior, los lípidos tienen una importancia periférica en lo que concierne a la transmisión del código genético.

Pero existe una cuestión de una naturaleza más fundamental o filosófica y que no puede eludirse completamente. Hemos visto particularmente en qué medida los fenómenos relativos a la aparición de la vida sobre la Tierra parecen ser de una naturaleza universal. Por ejemplo, las sustancias químicas utilizadas han aparecido por todas partes del Universo, hace de seis a diez mil millones de años y se encuentran actualmente entre las más abundantes. Los procesos que las han traído sobre la tierra parecen ser los normales de la edificación de los planetas de tipo terrestre. La cuestión fundamental que se establece desde este momento es la de la pluralidad de los mundos habitados.

En nuestro Sistema Solar, la zona favorable para la formación de planetas terrestres con océanos de agua líquida parece, después de todo, ser bastante estrecha. La existencia de leves diferencias de temperatura puede engendrar, por retroacción, una glaciación que se intensifica y congela los océanos o, recíprocamente, un efecto de invernadero que al intensificarse provoca la vaporización y luego la pérdida de los mismos. Marte y Venus son, quizás, casos extremos de este género.

Cuando ha aparecido la vida sobre un planeta, si ahora dirigimos nuestra atención a la eclosión de la inteligencia y la aparición de las civilizaciones, es posible que una serie de factores variables pueda favorecer la evolución rápida por adaptación ¡siempre y cuando las

variaciones no sobrepasen un cierto límite! Una gran cantidad de las especies que vivían sobre la Tierra hace cien millones de años se han extinguido en la actualidad; no obstante, es posible que las últimas glaciaciones hayan representado un papel decisivo en la aparición de la inteligencia: el uso del fuego ¿no es acaso el primer paso en nuestro dominio del ambiente?

Pero sabemos hoy en día que las glaciaciones recientes de la Tierra pueden atribuirse a un delicado juego de muchos factores, como la inclinación variable y la precesión de su eje de rotación, combinados con la excentricidad variable de su órbita. El sutil papel de nuestro satélite no puede entonces ser desdeñado en mayor medida que el de los planetas vecinos, en los cambios seculares de clima.

Cuando hablamos de la pluralidad de los mundos habitados, queremos referirnos evidentemente a civilizaciones del tipo de la nuestra, prontas a entablar un diálogo con nosotros porque comparten nuestra curiosidad y son técnicamente capaces de hacerlo porque, como nosotros, han dominado una parte de las leyes de la naturaleza,

Sin pensar más en nuestro Sistema Solar, donde la esperanza de hallar otras formas de vida ciertamente se ha amenguado mucho, desde los sueños del siglo diecinueve, podemos considerar las probabilidades de encontrar otro planeta en el Universo o, más bien, para limitarnos a distancias razonables, en nuestra Galaxia.

El astrónomo norteamericano Helmut Abt, extrapolando las estadísticas de estrellas dobles, estima que el 20% de las estrellas de tipo solar poseen planetas. Si dirigimos nuestros radiotelescopios hacia esas estrellas ¿cuál es la probabilidad de detectar señales? Estas pueden ser mensajes que se nos dirigen, o "fugas" de mensajes que no son para nosotros (después de todo, nosotros dejamos escapar al espacio nuestras señales de radio y televisión).

Para evaluar las posibilidades de un programa de investigación de este género de señales, Frank Drake ha propuesto descomponer la probabilidad de encontrar otras civilizaciones en un producto de varios factores que pueden ser tratados independientemente uno de otro. He aquí la fórmula:

$$N = T f_p n_e f_v f_c f_d L \quad \text{donde:}$$

N = Cantidad de civilizaciones coexistentes en la Galaxia en un instante dado.

T = Régimen medio de formación de las estrellas por año, en la Galaxia.

f_p = fracción de las estrellas que poseen Planetas.

n_e = número de planetas que tienen un Ambiente favorable para la vida (gravidad, temperatura, océanos, variaciones estacionales razonables, etc.) en cada sistema planetario.

f_v = fracción de los planetas precedentes sobre los cuales ha aparecido realmente la Vida (las conclusiones de este artículo implican $f_v = 1$).

f_c = fracción de los planetas precedentes sobre los cuales se han desarrollado Civilizaciones (sobre la Tierra ha habido que esperar, desde luego, cuatro mil millones de años).

f_d = fracción de las civilizaciones que aceptan entablar el Diálogo.

L = Longevidad media de una civilización

T está próxima a 10 estrellas por año, puesto que las 10^{11} estrellas de nuestra Galaxia se han formado en 10^{10} años. n_e no puede ser muy elevado (menor que 10) y fácilmente podría ser menor que 1. Por otra parte, todas las fracciones f están más o menos comprendidas entre la unidad y 0,1 o, a veces, 0,01, según el grado de optimismo de cada uno. Por ejemplo, podría tomarse arbitrariamente el producto $T f_p n_e f_v f_c f_d = 10^{-4}$. La fórmula se reduce entonces a: $N = 10^{-4} L$, y la longevidad media L de una civilización se vuelve el factor decisivo. Si una civilización dura, en promedio, menos de diez mil años, $N \ll 1$ y entonces no existe, en la práctica, coexistencia de civilizaciones ni de diálogo posible. Por el contrario, si una civilización es capaz de durar cien millones de años, entonces en este mismo instante hay diez mil civilizaciones que coexisten y aceptan el diálogo, en nuestra Galaxia; estadísticamente, deben hallarse a una distancia de unos doscientos parsecs entre sí.

Hasta ahora, el programa de escucha de Frank Drake se ha limitado a las estrellas cercanas y no ha detectado mensaje alguno; esto no sorprende porque las probabilidades son débiles y pueden requerir décadas o siglos de paciente escucha.

Un primer contacto: ¿podría efectuarse mediante una visita de astronautas más bien que por un mensaje? No lo pienso. Podemos desde ahora enviar un mensaje a la Luna por menos de algunos francos, mientras que el envío de un astronauta cuesta por lo menos mil millones de veces más. Además, la Luna no es más que el suburbio de la Tierra y debemos tener conciencia de la inmensidad del espacio intersidereal y la limitación de las fuentes de energía disponibles en el Universo.

Sin embargo, la creencia popular atribuye a ciertos objetos volantes no identificados a "platillos voladores" de origen extraterrestre, pero los hombres de ciencia se mantienen escépticos ¿Por qué? Porque hasta ahora ningún testimonio ha resistido un examen serio. Cuando se han eliminado los fraudes o los errores de identificación, los pretendidos casos "irreductibles" se limitan a aquellos en que las informaciones son insuficientes para sacar conclusiones y la objetividad es aventada por las emociones y los deseos. Puede compararse un poco al asunto de los canales de Marte en el siglo XIX. No haya temor alguno: si vinieran a visitarnos verdaderos extraterrestres, los astrónomos serían los primeros convencidos y los primeros maravillados, pero las posibilidades son de tal suerte que no osan esperarlo.

Otro problema de naturaleza muy general concierne al destino de la raza humana y lo abordaré a manera de conclusión.

12 - CONCLUSION

A escala astronómica o geológica, nosotros acabamos de aparecer sobre la superficie de la Tierra. La vida existe desde hace tres o cuatro mil millones de años, pero sólo hubo hombres en el último uno por mil de este uno por mil. Si el total de la vida sobre la Tierra hubiera durado solamente un día, los hombres habrían aparecido hace algunos minutos y las civilizaciones habrían durado sólo un décimo de segundo.

En la hora actual atravesamos momentos difíciles en que jugamos al aprendiz de hechicero con terribles juguetes que podrían destruir fácilmente todo el plane-

ta. Pensemos entretanto en lo que hemos realizado en los tres últimos siglos ¡desde el momento en que hemos comenzado a utilizar el método científico experimental! Si llegamos a sobrevivir a este periodo difícil ¡pensemos en lo que podemos llegar a ser en los próximos diez milenios o, mejor aún, en el próximo millón de años! Si nuestra civilización sobrevive por largo tiempo no cabe duda, a mi modo de ver, que somos capaces de colonizar la Galaxia entera.

Sin embargo, nuestros cuerpos no son más que un poco de polvillo de estrella, de escarcha interestelar traída sobre la Tierra por los cometas. De esta manera, parece que la materia inerte posee en potencia la capacidad de evolucionar hasta tomar conciencia de sí misma

y entonces partir a la conquista del Universo para influir sobre su propio destino.

Los filósofos hallarán en esto materia de reflexión, pero ello no los ayudará a resolver el problema metafísico. Los materialistas verán en esto el triunfo de la materia y el mecanismo, mientras que los espiritualistas, siguiendo a Teilhard de Chardin, continuarán a ver aquí una teleología, un signo innegable del finalismo impuesto por una voluntad divina.

Y los hombres de ciencia, como en el pasado, continuarán a despreocuparse de filosofía, porque encuentran un placer mucho mayor en desmontar pacientemente los engranajes del Universo.

Estimado Consocio:

RECUERDE QUE LA VIDA DE LA ASOCIACION DEPENDE DEL PAGO AL DIA DE SUS CUOTAS.

Además, Ud. se verá también beneficiado, porque lo adeudado se actualiza trimestralmente.



OPTICA VIGNA S.A.

OPTICA FOTO CINE

“Nuestro nombre es la mejor garantía”

- Todas las tarjetas de crédito.
- Recetas en el día.
- Línea completa de armazones nacionales e importadas.
- Laboratorio color en 24 horas. Todas las marcas.
- Foto carnet en el acto.
- Línea completa de pilas y lámparas especiales.
- Se arman packs especiales.
- Prismáticos - Microscopios. Línea completa de compases náuticos Silva.

Su pregunta no molesta, nos gratifica para seguir adelante

SUIPACHA 401 esq. CORRIENTES - TEL. 392-9102/393-9281 (1008) BUENOS AIRES

Noticias de la Asociación

ASAMBLEA ORDINARIA

De acuerdo a lo dispuesto oportunamente, tuvo efecto el día 17 de Marzo de 1984, a las 15,30, la Asamblea Anual Ordinaria. Cumplido el tiempo de espera que establecen los Estatutos, se dio comienzo a la misma a las 16 hs. con los socios presentes (34). En cumplimiento de la Orden del Día se procedió en primer lugar a la lectura y aprobación del Acta de la Asamblea anterior, la que fue aprobada sin observaciones y por unanimidad.

El segundo punto disponía la lectura de la Memoria y Balance General, Cuentas de Gastos y Recursos e Inventario al 31 de Diciembre de 1983. El socio Dr. Fernando P. Huberman mociona: "Dado que la Memoria y Balance General, Cuentas de Gastos y Recursos e Inventario al 31 de Diciembre de 1983, estuvieron expuestos para información de los asociados, se omita su lectura y se de por aprobados". Puesto a votación, fue aprobado por unanimidad la moción del Dr. Huberman.

Pasose luego al punto tres: "Designación de tres miembros para integrar la junta escrutadora (Art. 29). La presidencia designó al socio Sr. Gustavo Remestvensky y la Asamblea a los socios Sres. Martín L. Monteverde y Horacio Seisdedos, los que a continuación asumieron sus funciones.

Acto seguido se pasó a cuarto Intermedio para dar cumplimiento al punto cuarto: Elección de Secretario, por cesación de mandato del Prof. Luciano Ayala (3 años)-Prosecretario, por cesación de mandato de la Srta. Liliana G. Quarleri (3 años)-Dos Vocales Titulares, por cesación de mandato del Lic. Alejandro Di Baja (h) y Sr. Guillermo E. Lücke (3 años)-Tres Vocales Suplentes, por cesación de mandato del Sr. Luciano Raineri (1 año); Sr. Roberto Fiadone (1 año); y Sr. Carlos M. Rúa (1 año).

Una vez computados los votos por correo se procedió a llamar a los socios presentes, con derecho a voto,

por orden de firmas en el Libro de Asistencia para que emitieran su voto. Terminado el escrutinio se obtuvo el resultado siguiente: para Secretario, el Prof. Luciano Ayala, 28 votos; para Prosecretario, el Sr. Alejandro Blain, 27 votos; para Vocales Titulares, Sres. Ariel Otero Estrada, 29 votos y Carlos M. Rúa, 30 votos; para Vocales Suplentes, Sres. Bernardo Lupiáñez, 26 votos; Lic. Alejandro Di Baja(h), 30 votos y Srta. Liliana G. Quarleri, 30 votos. Proclamados los electos pasose al punto quinto: Elección de tres miembros para integrar la Comisión Revisora de Cuentas para el año 1984. Decidiendo la Asamblea, reelegir a los Sres. Carlos E. Gondell, Ing. Augusto E. Osorio y Ctdor. Salvador A. Farace.

El punto sexto, disponía la modificación de la Cuota Social. Luego del informe de tesorería, sobre el estado de las finanzas de la Asociación y puesto a consideración de la Asamblea, esta resuelve: fijar para el segundo trimestre del año 1984, \$a 210, para los socios activos. Se aclaró que las cuotas posteriores se calcularán tomando dicho valor como base e incrementándolas según el índice de costo de vida elaborado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censo (INDEC), con más un 2% (dos por ciento). Dichos valores se establecerán "Ad Referendum" de la próxima Asamblea.

En cumplimiento del punto séptimo: "Designación de dos socios presentes para que firmen el Acta de la presente Asamblea, conjuntamente con el Presidente y el Secretario", se designó a los Sres. Claudio Apelbaum y Dr. Angel Papetti, para tal fin. El Dr. Fernando P. Huberman propuso un voto de aplauso a la Comisión Directiva, como también a la Dirección de Revista Astronómica por su encomiable labor.

No habiendo más asuntos que tratar, en el Orden del Día, se dio por finalizada la Asamblea, siendo las 17,50 hs.

SOCIOS NUEVOS

4904 NICOLAS DIEGO KUGLER
4905 EDUARDO ANIBAL RODRIGUEZ
4906 ALEJANDRO RODOLFO GWERDER
4907 CONRADO FEDERICO KURTZ
4908 JUAN JOSE MADSEN
4909 JUAN JOSE MUÑESA
4910 JOSE HUGO VACA
4911 CLAUDIA LILIANA MAZZONI
4912 RAFAEL ANTONIO SOLA
4913 MARTIN E. COLAS DE LA NOVE
4914 JUAN MARCELO LEMPET
4915 PABLO DARIO DI MARCO
4916 WALTER PABLO VIDAL
4917 EDUARDO ROBERTO FERNANDEZ
4918 NORBERTO MERATI
4919 FERNANDO T. DE GOROCICA
4920 SERGIO CLAUDIO PERALTA
4921 SANDRA MONICA NANZI
4922 GUILLERMO JOSE LODEIRO
4923 LUIS PABLO ESTRADA
4924 HERIBERTO EXEQUIEL GARRONE

4925 ANGEL RODOLFO HERRERO
4926 MARCELO OMAR MONOPOLI
4927 NESTOR RODOLFO DI VINCENZO
4928 ANGEL S. LAURITO
4929 JUAN MARTIN D'AGOSTINO
4930 JOSE MARIA CAVALCHINI
4931 RENE MARCELO SOURIGUES
4932 NATHAL LOPEZ CROSS
4933 SALUSTIO ANDRES MARTIN
4934 JUAN MANUEL BERALDI
4935 JUAN CARLOS GRAVINA
4936 PEDRO DANIEL CORRADO
4937 CARLOS J. M. MONTICELLI
4938 JORGE ANIBAL MARIN
4939 SEBASTIAN IGNACIO SAJAROFF
4940 CARLOS M. FERNANDEZ MOLINA
4941 JUAN JOSE GARCIA
4942 MARIANO JORGE RODRIGUEZ
4943 LEONARDO EMBON
4944 ROBERTO DUSER SOTO
4945 EDUARDO FABIAN D'AIELLO

AUTORES:

| | |
|--|--------|
| Camponovo, Ambrosio J. | |
| "Monografías sobre planetas: Urano" | 224-5 |
| "Bibliografía comentada: Variable Star Atlas-AAVSO" | 224-21 |
| "Monografías sobre planetas: Neptuno" | 226-8 |
| Delsemme, A. H. | |
| "Los cometas y el origen de la vida" (primera parte) | 226-16 |
| Di Baja, Alejandro | |
| "Pionero 10, un mensaje entre las estrellas" | 225-2 |
| "Un astrógrafo portátil" | 225-17 |
| "Un generador de frecuencia variable para alimentar motores sincrónicos" | 226-21 |
| Forte, Juan C. | |
| "Cúmulos globulares en galaxias gigantes" | 224-3 |
| Frommel, Roberto R. | |
| "Un reflector de 200 mm con tubo abierto estructural" | 224-14 |
| Graham, Peter | |
| "¿Existe vida extraterrestre?" | 224-11 |
| Jemisek, Luis J. | |
| "Un reflector de 300 mm con cúpula de lona impermeabilizada" | 227-22 |
| López Alvarez, Manuel | |
| "Nova Muscae 1983" | 224-19 |
| "Las microcomputadoras en la astronomía amateur" | 227-17 |
| Machol, Robert E. | |
| "Las comunicaciones interestelares: la ecuación de Drake" | 224-13 |
| Muzzio, Juan C. | |
| "Experimentos numéricos en Astronomía" | 226-12 |
| Osorio, Augusto E. | |
| "Cincuentenario de la Radioastronomía" | 225-7 |
| Pöppel, Wolfgang | |
| "Moléculas en el espacio interestelar" | 227-2 |
| Quadrelli, Mario | |
| "Un enigma llamado Tunguska" | 225-4 |
| Sahade, Jorge | |
| "Los objetos BL Lacertae" | 225-9 |
| Sheldon, Eric | |
| "Opoenáutica, un poco de ligereza en un tema de mucha gravedad" | 226-2 |
| Vallini, Alberto | |
| "Fotografía lunar y planetaria con un reflector de 310 mm" | 224-20 |
| Vattuone, Mario | |
| "Bibliografía comentada: Catalogue of Star Clusters and Associations-Supplement 1" | 224-21 |
| "Noticiero Astronómico" | 224-22 |

SECCIONES FIJAS:

| | |
|---|--------|
| EDITORIALES: | |
| "E. T." | 224-2 |
| ACTIVIDADES OBSERVACIONALES: | |
| "Resultado de las observaciones del Sol: 26-1-83", "Dos cometas periódicos nos visitan este año", "Eclipse parcial de Luna", "Fotografía lunar y planetaria con un reflector de 310 mm" | 224-17 |
| "Lineas negras para Omega Centauri", "Nova Muscae 1983", "Fotografía lunar y planetaria con un reflector de 310 mm" | 224-19 |
| "Fotografías desde la AAAA", "Halos y parahelios", "Resultados de la observación del Sol: del 1-2-83 al 31-5-83", "Eclipse de Luna del 25-6-83" | 225-21 |
| "Resultados de la observación del Sol: del 1-6-83 al 31-8-83", "Eclipse parcial de Luna" | 226-23 |
| "Reporte del eclipse de Luna del 25 de Junio", "La oposición de Marte" | 227-21 |
| OPTICA E INSTRUMENTOS ASTRONOMICOS: | |
| "Un reflector de 200 mm con tubo abierto estructural" | 224-14 |
| "Un astrógrafo portátil" | 225-17 |
| "Un generador de frecuencia variable para alimentar motores sincrónicos" | 226-21 |
| "Un reflector de 300 mm con cúpula de lona impermeabilizada" | 227-22 |
| MICROCOMPUTACION Y ASTRONOMIA: | |
| "Las microcomputadoras en la astronomía amateur" | 227-17 |
| BIBLIOGRAFIA COMENTADA: | |
| "Catalogue of Star Clusters and Associations-Supplement 1", "Variable Star Atlas-AAVSO" | 224-21 |
| NOTICIERO ASTRONOMIC: | |
| "¿Dónde está la población III?", "Imposición de nombres a planetas menores", "Nebulosas Planetarias en M31" | 224-22 |
| "Algo más sobre el telescopio espacial para aficionados", "Reducción del periodo de pulsación del Pulsar de Vela", "Nebulosas Planetarias en M31" | 225-23 |

| | |
|--|--------|
| "Chorro de plasma en la Nebulosa Cangrejo" | 226-24 |
| "Bart J. Bok", "Estrella de carbono extrema" | 227-24 |
| NOTICIAS DE LA ASOCIACION: | |
| "Una buena noticia", "Socios nuevos 4731 al 4752" | 224-23 |
| "Asamblea General Ordinaria 1983", "Socios nuevos 4753 al 4812" | 225-24 |
| "Socios nuevos 4813 al 4840" | 226-11 |
| "Socios nuevos 4841 al 4903" | 227-24 |
| EFEMERIDES: | |
| "Efemerides 1984" | 227-9 |
| TEMAS: | |
| COMETAS: | |
| "Los cometas y el origen de la vida", A. H. Delsemme (1ª parte) | 226-16 |
| "Un enigma llamado Tunguska", Mario Quadrelli | 223-4 |
| "Dos cometas periódicos nos visitan este año", Act. Obs. | 224-18 |
| COSMOGONIA: | |
| "Opoenáutica: un poco de ligereza en un tema de mucha gravedad", Eric Sheldon | 226-2 |
| CUMULOS: | |
| "Cúmulos globulares en galaxias gigantes", Dr. Juan C. Forte | 224-3 |
| "Lineas negras para Omega Centauri", Act. Obs. | 224-19 |
| ECLIPSES: | |
| "Eclipse parcial de luna", Act. Obs. | 224-18 |
| "Eclipse de Luna del 25-6-83", Act. Obs. | 225-23 |
| "Eclipse parcial de Luna", Flavio del Vall y Ricardo Gil Hutton, Act. Obs. | 226-24 |
| "Reportaje del eclipse de Luna del 25 de Junio", Act. Obs. | 227-21 |
| ESTRELLAS Y EVOLUCION ESTELAR: | |
| "Los objetos BL Lacertae", Dr. Jorge Sahade | 225-9 |
| "¿Dónde está la Población III?", Not. Ast. | 224-22 |
| "Estrella de carbono extrema", Not. Ast. | 227-24 |
| GALAXIAS: | |
| "Cúmulos globulares en galaxias gigantes", Dr. Juan C. Forte | 224-3 |
| "¿Dónde está la Población III?", "Nebulosas Planetarias en M31", Not. Ast. | 224-22 |
| MATEMATICAS Y ASTRONOMIA: | |
| "Experimentos numéricos en astronomía", Dr. Juan C. Muzzio | 226-12 |
| "Las microcomputadoras en la astronomía amateur", Manuel López Alvarez, Micr. y Astr. | 227-17 |
| NEBULOSAS Y MATERIAL INTERESTELAR: | |
| "Moléculas en el espacio interestelar", Dr. Wolfgang Pöppel | 227-2 |
| "Chorro de plasma en la nebulosa Cangrejo", Not. Astr. | 226-24 |
| PLANETAS Y SATELITES: | |
| "Monografías sobre planetas: Urano", Ambrosio J. Camponovo | 224-5 |
| "Monografías sobre planetas: Neptuno", Ambrosio J. Camponovo | 226-8 |
| "La oposición de Marte", Act. Obs. | 227-21 |
| "Imposición de nombres a planetas menores", Not. Ast. | 224-22 |
| SOL: | |
| "Resultado de las observaciones del Sol: 26-10-82 al 29-1-83, Act. Obs. | 224-17 |
| "Resultado de las observaciones del Sol: 1-2-83 al 31-5-83, Act. Obs. | 225-22 |
| "Resultado de las observaciones del Sol: 1-6-83 al 31-8-83, Act. Obs. | 226-23 |
| TECNICAS OBSERVACIONALES: | |
| "Cincuentenario de la Radioastronomía", Ing. Augusto E. Osorio | 225-7 |
| TELESCOPIOS: | |
| "Un astrógrafo portátil", Lic. Alejandro Di Baja(h), Opt. e Inst. Ast. | 225-17 |
| "Un generador de frecuencia variable para alimentar motores sincrónicos", Lic. Alejandro Di Baja(h), Opt. e Inst. Ast. | 226-21 |
| "Un reflector de 200 mm con tubo abierto estructural", Roberto R. Frommel, Opt. e Inst. Ast. | 224-14 |
| "Un reflector de 300 mm con cúpula de lona impermeabilizada", Luis J. Jenisek, Opt. e Inst. Ast. | 227-22 |
| VIDA EXTRATERRESTRE: | |
| "Los cometas y el origen de la vida", A. H. Delsemme (1ª parte) | 226-16 |
| "¿Existe vida extraterrestre?", Peter Grajam | 224-11 |
| "Las comunicaciones interestelares: la ecuación de Drake", Robert E. Machol | 224-13 |
| "Pionero 10, un mensaje entre las estrellas", Lic. Alejandro Di Baja(h) | 225-2 |