

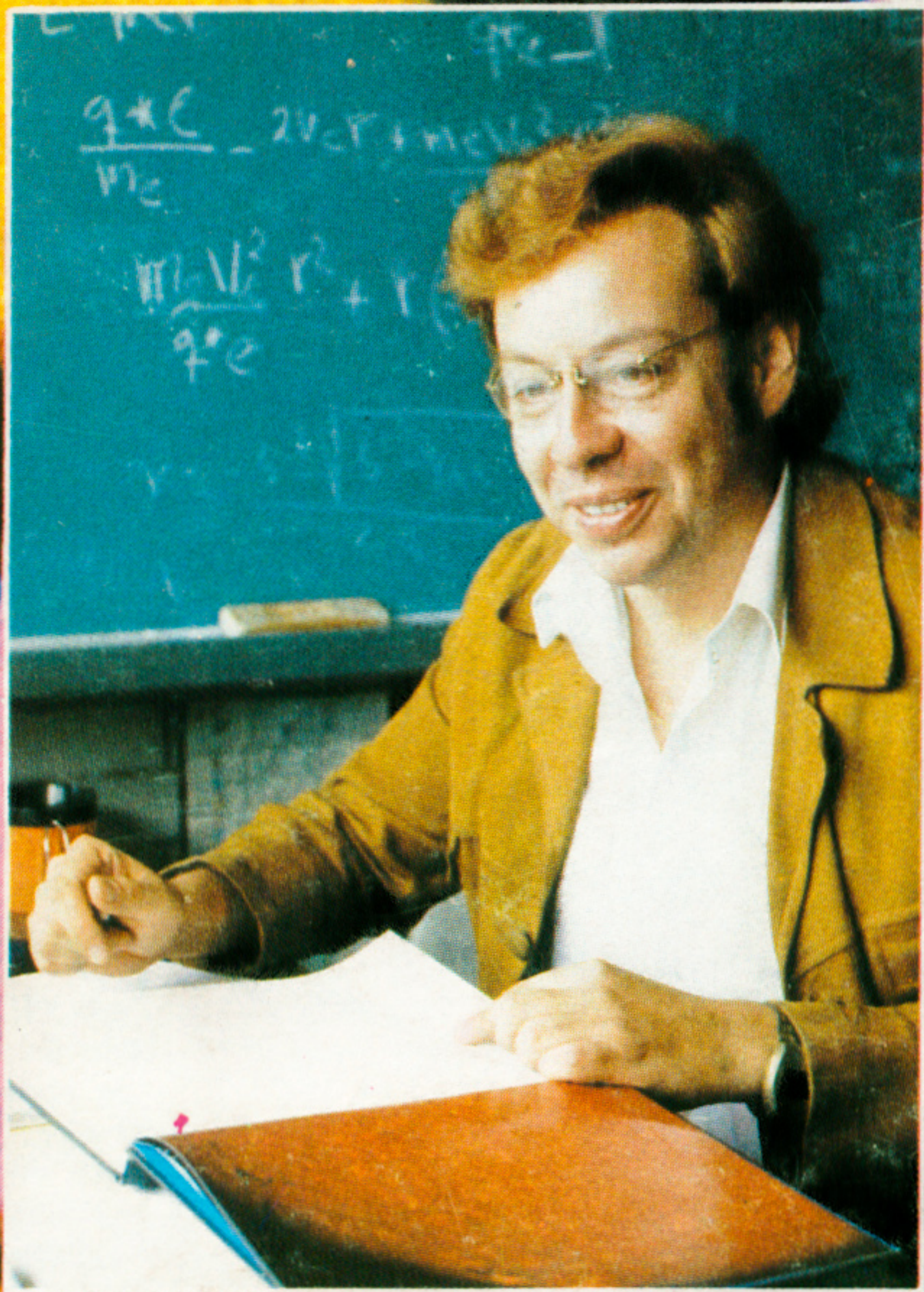
INFORMACION

CIENTIFICA Y TECNOLOGICA

EL SOL I

***Eclipse
por computadora***

***Precauciones
para ver
el eclipse***



***EL SOL
NUESTRA
ESTRELLA***

***Laboratorio
cósmico
a nuestro
alcance***



EL SOL, NUESTRA ESTRELLA

JORGE PÉREZ PERAZA
Instituto de Geofísica, UNAM

Nuestro planeta, desde su formación aproximadamente 430 millones de años después que la del Sol, ha sido bañado por la luz de nuestro astro.

El Sol es la fuente de casi toda forma de energía en la Tierra: la madera, el carbón, el petróleo son combustibles fósiles cuya energía proviene del almacenamiento de la luz solar en el pasado remoto. En el viento y en los ríos se recolecta el calor solar que conduce la circulación del aire y disipa la humedad de los mares. Nuestra provisión de alimentos es totalmente dependiente del Sol, directa o indirectamente, a través de la fotosíntesis en plantas y formas acuáticas. La fotosíntesis también libera hacia la atmósfera el oxígeno esencial para toda forma de vida animal. Sin la luz solar los mares se congelarían y la atmósfera se condensaría y solidificaría. No habría lluvia, ni nieve, ni ríos, ni lagos, ni vientos, ni nubes y, naturalmente, ningún vestigio de vida sobre nuestro planeta.

Así entonces, puesto que el Sol controla directa o indirectamente todos los modos de vida y energía sobre la Tierra, nuestra estrella tiene derecho a consideraciones especiales entre los cientos de miles de millones de soles, que constelan el firmamento; es evidente que no podemos evitar el ocuparnos de ella, labor que se viene efectuando de diversas maneras a partir de que el *Homo sapiens* conscientizó su presencia. Su estudio ha evolucionado desde aspectos de carácter puramente teológicos hasta el actual enfoque netamente científico, que se lleva a cabo en un gran número de países.

Hace aproximadamente dos millones de años un evento extraordinario ocurrió sobre la faz de la Tierra: una criatura, el *Homo erectus*, contempló por primera vez un espectáculo cotidiano, observó con curiosidad una puesta de Sol, y con asombro siguió al dorado disco que se desvanecía en las lejanías, detrás de las montañas, constatando que las nubes y el cielo devenían del color del fuego, tornándose paulatinamente en obscuridad, para sumergirse finalmente en la negrura

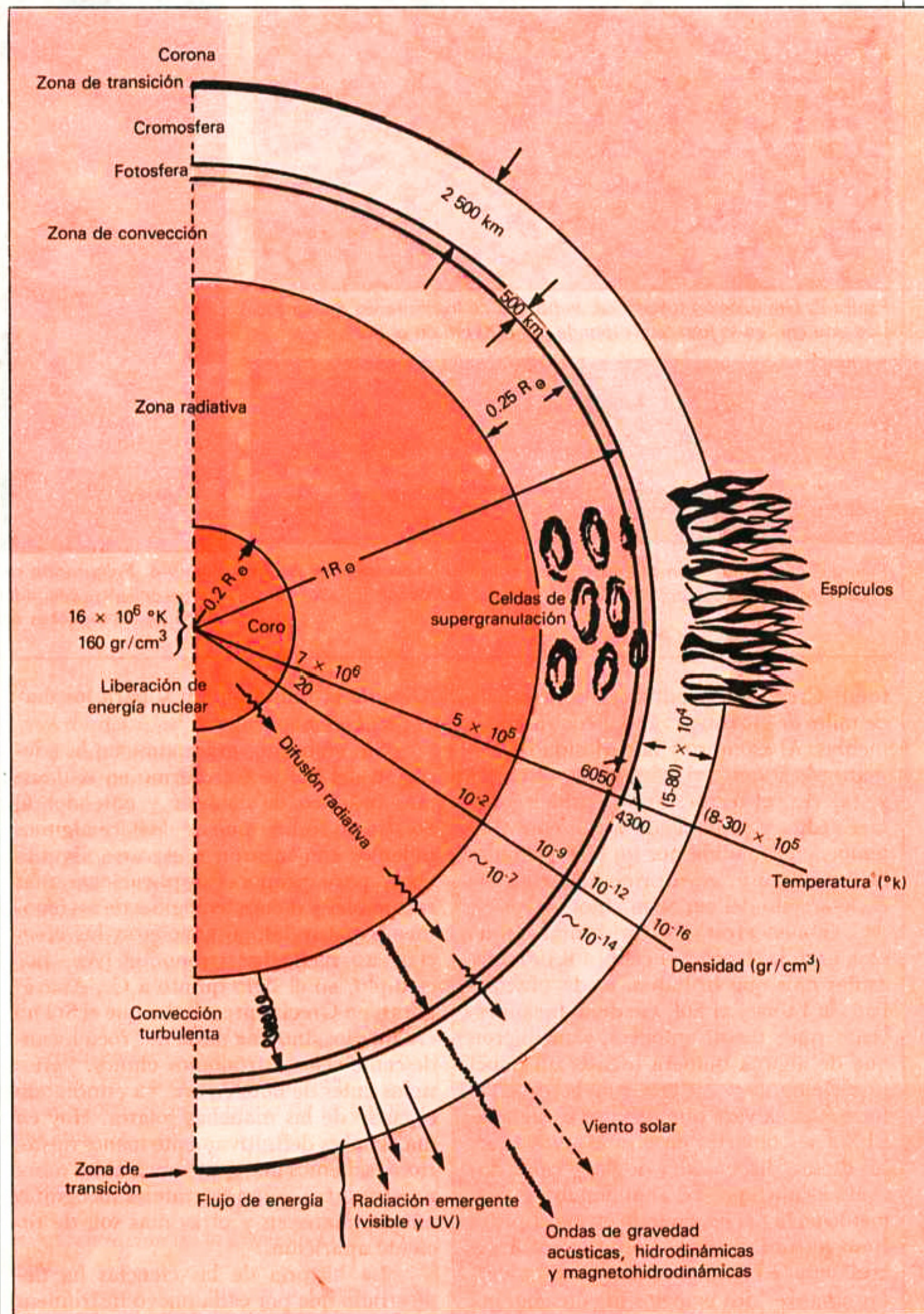


Figura 1. Variaciones de temperatura y densidad del centro a la atmósfera. Se ilustran los principales procesos físicos que tienen lugar: energía termonuclear liberada en el coro se transporta gradualmente hasta la superficie visible (fotosfera). El transporte es por procesos radiativos, en el que los átomos absorben, remiten y dispersan la radiación. A un nivel de aproximadamente 80% de su camino, el gas se vuelve inestable a movimientos radiales y la energía se transporta entonces por convección. La energía es llevada a la cromosfera, zona de transición y corona en forma de ondas.

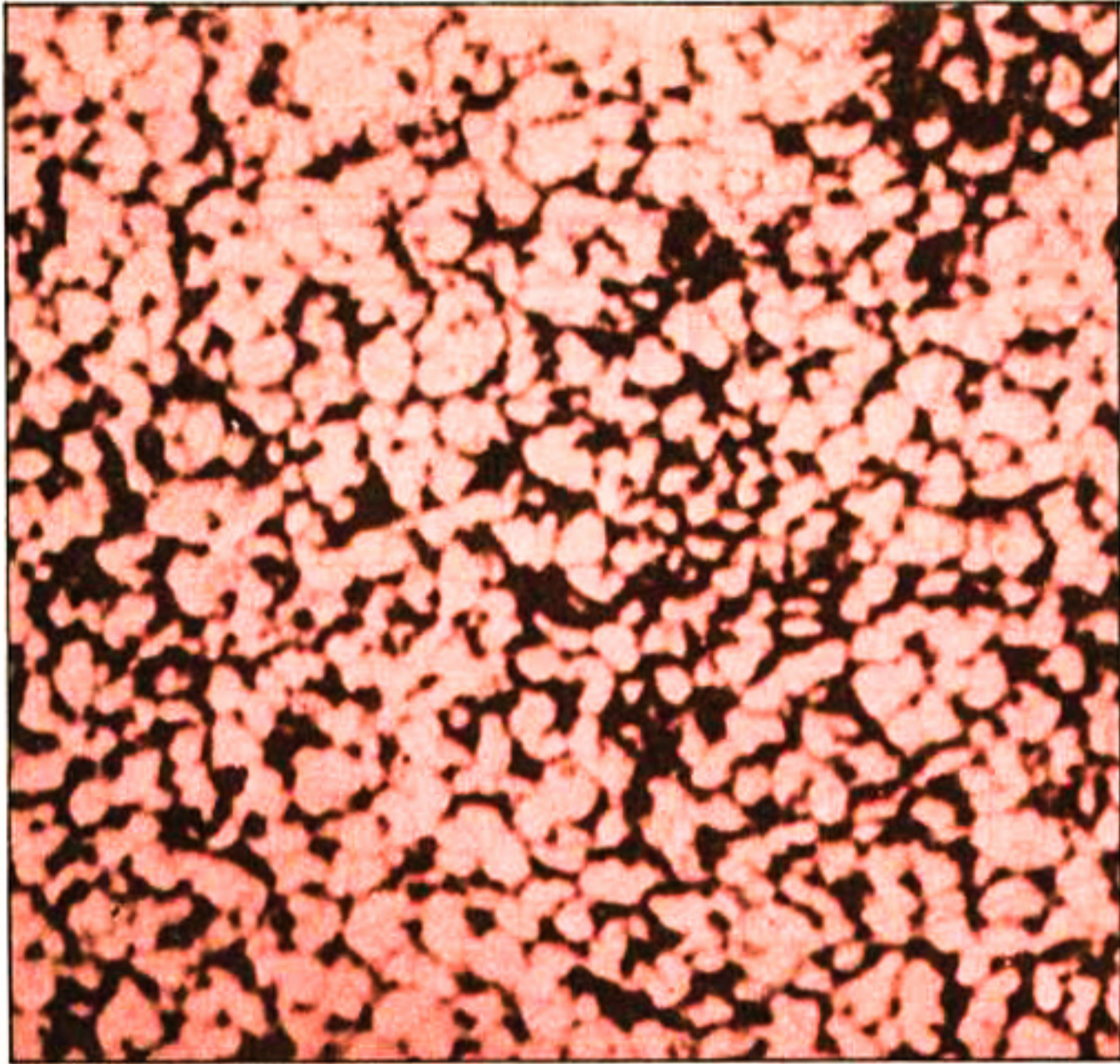


Figura 2. Granulación fotosférica, indicativa de los patrones de convección. Un cm, en la foto, corresponde a 4 600 km en el Sol.

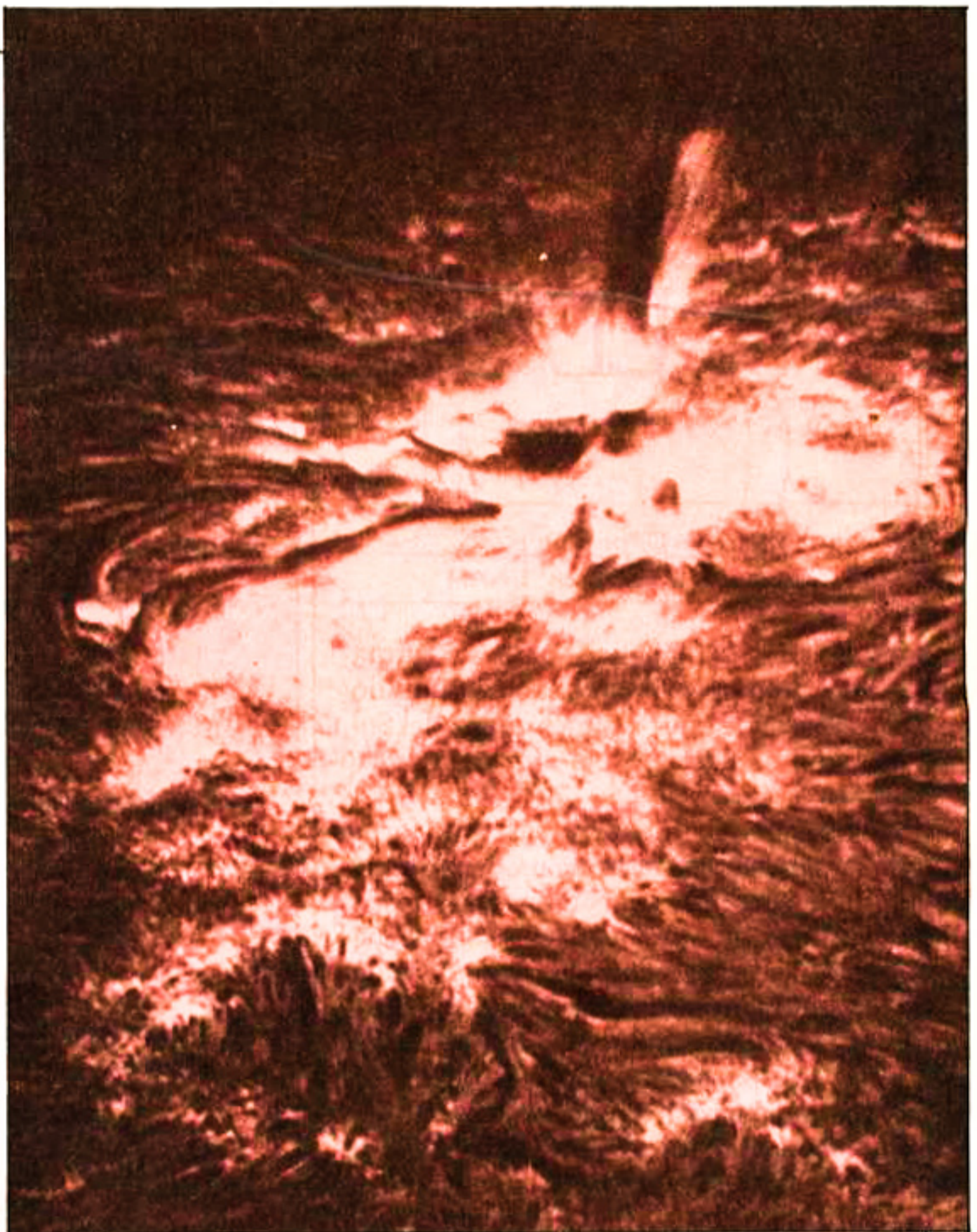


Figura 4. Fulguración solar en luz H-alfa del 22 de mayo de 1970. Las regiones brillantes circundantes son las playas cromosféricas que se encuentran arriba de las manchas solares fotosféricas.

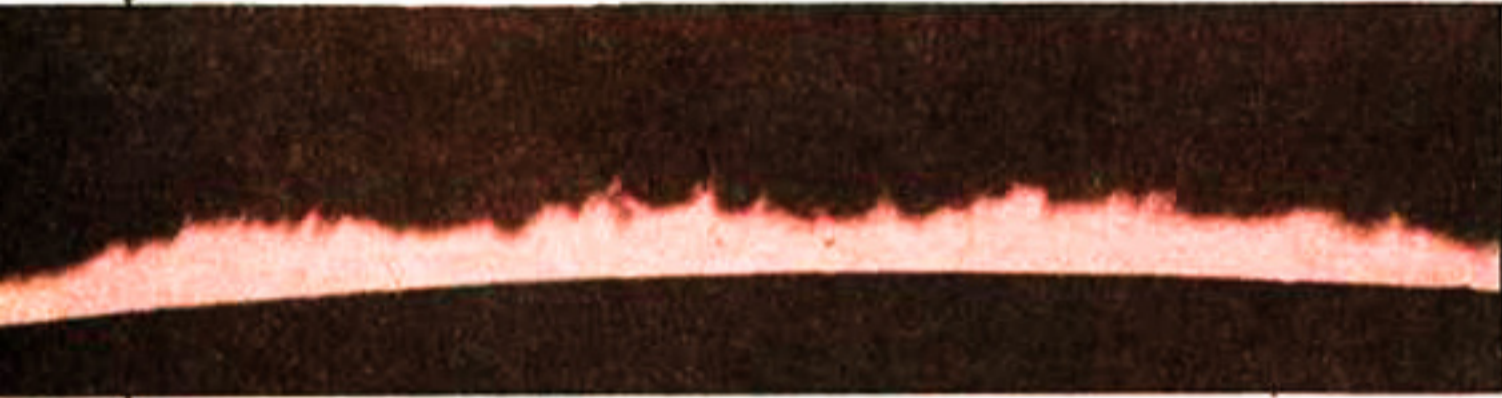


Figura 3. Espículos cromosféricos vistos sobre el limbo solar, el 31 de agosto de 1958. Fotografía en la línea alfa del hidrógeno (H-alfa).

total. Creyó sentir entonces la presencia de miles de ojos observándolo desde las tinieblas. Al asombro y la curiosidad se sumaron la inquietud, el respeto, el temor y, tal vez, el terror. Fue el principio de una ardua y prolongada lucha contra el temor, emprendida por los descendientes de esa criatura, cuya principal arma fue el desarrollo del conocimiento.

Comenzaron por preguntarse qué cosa eran la Tierra, el cielo, los innumerables ojos que brillaban en la oscuridad, la Luna y el Sol, ese disco incandescente que, desde entonces, concibieron que de alguna manera jugaba un papel predominante y misterioso en las diversas formas de la vida que regía su existencia. El Sol se convirtió en el más potente de sus dioses, dispensador de luz y calor durante el día, que los abandonaba únicamente en la noche, cuando en viaje misterioso se trasladaba al borde oriental del horizonte. El Sol fue adorado bajo diversos nombres, los egipcios lo conocían como *Amón-Ra*, los fenicios y cartagineses como *Melkarth*, los asirios y babilonios como el dios *Shamash*, los antiguos persas como *Mithras*, los griegos y romanos como *Febo*, *Apolo* y *Helios*, en tanto que para los antiguos eslavos era *Bog-Yarilo*

(Dios de la luminosidad) y para los mayas *Kukulkán*.

Sin embargo, gradualmente la adoración del Sol se transformó en el deseo más práctico de conocer y entender al Sol, de tal forma que desde hace algunos milenios comenzaron a elevarse algunas voces para proponer explicaciones más razonables y menos teológicas de los fenómenos naturales; así nacieron las ciencias, así nació la astronomía. Así, por ejemplo, en el siglo quinto a.C., Anaxágoras, en Grecia, pregonaba que el Sol no era un dios sino una masa de "roca incandescente", los astrónomos chinos, varios siglos antes de nuestra era, ya estudiaban el curso de las manchas solares. Hoy en día el Sol es definitivamente menos misterioso, sabemos más que nunca antes sobre nuestro astro, aunque grandes incógnitas aún permanecen y otras más son de reciente aparición.

La historia de las ciencias ha demostrado que por cada nuevo instrumento y nuevo esfuerzo, se pueden esperar algunas respuestas, y generalmente un buen número de nuevos cuestionamientos aparece.

Esta es la manera como aprende el científico. El 20 por ciento del contingen-

te total de astrofísicos en el mundo, se dedican de tiempo completo al estudio del Sol. El Sol es estudiado por los astrofísicos como una estrella, porque es el laboratorio estelar más cercano a nosotros, así como el núcleo del único sistema planetario definitivamente identificado en el Universo. Es la única estrella cuya superficie del disco puede ser examinada en detalle directamente. Su estudio puede conducir a un mejor entendimiento de la estructura estelar pues, supuestamente, la fenomenología que ocurre en nuestro Sol, puede tener lugar a otras escalas, en otras estrellas. En particular, es fundamental el poder entender detalladamente los procesos que mantienen la luminosidad del Sol, para una mejor descripción de la evolución estelar y el origen del universo y, por otro lado, con la esperanza de reproducir esas condiciones, en un futuro cercano, en los reactores de fusión, para obtener energía nuclear limpia, económica e inagotable.

El Sol es estudiado por los físicos como un laboratorio de condiciones irreproducibles de temperatura, densidad, dinámica de fluidos y campos magnéticos, a escala de laboratorios terrestres. En particular, el esfuerzo con-

junto de físicos de plasmas, físicos solares y físicos heliosféricos ha conducido al esclarecimiento de un gran número de procesos en plasmas, que por su incapacidad de confinarlos y estudiarlos adecuadamente en laboratorios terrestres, quedaban fuera del alcance de nuestra comprensión. El Sol es estudiado por físicos geomagnéticos, atmosféricos, aerónomos y climatólogos, por sus importantes efectos terrestres, y en particular para el mejor entendimiento del comportamiento del tiempo y del clima.

Presentación del Sol.

¿Qué tan bien conocemos nuestro astro?

Está claro que si para la mayoría de la gente el Sol representa la fuente primaria de su bienestar, para el científico, en particular el astrofísico, reviste además un carácter muy especial dentro de la inmensidad de astros del universo. Dada entonces la importancia del estudio de nuestra estrella es muy legítimo cuestionarse: ¿Qué cosas sabemos y entendemos acerca del Sol?, y ¿qué cosas nos faltan aún por entender? Con respecto a la primera pregunta, se puede decir que aunque la cantidad de información fenomenológica del Sol es cada vez más basta debido al constante refinamiento de los métodos de observación, el origen de esta fenomenología aún está lejos de ser completamente comprendida. Los aspectos que suponemos conocer con suficiente confiabilidad se pueden resumir en el siguiente cuadro, teniendo en cuenta que los parámetros relativos al interior solar son inferidos a partir de los modelos teóricos de la estructura interna solar.

El Sol: estadísticas básicas

Edad: 4 700 millones de años
Distancia promedio: 150 millones de km de la Tierra (1 unidad astronómica)
Variación de distancia en un año: $\pm 1.5\%$
Diámetro: 31' arco = 1.39 millones de km (109 veces el diámetro de la Tierra)
Área del disco visible: 6.07×10^{22} cm²
Volumen: 1.41×10^3 cm³ (1.3 millones de veces el volumen de la Tierra)
Masa: 1.99×10^{30} kg (333 mil veces el peso de la Tierra)
Densidad: Promedio de todo el Sol: 1.41 gr/cm³ (1.5 veces la densidad del agua, o sea 1/4 la de la Tierra)
 Coro (centro del Sol): 160 gr/cm³
 Fotosfera (superficie): 10^{-9} gr/cm³
 Cromosfera: 10^{-12} gr/cm³
 Corona interna: 10^{-16} gr/cm³

Temperatura

Interior (coro): ~ 15 millones °K

Fotosfera (superficie): 6 050 °K
 Mancha solar (umbra): 4 240 °K
 Mancha solar (penumbra): 5 680 °K
 Cromosfera: 4 300-50 000 °K
 Corona: 800 000-3 millones °K

Intensidades de campo magnético (típicas)

Manchas solares: 3 000 Gauss
 Campo polar general: 1 Gauss
 Regiones activas efímeras (unipolares): 20 Gauss
 Red cromosférica brillante: 25 Gauss
 Playas cromosféricas: 200 Gauss
 Prominencias: 10-500 Gauss
 Fulguraciones (ráfagas): 500-4 000 Gauss

Composición química de la fotosfera (pesada en porcentaje)

Hidrógeno: 73.46
 Helio: 24.85
 Oxígeno: 0.77
 Carbono: 0.29
 Hierro: 0.16
 Neón: 0.12
 Nitrógeno: 0.09
 Silicio: 0.07
 Magnesio: 0.05
 Sulfuro: 0.04
 Otros: 0.10

Rotación (vista desde la Tierra)

Ecuador solar: 26.8 días
 Helio latitud 30°: 28.2 días
 Helio latitud 60°: 30.8 días
 Helio latitud 75°: 31.8 días

Luminosidad (radiación solar)

Total: 3.83×10^{33} (erg/s) = 3.83×10^{23} kw (consumo de 5×10^9 kg de hidrógeno/s)

Por unidad de área de la superficie solar: 6.29 kw/cm²

Total a nivel de la atmósfera terrestre: 8×10^{14} kw

Por unidad de área de la atmósfera terrestre: 0.136 w/cm² (1.94 cal/cm²)

Brillo solar superficial (fotosférico)

398 000 veces el brillo lunar
 300 000 veces el brillo de la corona solar interna
 10^{10} veces el brillo de la corona solar externa

Aceleración de la gravedad (en la fotosfera):

28 veces mayor que en la Tierra (una persona de 60 kg al nivel del mar, pesaría 1 677 kg)

Anatomía del Sol

El Sol es una masa gaseosa y en consecuencia su rotación no es la de un cuer-

po rígido, sino que gira con diferentes periodos en las distintas latitudes, lo que se designa como rotación diferencial. El Sol no tiene características permanentes, y aunque hablamos de la "superficie" solar y de capas específicas de su atmósfera, el Sol es realmente toda una atmósfera; es decir, no presenta fronteras definidas o discontinuidades drásticas como las que en la Tierra separan el aire, el agua y los sólidos. La corona solar, la cromosfera y la fotosfera son regiones distendidas, rari-ficadas que se entremezclan entre sí, y que presentan cierta forma definida, únicamente vistas desde una gran distancia. Sin embargo, el concepto de superficie solar es convencionalmente utilizado como el nivel de esa masa gaseosa, a partir de la cual no podemos observar el Sol, delimitando el llamado disco solar de su envolvente designada como atmósfera solar.

El interior solar

Aunque las regiones internas del Sol no están accesibles a la observación directa, se puede sin embargo construir una descripción razonable de su interior, en base a cálculos laboriosos que dependen

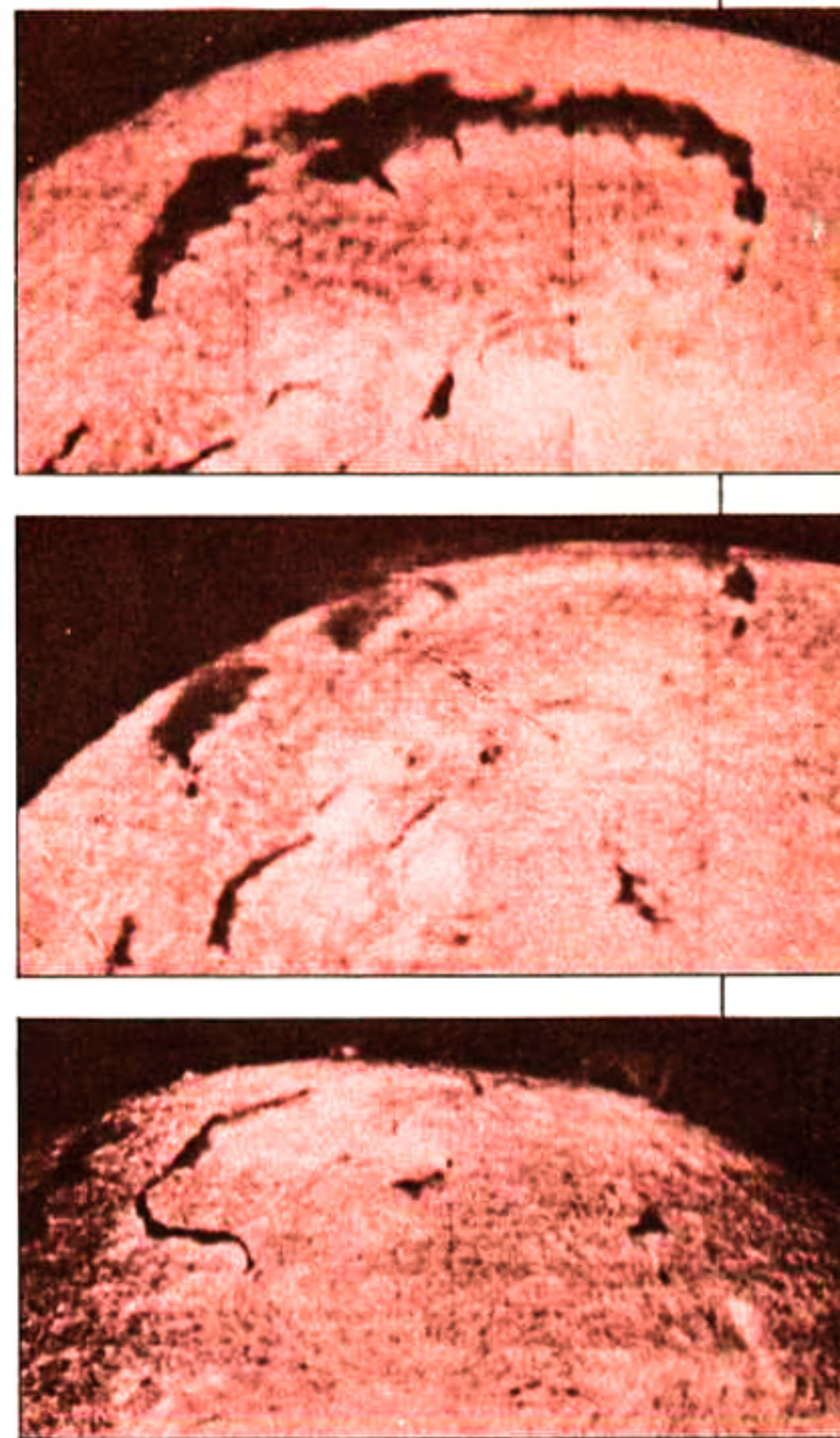
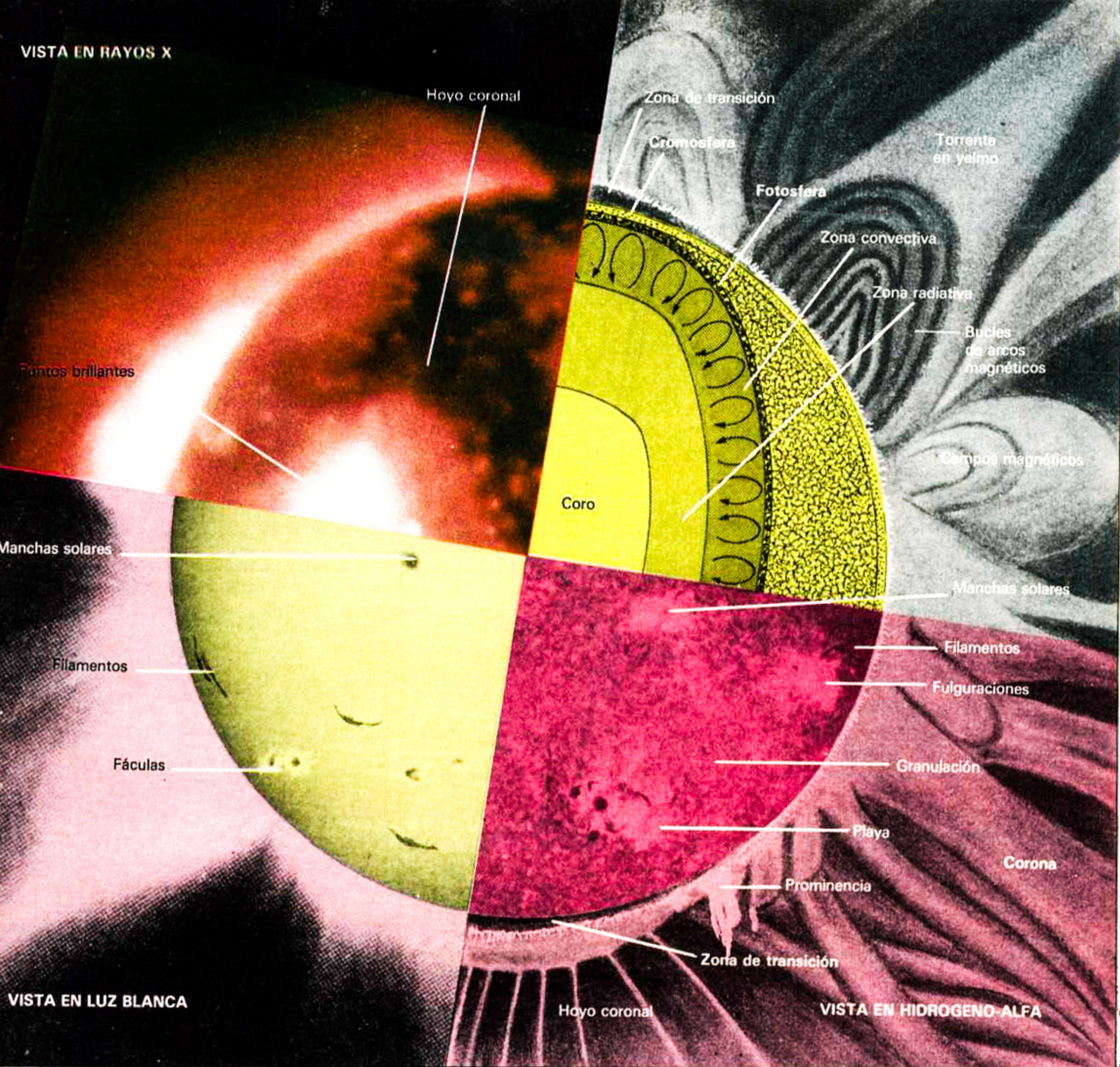


Figura 5. Filamento (prominencia vista sobre el disco en vez del limbo). Secuencia ilustrando la correspondencia entre filamento y prominencia (de arriba hacia abajo): rotando hacia el limbo se convierte en prominencia.

VISTA EN RAYOS X



Antonio Ontiveros

Figura A. Nuestro Sol: concepción del interior solar, fotografía en la línea alfa del hidrógeno en luz blanca y en rayos X (en el sentido de las manecillas del reloj respectivamente).

de nuestro conocimiento de la presión y la temperatura superficiales, la masa y el tamaño del Sol, así como del conocimiento adecuado de las tasas de reacciones nucleares proporcionada por los más refinados avances de la física nuclear, al igual que de las opacidades (es decir, qué tan transparente es el material solar al paso del calor y la radiación) provenientes de la física atómica y la teoría electromagnética.

Con esta información, se recurre a ciertos principios físicos que supuestamente gobiernan los interiores estelares. La suposición más fundamental al res-

pecto es la de que el Sol es esféricamente simétrico y se encuentra en equilibrio hidrostático radial. Es decir, que toda fuerza en cada elemento de volumen de su interior, la presión interna del gas, es suficiente para balancear el peso de las capas superiores, y el peso de una capa de gas está determinado por la atracción gravitacional de toda la materia que está por debajo de ella.

Esta suposición, en primera aproximación, está apoyada observacionalmente, pues cualquier desviación del equilibrio hidrostático conduciría a una relajación dinámica del material solar en

una escala temporal de aproximadamente una hora, y no se observa ninguna variación secular de forma o de tamaño en ese intervalo. Otras suposiciones son: el equilibrio termal, es decir, que la tasa de producción de energía, en el interior, es exactamente igual a la tasa de radiación desde la superficie; que los elementos químicos fueron todos distribuidos uniformemente a través del Sol, cuando éste se formó; que cualquier campo magnético inicial en el Sol decayó rápidamente, y que la materia del centro solar no se ha mezclado con la de la superficie solar.

Estas suposiciones constituyen entre

otras, las hipótesis básicas de los llamados modelos convencionales del interior solar, aunque naturalmente ha sido desarrollada una gran diversidad de variaciones alrededor de estos modelos estándares. Es evidente que todo modelo del interior solar debe reproducir la luminosidad fotónica observada. El modelo actual del Sol prevé un interior solar compuesto de material radiativo y una envoltura convectiva (figura 1). El interior radiativo consta de un coro muy denso de aproximadamente 100 veces la densidad del agua ($158-160 \text{ gr/cm}^3$), con temperaturas entre $15-18$ millones de $^\circ\text{K}$, en un volumen concéntrico comprendido entre $0.2-0.25$ de radio solar, rodeado de una zona intermedia en donde la temperatura y la densidad descienden hasta $5 \times 10^5-10^6 \text{ }^\circ\text{K}$ y 10^{-2} gr/cm^3 respectivamente. La zona *radiativa* (coro y zona intermedia) ocupa un volumen de $0.7-0.86$ de radio solar y el 97% de la masa del Sol. La zona *convectiva* se extiende entre $0.14-0.3$ del radio, con temperaturas que van desde $\sim 10^6 \text{ }^\circ\text{K}$ en la base hasta $6.2 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$ en la proximidad de la superficie visible (la fotosfera). La temperatura y densidades promedio que se estiman son de $6.6 \times 10^3 \text{ }^\circ\text{K}$ y $4 \times 10^{-3} \text{ gr/cm}^3$. Las dispersiones en los parámetros físicos calculados, indican resultados acordes a diferentes modelos. Las temperaturas y densidades excesivamente elevadas que se producen en el coro del Sol, son suficientes para inducir reacciones nucleares entre los diferentes elementos, que a esa temperatura se encuentran completamente desprovistos de sus electrones.

Supuestamente, el proceso nuclear

más factible es el de la fusión de 4 átomos del combustible más abundante en el Sol: el hidrógeno, en un átomo de helio. Por cada átomo de helio que se produce, una pequeña cantidad de energía es emitida en el extremo invisible de onda corta del espectro electromagnético, es decir, en rayos gamma. La energía se transporta al exterior en forma de radiación luminosa. Sin embargo este transporte es muy accidentado y en el camino ocurren transformaciones en la presentación de la radiación. Debido a la alta densidad del coro solar, el transporte radiativo es realizado mediante una larga y tortuosa serie de repetidas absorciones y reemisiones, perdiendo gradualmente energía y cambiando así a longitudes de onda cada vez más largas durante el proceso: primero la radiación gamma ha sido reemplazada por rayos X, luego por rayos ultravioleta, de tal manera que cuando finalmente emerge de la superficie solar (fotosfera), está en forma de luz visible y de radiación infrarroja.

Así entonces, un fotón emitido en el coro solar tarda aproximadamente 50 millones de años para alcanzar la superficie solar, y solamente 8.3 minutos para alcanzar la Tierra. Es decir, que lo que ahora vemos salir del Sol refleja lo que sucedió hace 50 millones de años en su centro. Si el fotón no encontrara ningún obstáculo en su camino desde el centro hasta la superficie solar, tardaría aproximadamente 2.3 segundos en salir. A un cierto nivel de su recorrido ($\sim 70-86\%$), es decir $200\,000$ a $100\,000 \text{ km}$ antes de alcanzar la superficie, la temperatura que ha decrecido con regularidad es lo sufi-

cientemente baja para que los electrones se recombinen con los protones, formando hidrógeno atómico.

En esta zona el gas deviene inestable a movimientos radiales y la energía es entonces transportada ya no en forma de radiación, sino en forma de calor por convección: el material caliente que alcanza esta zona relativamente fría, se enfriará un poco más despacio que el material circundante, con la tendencia a seguir su trayecto de ascensión a la manera de las burbujas en un recipiente de agua hirviendo, transmitiendo así algo de su energía a la fría fotosfera. Una vez que han radiado los gránulos algo de su energía calorífica descienden para ser calentados nuevamente, creando corrientes de convección en el proceso. Es así que se generan movimientos convectivos cuya manifestación es la textura granulada de la fotosfera (figura 2).

Cada *gránulo* solar tiene una vida media aproximada de 10 minutos y un diámetro promedio de $1\,000 \text{ km}$. Superpuesto a estas células de convección que presumiblemente circulan muy cerca de la fotosfera, existen otros patrones celulares que constituyen la llamada supergranulación, que se supone penetran mayores profundidades en su proceso de vaivén (a $10\,000 \text{ km}$ por abajo de la fotosfera). Estas células han sido asociadas a los fenómenos de la actividad solar y su vida media es de aproximadamente $8-20$ horas; tienen diámetros del orden de $30\,000 \text{ km}$. En efecto, es en la cima de la zona convectiva que se escapan los fotones de luz, y a partir de ese nivel entramos en el



Figura 6. Prominencia activa vista desde el Skylab en luz ultravioleta. Los colores computarizados representan diferentes temperaturas del plasma local. En blanco y negro los colores rojos registran en medio tono y los azules en oscuro.

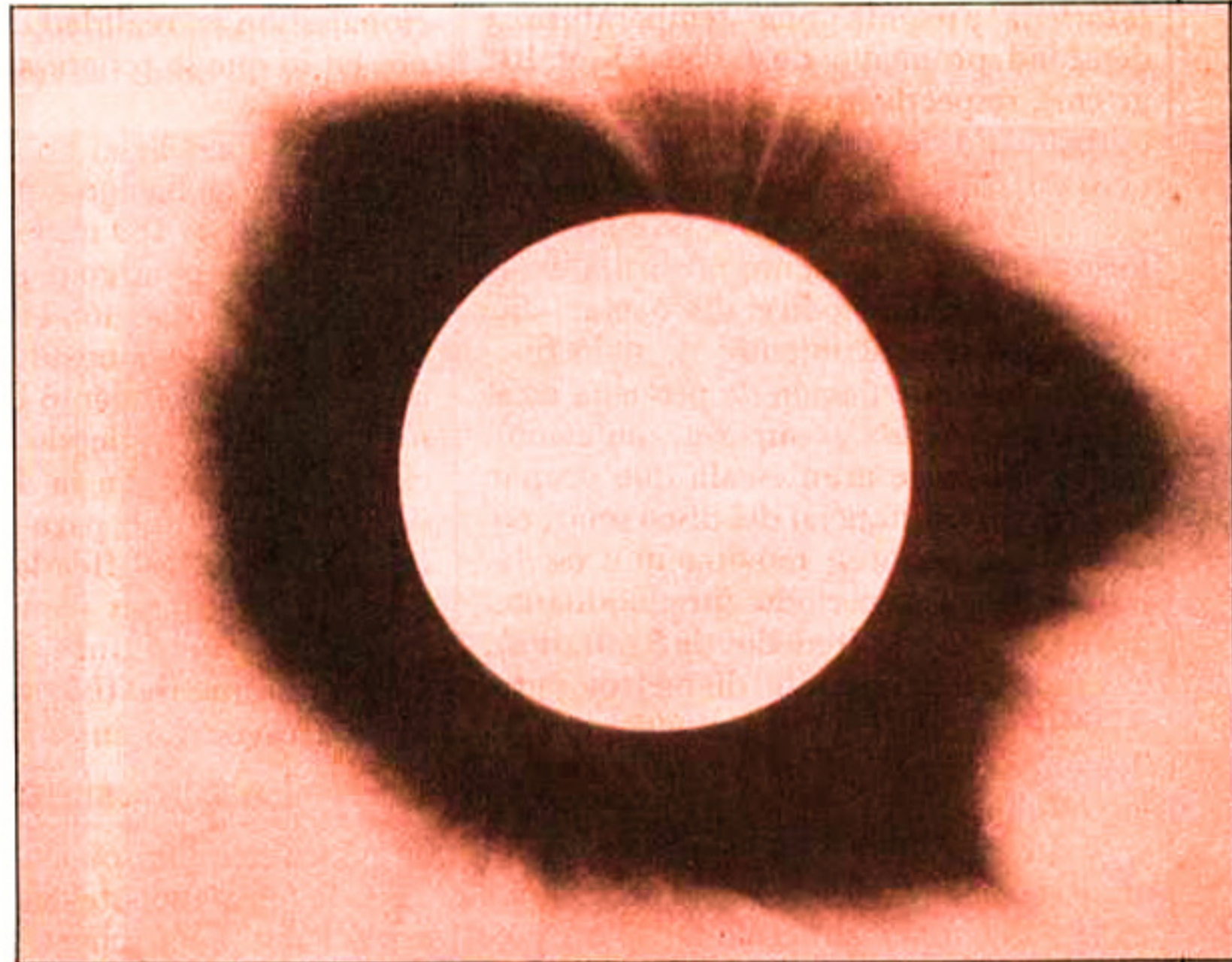


Figura 7. Corona solar durante un periodo de máxima actividad solar. La corona se expande a varias unidades astronómicas, pero su densidad disminuye tan rápidamente que resulta muy difícil fotografiarla más allá (viento solar) de 1 o 2 radios solares.

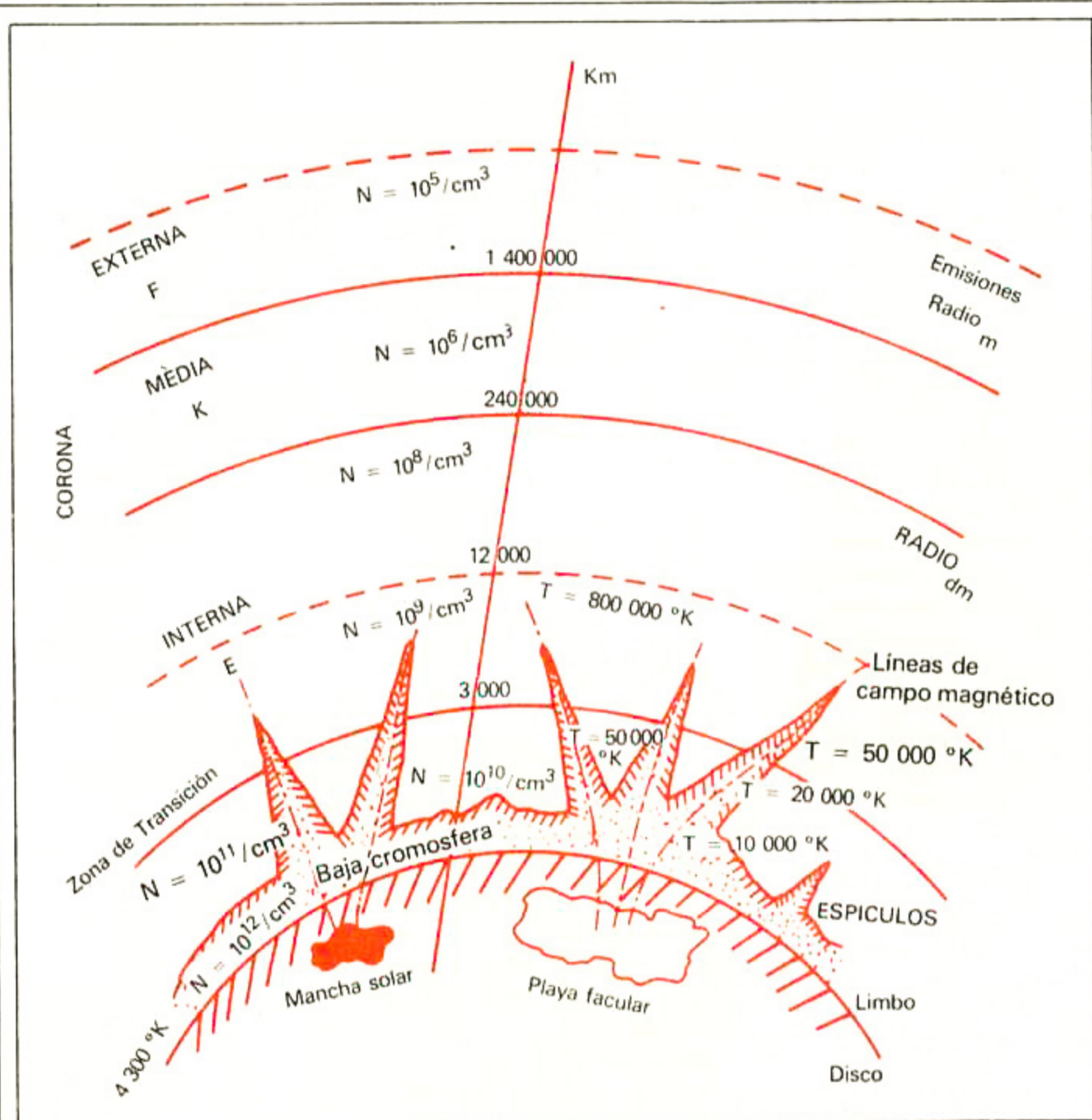


Figura 8. Estructura de la atmósfera quiescente (no está a escala).

dominio de lo observable, pues no sólo la temperatura ha decrecido del centro hacia el exterior sino la densidad también.

La superficie observable, es decir, la *fotosfera* presenta una temperatura y densidad promedio de $6\,050 \text{ }^\circ\text{K}$ y 10^{17} gr/cm^3 , respectivamente, tiene un espesor aproximado de 500 km, es decir, menos de 0.001% del radio solar. La fotosfera está lejos de presentar un aspecto de uniformidad. No solamente no brilla de la misma manera en todo el disco solar, sino que presenta movimientos de todo tipo: patrones de circulación de pequeña escala (granulación y super-granulación); movimientos de gran escala que ocupan una porción sustancial del disco solar, como celdas gigantes; movimientos oscilatorios de corto periodo (predominantemente centrados alrededor de 5 minutos), asociados a células de diámetros entre 5 000-10 000 km, y oscilaciones globales de periodos largos, que van desde 15 hasta 160 minutos.

Una de las corroboraciones obvias observacionales de un modelo del interior solar, consiste en su habilidad para predecir modos normales de vibración de la estrella, comparables a los observacionales. En lo concerniente a las oscilaciones de corto periodo ($\sim 5 \text{ min.}$), la coinci-

dencia entre las predicciones de los modelos estándares y las mediciones observacionales, son remarcablemente buenas, lo cual sugiere que los modelos convencionales son en realidad correctos, al menos en lo que se refiere a las envolventes estelares.

Para sondear al Sol más a fondo se requiere de oscilaciones de largo periodo. Oscilaciones de 160 minutos han sido detectadas, sin embargo la predicción de tales modos de vibración es aún de carácter controversial. Hemos sido testigos recientemente del nacimiento de la *sismología solar* y estamos viviendo su tierna infancia: al igual que en la Tierra las ondas sísmicas se utilizan para el análisis de la estructura estratificada del interior terrestre, las ondas sísmicas solares nos brindarán en el futuro un conocimiento de los parámetros físicos de las diversas capas atravesadas en el Sol.

La atmósfera solar

La vecindad solar no puede ser observada normalmente desde la Tierra, excepto cuando un eclipse total bloquea la luz de la fotosfera, o cuando instrumentos especialmente diseñados para simular un eclipse (*coronógrafos*) son utilizados para ocultar la radiación fotosférica. Esto es

normal debido a que las capas envolventes del Sol son mucho menos densas y brillantes que la fotosfera. Inmediatamente encima de la fotosfera se encuentra la cromosfera (esfera de color), que toma el nombre de su coloración rojo-pálido debida a una de las líneas de emisión más intensas del hidrógeno local. Esta capa atmosférica se extiende por arriba de la fotosfera a una altura promedio de 2 500 km; sin embargo su frontera rugosa e irregular puede extenderse hasta alturas del orden de 5 000-20 000 km, en forma de espículos, sumergiéndose en las capas superiores de la atmósfera.

Los espículos se observan como torrentes de gas luminoso que se expulsan como *géiseres* hacia arriba, cayendo nuevamente o disipándose a una altura promedio de 10 000 km. Es un fenómeno que se asemeja al de las olas turbulentas en un mar tempestuoso. Su vida media es de 5 a 10 mm, y sus diámetros son en promedio de 700 km. Estas columnas de gas son más frías ($10\,000 \text{ }^\circ\text{K}$ en promedio) y densas que el material circundante. La temperatura cromosférica va de $4\,300 \text{ }^\circ\text{K}$ al nivel de su base en la fotosfera, a $\sim 7\,500$ a $1\,500 \text{ km}$ de altura, hasta $50\,000 \text{ }^\circ\text{K}$ a una altura de 3 000 km. A alturas mayores de 5 000 km, el material circundante a los espículos alcanza temperaturas del millón de $^\circ\text{K}$, y evidentemente no se trata ya de material cromosférico, sino de material de mucha menor densidad y mayor temperatura, y por consiguiente con diferentes propiedades ópticas.

En el dominio de las radio-ondas, la cromosfera emite en longitudes cortas menores a los 10 cm. La cromosfera superior, al igual que un océano, se mantiene en estado de permanente cambio dinámico: aproximadamente 100 000 espículos están presentes en cualquier momento en la cromosfera solar (figura 3). Además de los espículos, otro tipo de estructuras participan en la dinámica cromosférica: las *fulguraciones* (o ráfagas) (figura 4), los *filamentos* (figura 5), y las *protuberancias* (o prominencias) *activas* (figura 6). En tanto que los espículos se asocian a los procesos de calentamiento de la atmósfera por energía no-radiativa, los últimos se asocian a los procesos de actividad solar. Ambos procesos serán discutidos en el próximo número.

La emisión propia de la atmósfera, bajo el influjo de la energía no-radiativa que la abastece, emite intensamente en el dominio del ultravioleta. Al alcanzar la atmósfera terrestre esta radiación genera una capa de partículas eléctricamente cargadas (núcleos desprovistos de algunos de sus electrones periféricos), conocida como ionosfera, que es la capa encargada de reflejar las ondas de radio, lo que hace posible las radiocomunicaciones de largo alcance.

Inmediatamente encima de la cromosfera, aproximadamente a 3 000 km de altura, se encuentra una capa extremadamente dinámica, en donde tiene lugar un fuerte gradiente de temperatura, que pasa de aproximadamente 50 000 °K a cerca de 1 millón de °K. El espesor de esta zona es de aproximadamente 100 km pero de manera muy irregular. Abarca desde unos cuantos km hasta inclusive 12 000 km (el diámetro de la Tierra) a nivel de los llamados hoyos coronales, cercanos a los polos, en donde la densidad y la temperatura son particularmente reducidas. El Sol, siendo para el hombre el astro rey, como todo soberano amerita una *corona*, y es así como se designa a la atmósfera exterior del Sol. En ocasiones de eclipse total se observa que el Sol está cubierto por un halo luminoso, de color blanco perlado, cuyo brillo total es ligeramente superior al de la Luna (figura 7). Este halo coronal se extiende desde aproximadamente 0.01 de radio solar por arriba de la fotosfera, hasta varias unidades astronómicas, cubriendo el sistema solar y, quizá, hasta encontrarse con el campo magnético interestelar, lo que define una cavidad referida con frecuencia como la *heliosfera*.

La radiación de la corona en el visible muestra tres principales componentes ópticamente distintos, lo que indica tres morfologías físicas diferentes (figura 8). Así pues, la corona visible durante un eclipse permite observar la llamada corona E (interna), en la que la luz se emite por átomos altamente ionizados y que se extiende hasta una altura aproximada de 12 000 km (con densidades típicas de $10^{14} - 10^{15}$ gr/cm³, y con emisiones radioeléctricas decimétricas) hasta aproximadamente 240 mil km.

Enseguida viene la corona K (o media) que se extiende hasta 2 radios solares y cuyas densidades varían entre $10^{16} - 10^{18}$ gr/cm³; la luz que atraviesa estas capas, proveniente de la fotosfera, es dispersada por los electrones libres (difusión Thomson). Más allá de dos radios solares se encuentra la corona F (o externa), en la que la luz es dispersada por los granos de polvo interplanetario (luz zodiacal) y que emite típicamente en ondas métricas, pues las densidades son del orden de 10^{19} gr/cm³ o menores. La temperatura coronal es del orden de 1-3 millones °K, con incrementos localizados superiores a los 10 millones °K. De acuerdo a estos parámetros es de suponerse que la corona emita también en rayos X, sin embargo, como la atmósfera terrestre no es transparente a los rayos X como a las radio ondas, esta radiación no fue detectada hasta el inicio de la era espacial (figura 9). Puesto que los rayos X sólo se generan en la corona, no es necesario bloquear el disco solar con los telescopios espaciales de rayos X.

La corona está en un estado de permanente expansión, y a esta materia en expansión (protones con velocidad promedio de 2 milésimas de la velocidad de la luz) se le denomina *viento solar*. Su flujo promedio es de 3×10^{16} gr/cm², lo que corresponde a una pérdida total de masa del orden de 10^{14} masas solares por año (figura 10). El viento solar se comporta como un medio continuo, pues su densidad es relativamente baja (su concentración al nivel de la órbita terrestre es de 10 protones/cm³ aproximadamente). La existencia de este viento solar fue predicha desde finales del siglo pasado y corroborada con los primeros vehículos espaciales. Este flujo de partículas cargadas de origen so-

lar es responsable de los anillos exteriores de Van Allen alrededor de la Tierra, las *auroras polares* que tienen lugar en la atmósfera terrestre, las *tormentas geomagnéticas* que afectan la magnetosfera terrestre y, presumiblemente, juegan un cierto papel en el comportamiento general del clima terrestre.

La corona presenta también una superposición de estructuras, algunas de las cuales no revelan una asociación aparente con la actividad magnética del ciclo solar, en tanto que en otras esa asociación parece evidente (figura 11). Entre las primeras estructuras cabe mencionarse, los *hoyos coronales*, que son regiones extendidas en donde las temperaturas y densidades son bajas en relación a las regiones vecinas (1 millón de grados Kelvin, en tanto que la temperatura de las regiones adyacentes es de 1.5 millones de grados e incluso 3 millones en los centros activos). Los hoyos coronales están asociados a líneas abiertas de campo magnético, que divergen radialmente en forma de "plumas", en contraste con el campo magnético general cerrado en forma de arcadas. El material solar adherido a las líneas de campo magnético (debido a la alta conductividad del gas), produce en el caso de estas líneas abiertas las llamadas *plumas polares*, que se observan en los eclipses y que están indisolublemente asociadas, como características integrales, a los hoyos coronales.

Los hoyos coronales parecen estar siempre presentes en los polos, aunque a menudo se extienden a otras latitudes del Sol; estos hoyos no-polares parecen estar confinados a grandes áreas de campo magnético de una sola polaridad (unipolares), que cubren del 10 al 15 por ciento del disco solar (ver figuras 9 y A). El des-

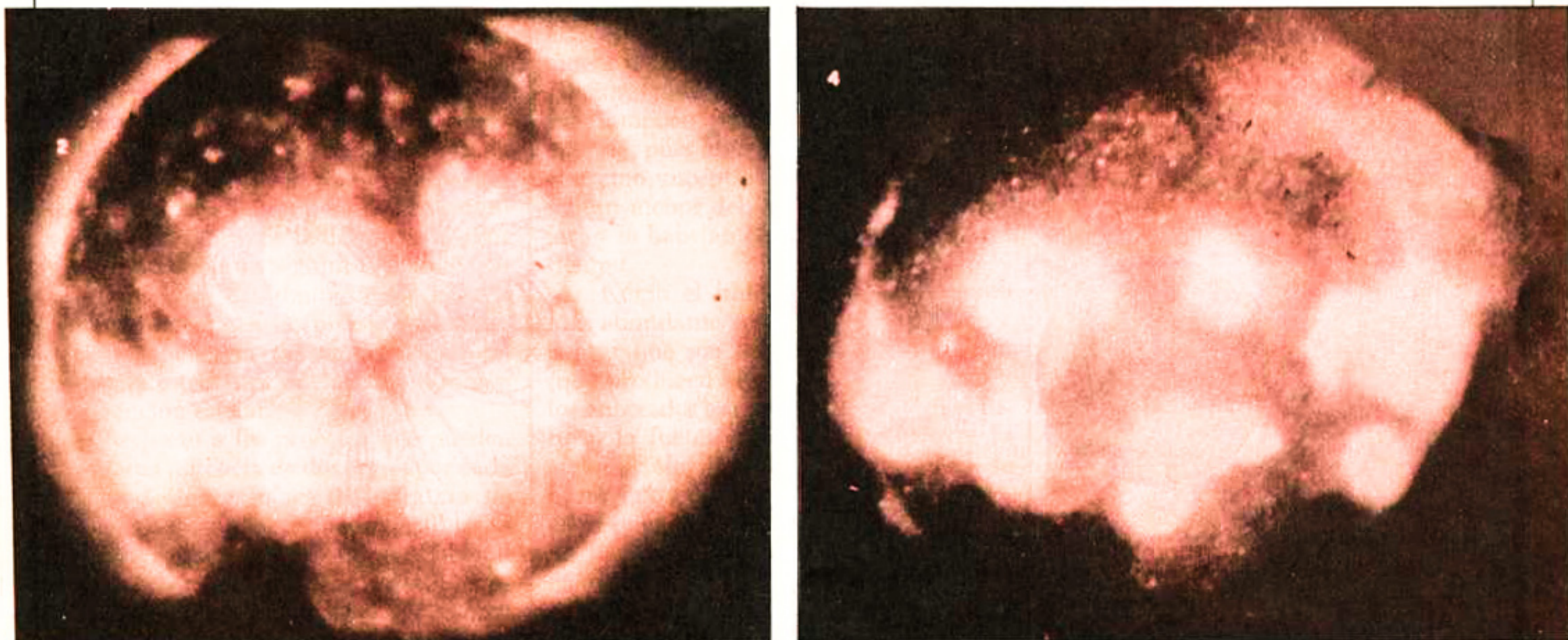


Figura 9. Fotografías en rayos X del Sol tomadas por el Skylab. Las tomas en colores rojo y azul computarizadas (rojo tonos oscuros; azul, claros) corresponden respectivamente a rayos X blandos y rayos X duros (menor y mayormente energéticos).

arrollo y evolución de los hoyos coronales parece ser controlado por un cierto tipo de *tectónica de placas*, en que cada región unipolar forma una placa (o *continente magnético solar*): la deriva de estos continentes magnéticos da origen a hoyos coronales localizados, en tanto que el acercamiento entre dos placas de la misma polaridad produce los alargamientos observados hacia las heliolatitudes menores.

Ha sido evidenciada una asociación directa entre las tormentas geomagnéticas recurrentes, producidas por *torrentes de muy alta velocidad del viento solar*, con los hoyos coronales. En efecto, la fuente de esos "chorros" de viento solar de muy alta velocidad ha sido localizada en los hoyos coronales. Otra estructura interesante son las *prominencias* (protuberancias) *tranquilas*, que son extensiones nebulosas de la cromosfera dentro de la corona (figura 12). Se extienden regularmente hasta 100 000 km de altura, poseen un coro más frío que sus capas envolventes, y parecen estar asociadas a campos magnéticos de gran escala.

Otras estructuras presentes son los llamados *torrentes* (o *chorros*) *coronales*, de los cuales los más comunes son los *torrentes en yelmo*, presentes por lo general en la corona K pero que pueden extenderse inclusive hasta 5 radios solares. Estas estructuras corresponden a reforzamientos de la densidad y temperatura con respecto a los valores locales coronales. Su base está sostenida presumiblemente por campos magnéticos arqueados que se abren gradualmente con la altura. Con respecto a las estructuras coronales aso-

ciadas a la actividad magnética solar, pueden mencionarse los *puntos brillantes en rayos X* (ver figuras 9 y 16), de aproximadamente 30" de diámetro que tienen forma de arcos, los llamados *bucles coronales*, que se agrupan para formar los *centros de actividad* en estructuras bipolares de campo magnético, que curiosamente pueden estar asociados con la supergranulación subfotosférica, pues tienen vidas medias similares (~ 8 horas).

Se observan también las *prominencias activas* (o eruptivas) (ver figuras 6 y 16) que se expulsan al exterior, fragmentadamente, con velocidades del orden de 400-1 000 km/seg, y alcanzan alturas hasta de dos radios solares en 20 minutos. Son estructuras más densas y más frías que la corona (30 000-90 000 °K). Algunas veces acompañan a las fulguraciones solares, aunque el volumen que ocupan es muchísimo mayor. Sus efectos son conmensurables a nivel de la atmósfera terrestre.

Evidentemente las mismas fulguraciones solares ocurren parcialmente en la corona interna. Otra manifestación coronal son los llamados *transientes* coronales (figura 13), que son eventos violentos en los que estructuras de tamaño colosal, mayores que el disco solar y en forma de bucles arqueados, se desplazan a grandes velocidades, a distancias que sobrepasan la órbita terrestre. Contienen relativamente poca masa total, pero mucho mayor cantidad que una prominencia eruptiva. Más del 75 por ciento de los transientes se originan en centros activos del Sol; cuando menos un 70 por ciento son iniciados por prominencias eruptivas, en tanto que aproximadamente un 5

por ciento son originados por una fulguración solar.

En síntesis, durante la última década ha quedado claro que no existe una corona homogénea y quieta, como se discutía anteriormente en la literatura, sino que consiste de estructuras complejas que están directa o indirectamente relacionadas a estructuras magnéticas, fotosféricas y cromosféricas, tales como los centros activos. La presencia de arcos, plumas y bucles coronales son indicadores del control magnético sobre el movimiento del gas coronal, que lo obliga a moverse a lo largo de las líneas de fuerza. De hecho, la alta conductividad del plasma solar mantiene al material atado al campo magnético, y aunque a nivel de la fotosfera la presión de gas excede a la presión magnética (el parámetro $\beta \gg 1$), en la corona solar la situación es la opuesta.

Ninguna medición directa de los campos magnéticos coronales existe hoy en día, y no parece probable que se obtenga en un futuro cercano; sin embargo, el campo a nivel fotosférico puede ser inferido del desdoblamiento Zeeman de las líneas espectrales (figura 14). Estas mediciones unidimensionales o bidimensionales son extrapolables, matemáticamente, a estructuras tridimensionales de los niveles superiores de la atmósfera (figura 10), y se encuentran similitudes notables con las estructuras observables en rayos X.

En fin, se puede decir que físicamente no hay discontinuidades bruscas entre la fotosfera, la cromosfera y la corona. Sin embargo, su distinción corresponde a propiedades ópticas diferentes que, consecuentemente, entrañan métodos de

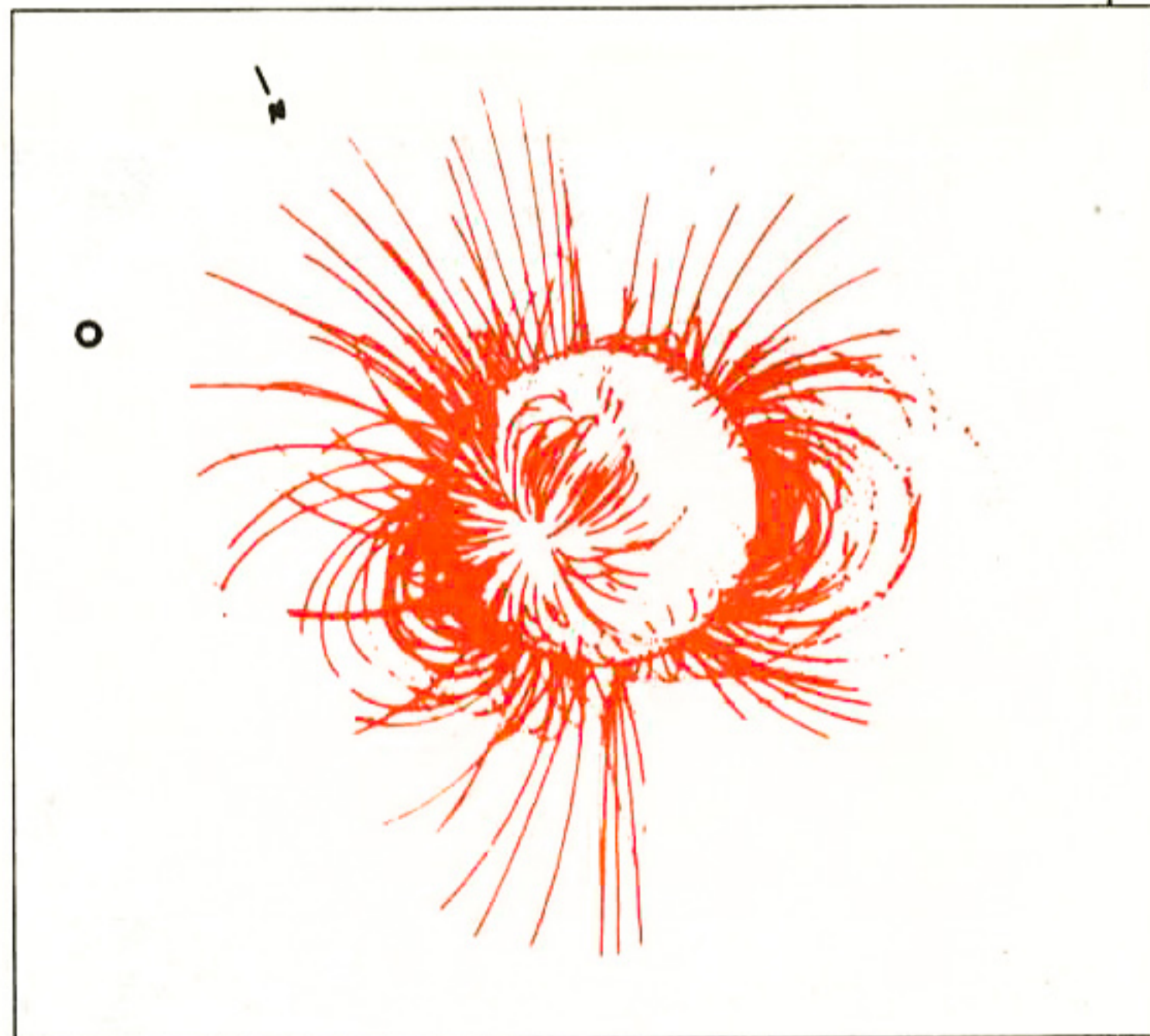
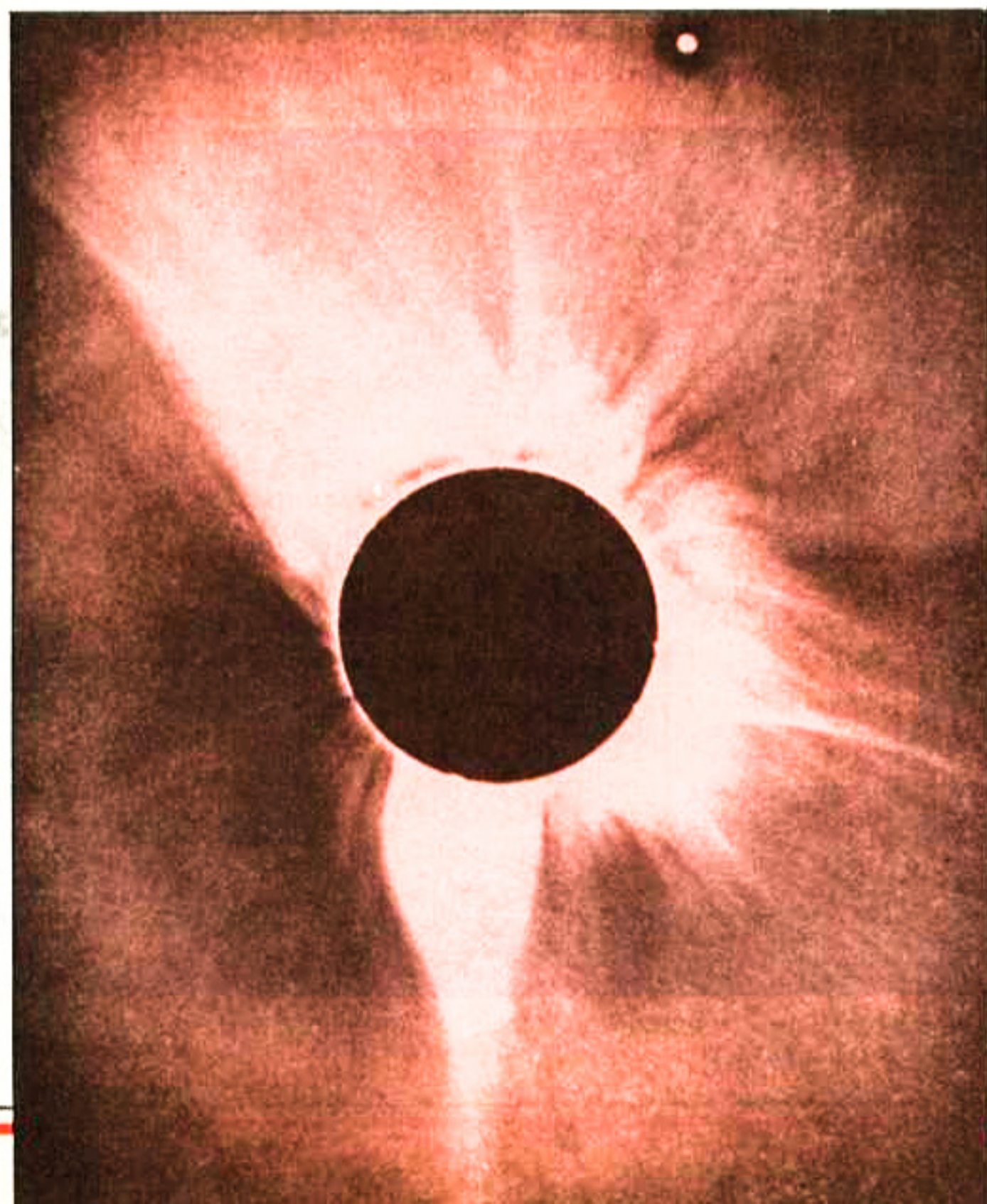


Figura 10. Se ilustra la expansión de la corona que da origen al viento solar (vista del 12 de noviembre de 1966), y el campo magnético coronal correspondiente, de acuerdo a los cálculos de Gordon Newkirk.

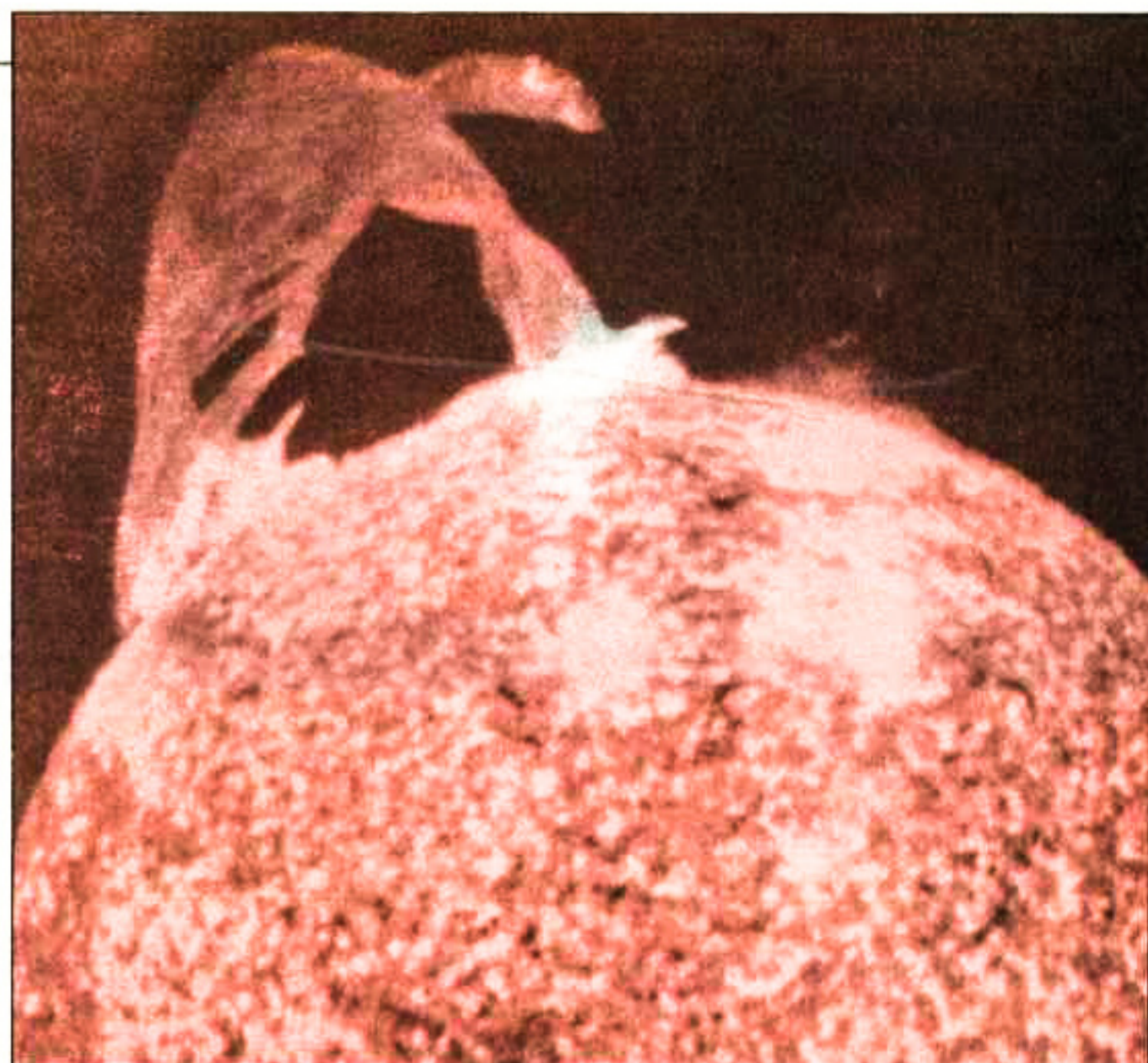
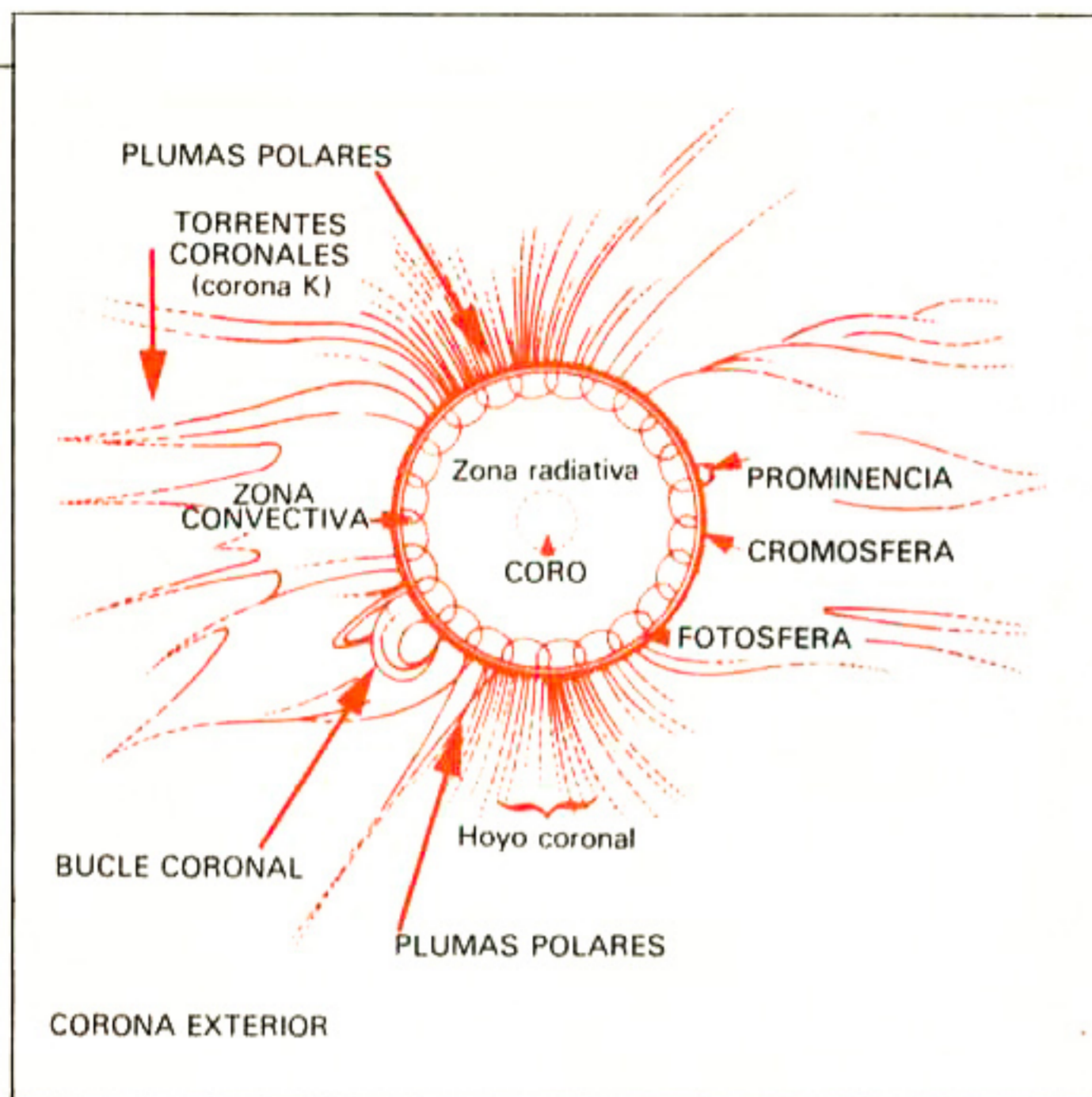


Figura 11. Corte transversal del Sol identificando algunas de las estructuras atmosféricas que el lector muy probablemente ha visto en fotografías, o quizá con algún lente especial durante un eclipse solar.

Figura 12. Prominencia quiésciente: la mayor vista en la última década (foto en UV con colores computarizados: rojo intenso que en blanco y negro registra gris, y amarillo brillante, que aquí se ve blanco).

observación distintos, así como modificaciones progresivas de la termodinámica y magnetohidrodinámica, cuando se pasa de una capa a otra (figuras 15 y 16).

La fuente de energía del horno solar

Estudios geológicos y paleontológicos demuestran que el brillo del Sol no ha tenido variaciones catastróficas, al menos desde la formación de nuestro planeta. Los cambios graduales que predice la teoría ($\sim 30\%$), tuvieron lugar en las primeras etapas de su formación; al presente, las desviaciones de la luminosidad, presumiblemente variable, no la alejan en forma notable de la tasa actual de luminosidad, pues evidencias del pasado revelan que ligeras fluctuaciones han coincidido con cambios bruscos en el clima terrestre. Surge inmediatamente la pregunta: ¿Qué tipo de fuente de energía es capaz de mantener esa tasa de radiación constante, durante un periodo tan extenso?, y naturalmente la inquietud: ¿Por cuánto tiempo más seguirá brillando con la misma tasa de luminosidad? Es evidente entonces que los procesos de generación de energía determinan no solamente la estructura estelar sino también la evolución estelar.

Respecto a los procesos que pueden suplir una potencia de dos ergs/s por cada gramo de masa solar, si se tratara de combustión química, los combustibles se habrían agotado en los primeros 5 mil años de su existencia. Si la energía liberada fuese de origen potencial, del campo gravitacional, que se generase por contracción debido a la autogravedad del material solar, el Sol podría haber

brillado por un periodo no mayor de 15 a 30 millones de años.

Si bien para el Sol la contracción gravitacional no ha sido definitivamente su fuente de energía en los últimos 4 600 millones de años, puede no obstante ser importante en otras etapas de su evolución, así como también en otro tipo de estrellas.

Así entonces, puesto que ningún proceso químico o mecánico es capaz de explicar la generación de energía solar, y cualquier campo magnético primordial en el centro del Sol se disipó, teóricamente en el inicio de su vida, se recurre entonces a buscar la fuente de energía en las reacciones nucleares. Sabemos que las reacciones de fisión (que se producen en los reactores nucleares, y en la bomba atómica) tampoco pueden ser la fuente de energía, pues los materiales pesados como el uranio, susceptibles de fisionarse, representan menos del 0.1% del material solar, y se habrían consumido hace mucho tiempo.

Como el hidrógeno es el elemento más abundante en el Sol, esto conduce a pensar que son las reacciones de fusión (que producen la bomba de hidrógeno y los anhelados reactores de fusión en el futuro) la fuente adecuada que provee la energía solar, con la transformación de hidrógeno a helio descrita anteriormente, en la que el 0.7 por ciento de la masa de un núcleo de hidrógeno se convierte en energía radiante. Esto puede llevarse a cabo por medio de diferentes ciclos de reacciones, principalmente el llamado ciclo carbono-nitrógeno, en el que el carbono sirve de catalizador de la conversión de 4

protones a un helio, y el ciclo denominado cadena protón-protón que parece ser el ciclo predominante en estrellas como la nuestra.

Este ciclo puede proceder de varias maneras, y aunque la liberación de energía es evidentemente la misma, los neutrinos emitidos en el curso de la cadena de reacciones que se suceden, difieren en cantidad y en energía: el ciclo se efec-



Figura 13. Transiente coronal, el fenómeno solar de mayores dimensiones, evidenciado durante los vuelos del Skylab. Los dibujos por encima de la fotografía son para dar una idea de las dimensiones que adquiere a medida que se aleja del Sol.



Figura 14. Magnetograma solar. Se ilustra el Sol quieto (26 de enero, 1976) a la izquierda y el Sol activo (3 de enero de 1978) a la derecha, foto en luz blanca del 3 de enero de 1978. En los magnetogramas, el amarillo, que en el blanco y negro registra muy claro, es campo magnético positivo (polaridad norte) y el azul, que se ve gris, es negativo (polaridad sur).

túa en diferentes ramificaciones ilustradas en la figura 16, produciendo flujos de neutrinos, cuyas energías máximas están centradas en 0.38 MeV, 0.42 MeV, 0.86 MeV, 1.44 MeV y 14.1 MeV. (1 MeV = 1.6×10^{-6} ergs.)

La generación de un neutrino, al menos en la ramificación A, sucede en 10^{-21} segundos. La sección eficaz (probabilidad) de ocurrencia de estas reacciones es muy reducida. Se necesitan temperaturas muy elevadas para que las energías termales de algunas partículas sean superiores a la barrera de potencial repulsivo (de tipo Coulomb) que existe entre partículas cargadas.

La ocurrencia del ciclo en sus diferentes canales depende de la composición química del material y principalmente de la temperatura: a temperaturas inferiores a los 15 millones de °K la rama A de la figura 16 es predominante, en tanto que en el dominio comprendido entre 15 y 25 millones de °K, la ramificación B es predominante. La ramificación C es altamente sensible a la temperatura, siendo predominante solamente a temperaturas muy superiores a los 25 millones de °K y no se produce a temperaturas menores de 15 millones de °K. La energía del mensajero del interior solar, el neutrino (partícula sin carga eléctrica y sin masa en reposo), que predice un cierto modelo de estructura interna, depende sensiblemente de la temperatura asumida.

En concreto, los fotones del horno solar, la radiación luminosa del Sol, dependen de la sección eficaz de las reacciones que están en el origen de la generación de la energía, y que consecuentemente determinan las condiciones físicas del interior estelar y el tiempo de vida de la estrella.

Estructura interna y evolución solar

De la descripción previa de los modelos del interior solar, podemos inferir

que el equilibrio dinámico puede ser resuelto mediante un sistema de ecuaciones que puedan relacionar el mayor número de parámetros de su estructura interna y las características constitutivas del material solar: presión, densidad, temperatura, radio de la estrella, masa de la estrella, composición química, flujo emergente de energía (luminosidad), opacidad del material (capacidad de absorción y transmisión de fotones) y tasa de generación de energía (probabilidades de interacción nuclear en cada segundo por

cada gramo de materia). Como en el caso del Sol se conoce el radio, la luminosidad y la masa, y hay inferencias sobre la composición química, proveniente de la espectroscopía fotosférica y de objetos primordiales del sistema solar (meteoritos), la solución del sistema de ecuaciones recurre entonces a la calibración de los parámetros indeterminados (incógnitas), a manera de reproducir correctamente los parámetros determinados.

Es así que se infiere la composición química del coro (H = 74.97%, He = 25% y elementos pesados = 0.018%) y que se deduce una estructura interna compuesta de una zona radiativa con un coro central y una envolvente convectiva, cuyas respectivas dimensiones y condiciones físicas dependen de aspectos específicos de cada modelo. Es así también que para reproducir la luminosidad actual del Sol, se deducen temperaturas del coro solar calculadas en alrededor de los 15 millones de °K, lo que permite fijar cotas al flujo de neutrinos. Es evidente que si estos neutrinos no fuesen tan elusivos y pudieran detectarse tan fácilmente como los fotones ópticos del horno solar, se podría corroborar la temperatura del Sol, así como los otros parámetros interdependientes de su estructura interna. Es decir, además del diagnóstico del interior solar por sondeo sismológico (oscilaciones solares),

CURSOS DE POSTGRADO EN OPTICA

EL CENTRO DE INVESTIGACIONES EN OPTICA, A.C.

OFRECE:

ESTUDIOS EN:

MAESTRIA EN TECNOLOGIA OPTICA

MAESTRIA EN CIENCIAS OPTICAS

DOCTORADO EN CIENCIAS OPTICAS

PARA EL CICLO ACADEMICO QUE INICIARA EN AGOSTO DE 1984.

LA FECHA LIMITE PARA RECEPCION DE SOLICITUDES SERA: 29 DE JUNIO DE 1984.

LAS SOLICITUDES DE INGRESO E INFORMACION ADICIONAL EN:

SECRETARIA ACADEMICA

APARTADO POSTAL 948, 37000 LEON, GTO.

TEL. (471) 7-58-23

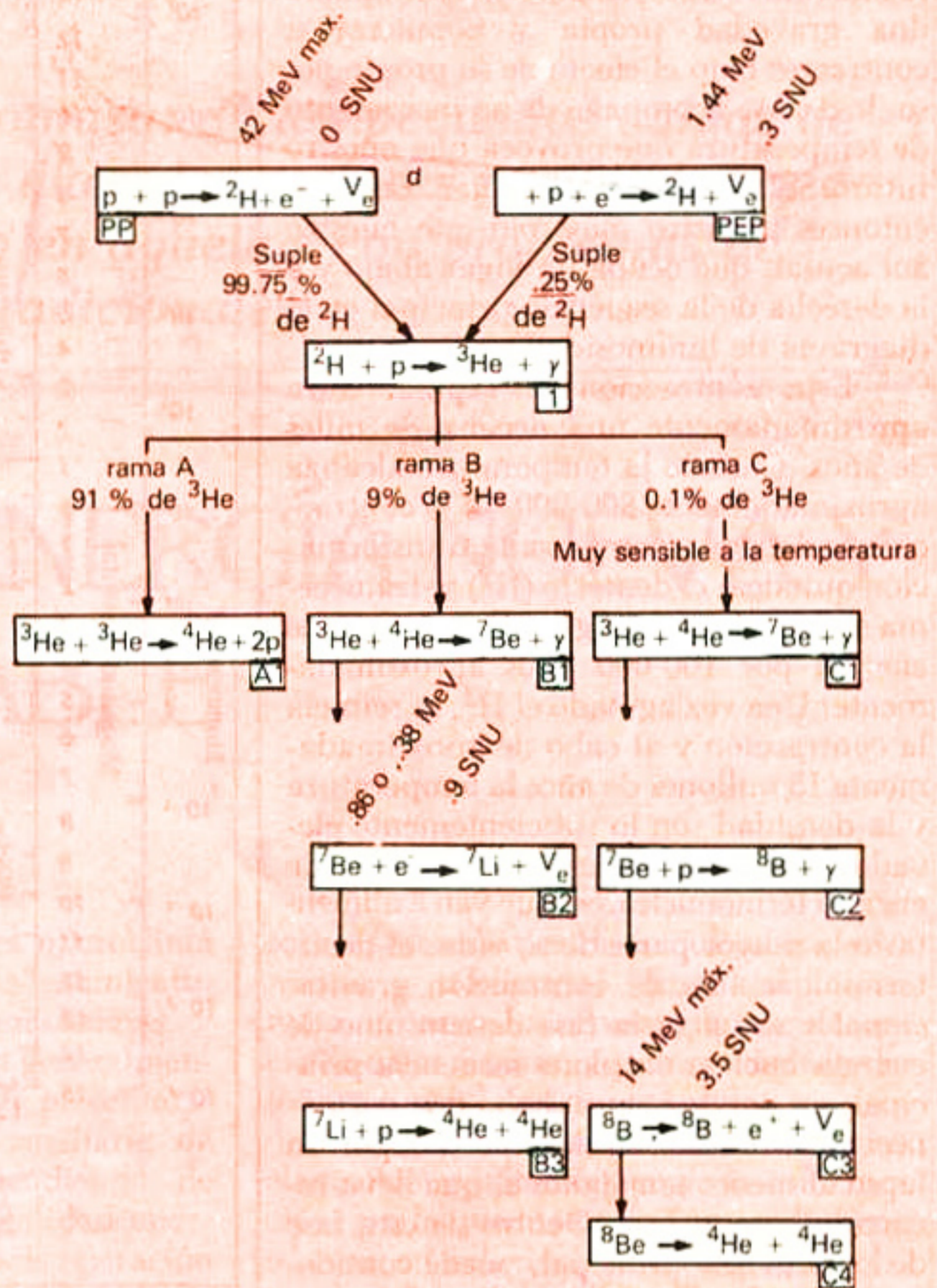
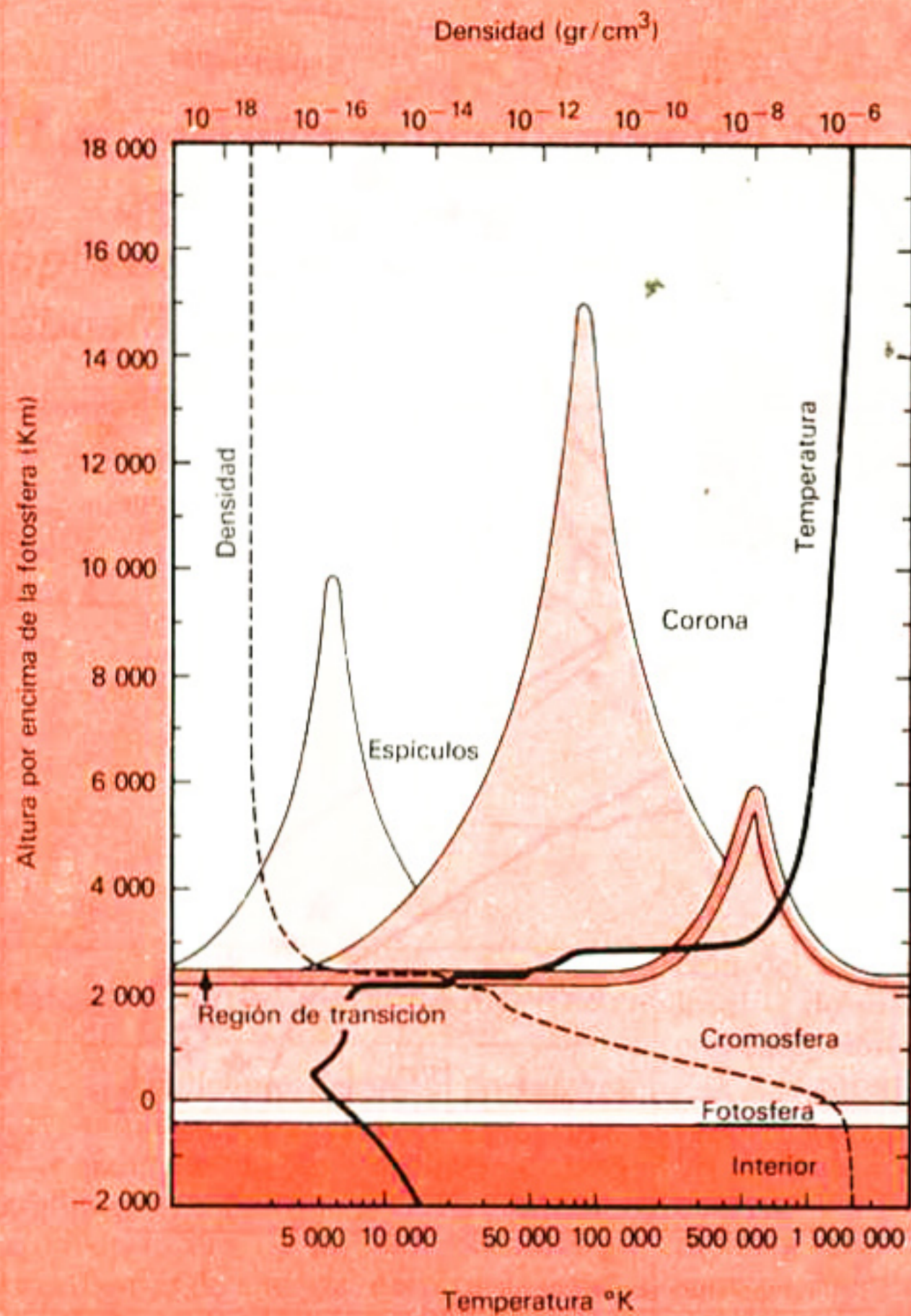


Figura 15 (izquierda). Diagrama preciso de las variaciones de temperaturas y densidad con la altura en el Sol, acorde a los estudios realizados con los experimentos del Skylab. Figura 16 (derecha). Diferentes variantes en que se lleva a cabo el ciclo de reacciones de fusión en el coro solar. Cuatro protones se convierten en dos núcleos de helio, dos positrones, neutrinos y fotones (luz). La tasa de producción de neutrinos en cada una de las tres ramificaciones posibles están basadas en los cálculos de J. Bahcall, y expresadas en unidades SNU (unidades neutrónicas standards). Lo que proporciona mayor cantidad de neutrinos es la rama C (3.5 SNU), sin embargo esta es la de menor probabilidad. La rama A de mayor probabilidad, ha quedado hasta ahora excluida de los experimentos, pues éstos sólo detectan neutrinos de energía mayor a 0.81 MeV.

que por el momento no proporciona información sobre las capas centrales del Sol, el flujo de neutrinos constituye un poderoso instrumento de sondeo del coro.

Pero, ¿qué cosa sucede cuando hacemos intervenir en nuestras ecuaciones el parámetro tiempo? Lo que se obtiene es la posibilidad de rastrear su pasado y predecir su futuro, es decir entramos en el dominio de la evolución estelar (¡futurismo científico!).

Es mediante esta actividad detectivesca que inferimos que, desde su formación, el Sol ha incrementado su luminosidad en un 30 por ciento, y que tiene al menos 4 600 millones de años radiando prácticamente con la misma tasa de luminosidad, y que contiene aún suficiente hidrógeno para continuar el proceso, a la misma tasa, por otros 100 000 millones de años (20 veces el tiempo que lleva irradiando), y que a escala más corta el helio comience a funcionar como combustible,

fusionándose en elementos más pesados.

Es así que podemos clasificar al Sol como una estrella relativamente joven y asignarle un lugar en el diagrama Hertzsprung-Russel, que permite trazar la evolución de las estrellas de nuestra galaxia desde su nacimiento hasta su declinación (figura 17).

En efecto, una estrella no ocupa siempre el mismo lugar en el diagrama, en el curso de su vida, lo que se traduce en que su luminosidad cambia con la edad. Se observa del diagrama que dentro de las normas estelares el Sol es una estrella de tipo espectral G2-V (magnitud absoluta +4.69), en plena secuencia principal; tipo espectral en el que, acorde a los cálculos de los modelos, durará al menos otros 5 000 millones de años. Es entonces una estrella promedio entre los ciento de miles de millones que pueblan nuestra galaxia, y pertenece a una clase llamada "enanas", para distinguirla de las

"gigantes rojas" o las "enanas blancas", cuyos diámetros son mucho mayores y menores, respectivamente.

Aunque para nosotros el Sol sea el astro rey, un eventual habitante de la galaxia espiral Andrómeda (Messier 31), gemela a nuestra Vía Láctea, es decir un "andromediano", observaría nuestro Sol como una humilde estrella, realmente insignificante, dentro de una asociación infinita de objetos celestes, ocupando una cierta posición a 3/5 de la distancia del centro a la periferia de la galaxia, a 9 000 parsecs de distancia (1 parsec = 3.086×10^{13} km) y efectuando una revolución en ella cada 220 millones de años, a una velocidad de 300 000 km/s.

En lo relativo a la evolución misma del Sol, ésta puede describirse en tres etapas principales: la primera corresponde a la fase pre-secuencia principal, en la que la materia interestelar se encuentra bajo el efecto de factores como la rotación, el

Antonio Ontiveros

campo magnético galáctico, acreción, etc., aglomerándose para formar la llamada nube proto-estelar. Esta adquiere una gravedad propia y comienza a contraerse bajo el efecto de su propio peso, lo cual se acompaña de un incremento de temperatura que provoca que nuestro futuro Sol comience a irradiar. Se tiene entonces un astro más rojo que nuestro Sol actual, que ocupa un lugar abajo y a la derecha de la secuencia principal en el diagrama de luminosidad.

Esta contracción es rápida, dura aproximadamente una decena de miles de años. Cuando la temperatura alcanza aproximadamente 800 000 °K la contracción se detiene y comienza la transformación química: el deuterio (H^2) se transforma en He^3 , lo que asegura la provisión de energía por 100 000 años aproximadamente. Una vez agotado el H^2 , se reinicia la contracción y al cabo de aproximadamente 15 millones de años la temperatura y la densidad son lo suficientemente elevadas para encender las fuentes de energía termonucleares, que van a alimentarlo la mayor parte de su vida, es decir, termina la fase de contracción gravitacional y se inicia la fase de consumo de energía nuclear en plena secuencia principal, en donde hemos dicho que permanecerá como estrella del tipo G-2 por un lapso al menos semejante al que lleva recorrido en esta fase. Dentro de esta fase de la secuencia principal, puede considerarse al Sol como una estrella adulta, en plena madurez.

La tercera fase, post-secuencia principal, se inicia con el incremento en diámetro del Sol, a medida que se empieza a agotar el hidrógeno. El radio y la luminosidad se incrementarán progresivamente y en consecuencia la temperatura de cada elemento del volumen de la superficie va a disminuir. El Sol abandonará entonces la secuencia principal rápidamente para convertirse en una gigante roja: Mercurio, Venus, después la Tierra y Marte, serán engullidos por esa enorme esfera de gas que durante más de 10 000 millones de años les dispensó abundante y generosamente luz y calor. Cuando todo el hidrógeno central se haya agotado, se contraerá de nuevo incrementado su temperatura central hasta que el helio remanente de la primera combustión se transforme, por fusión, en carbono y nitrógeno.

El Sol se convertirá entonces en una gigante brillante. Al cabo de varios millones de años, el helio se habrá consumido y el Sol perderá luminosidad a gran velocidad. Bajo el efecto de la contracción, el diámetro devendrá inferior al diámetro de la Tierra y su luminosidad será menor a una milésima de la actual. Nuestro Sol será entonces una enana blanca, próxima a convertirse en negra, como última etapa de su vida. □

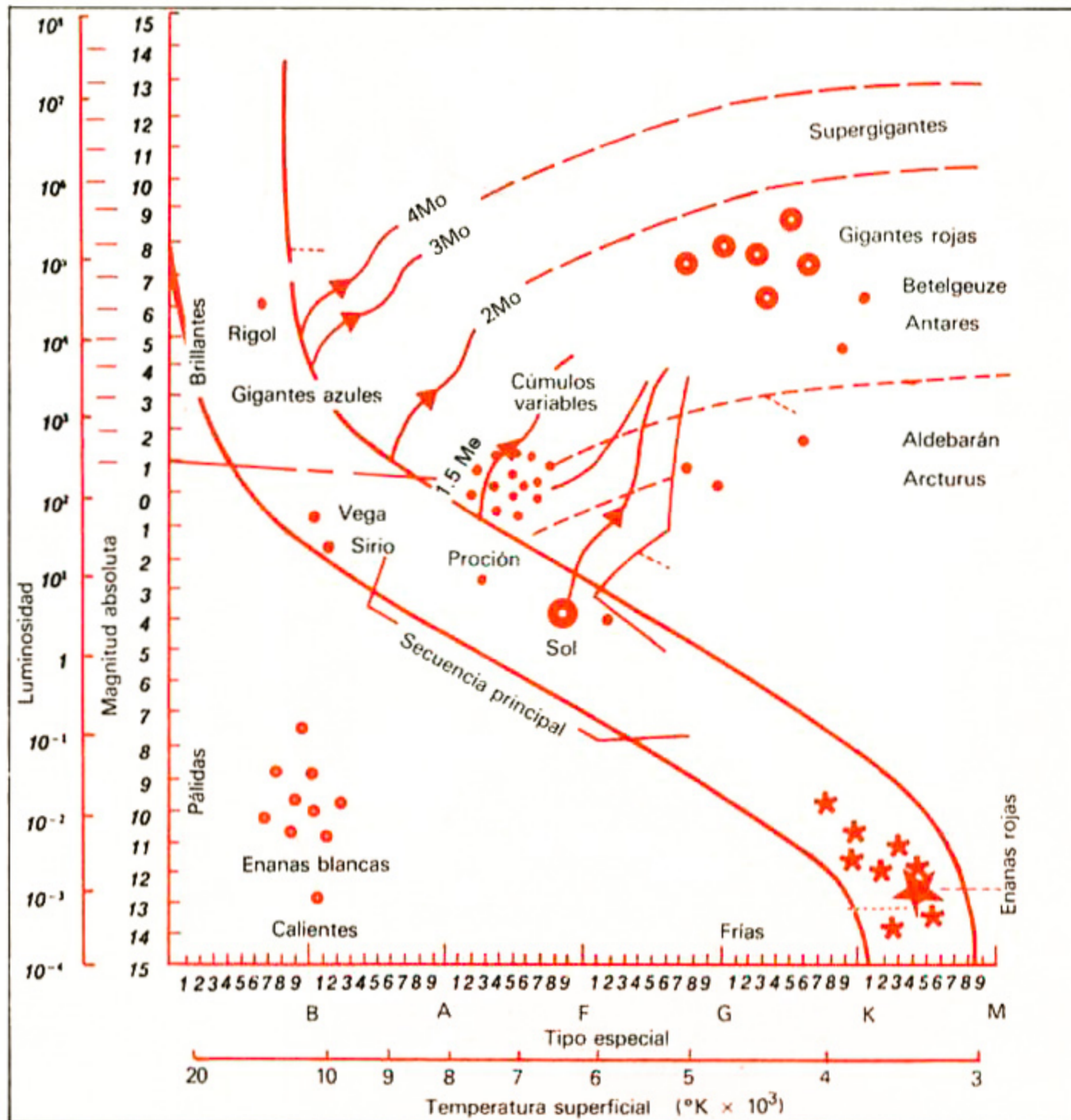


Figura 17. Diagrama de luminosidad-temperatura de Hertzsprung-Russell: permite identificar la magnitud bolométrica y el tipo espectral de las estrellas, así como la evolución estelar de acuerdo a sus parámetros físicos. Se ilustra la tendencia a evolucionar de estrellas de la secuencia principal, cuyas masas son múltiplos de la masa del Sol (M_{\odot} .)

En la presente edición hemos procedido a dar una breve descripción de la estructura y evolución del Sol, en calidad meramente introductoria a la subsecuente descripción de la interesante fenomenología asociada a nuestra estrella, y con la cual el lector está seguramente menos familiarizado. En concreto, hemos presentado la morfología del astro rey en su faceta invisible, el interior solar, y en su faceta visible, la atmósfera solar. En nuestra próxima edición abordaremos, en relación con el interior solar, uno de los dilemas más apasionantes de la astrofísica moderna, es decir, el enigma de los *neutrinos solares* (los mensajeros del horno central), lo que conduce a un fuerte cuestionamiento de nuestra concepción sobre la generación de la energía estelar.

Mencionaremos también cómo el *campo magnético solar* juega un papel activo y primordial en la dinámica y conformación misma de sus capas externas, y en la determinación del ciclo de actividad solar: hablaremos pues del ca-

rácter tranquilo de nuestra estrella, el llamado *Sol quieto*, en contraste con los fenómenos violentos del *Sol activo*. Analizaremos también otro de los cuestionamientos de moda, de si el Sol es o no una *estrella variable*, y qué consecuencias puede entrañar esa variabilidad.

Describiremos algunos aspectos interesantes de la física espacial, en lo relativo a la *física de las relaciones Sol-Tierra*. Haremos una retrospectiva de la física solar, y veremos cómo su historia es la historia de cada nuevo instrumento o método para la observación y análisis del Sol. Discutiremos las perspectivas de la misma a corto término y plantearemos qué cosas son susceptibles de estudiarse y aprender acerca del Sol, en esta década de los ochentas. Finalmente, haremos mención de algunas implicaciones de los *eclipses solares*, tanto en el medio ambiente terrestre, como en nuestro conocimiento mismo de la física solar. □

Jorge Pérez-Peraza es doctor en física de la Facultad de Ciencias de la Universidad de París y especialista en astrogeofísica de altas energías.