

El sistema solar

Nuestro hogar en el cosmos

Este libro no podrá ser reproducido,
ni total ni parcialmente, sin el previo
permiso escrito del editor. Todos los
derechos reservados.

© 2024, José María Maza Sancho
Derechos exclusivos de edición:
© 2024, Editorial Planeta Chilena S.A.
Avda. Andrés Bello 2115, 8º piso,
Providencia, Santiago de Chile

Diseño de portada: Isabel de la Fuente
Diseño interior: Catalina Chung Astudillo
Ilustraciones: Irma Sepúlveda @irmmmmmmma

1ª edición: agosto de 2024

ISBN: 978-956-408-599-9
RPI: 2024-A-5983

Impreso en: CyC Impresores Ltda.

El sistema solar

Nuestro hogar en el cosmos

José María Maza Sancho

 Planeta

Índice

+

Introducción
/ 8

 **Cap. I**

Sol
/ 16

 **Cap. II**

Mercurio
/ 32

 **Cap. III**

Venus
/ 44

 **Cap. IV**

Marte
/ 58

 **Cap. V**

Tierra
/ 70

 **Cap. VI**

Júpiter
/ 82

 **Cap. VII**

Saturno
/ 96

 **Cap. VIII**

Urano
/ 106

 **Cap. IX**

Neptuno
/ 120

 **Cap. X**

Pequeños
Planetas
/ 130

Agradecimientos
/ 164

CAPÍTULO I

+

Sol

El Sol es el corazón del sistema solar y, literalmente, todo gira en torno a él. Es nuestra principal fuente de luz y calor, y ha sido adorado como un dios en muchas culturas primitivas. Cuando Nicolás Copérnico, en 1543, lo reconoce como el centro del universo y a la Tierra como un simple planeta, comienza a quedar claro el papel único del Sol en el sistema solar y rápidamente se ve que las estrellas son soles o, dicho de otro modo, que el Sol es una estrella. Son miles las estrellas que podemos observar a simple vista, pero con la ayuda de un pequeño telescopio la cantidad aumenta exponencialmente a cientos de miles de ellas. En el siglo XIX se demostró que el Sol es una estrella más. Las hay más grandes y más pequeñas, más calientes y más frías, más viejas y más jóvenes; no hay nada único respecto a nuestra estrella.

La propiedad fundamental del Sol es su masa, la cual alcanza un valor de 2×10^{33} gramos (un 2 seguido de 33 ceros). Este es un número tan fuera de lo cotidiano que ni siquiera tiene nombre. Para visualizarlo es mejor compararlo con la masa de la Tierra. Se necesitarían 335.000 planetas como el nuestro para igualar la masa del Sol. Tanto su masa, edad y composición química determinan todas las propiedades de una estrella incluyendo su radio, su luminosidad y estructura interna, entre otros aspectos.

El Sol posee el 99,87 % de la masa del sistema solar, cifra en la cual reside la diferencia primordial entre el Sol (o una estrella) y los planetas: el Sol supera entre mil y un millón de veces la cantidad de materia de un planeta e incluso mucho más a los cuerpos menores como pequeños planetas y cometas.

Durante siglos se debatió la distancia de la Tierra al Sol. Desde Aristarco en el siglo III a. C. pasando por Ptolomeo en el siglo II d. C., Johannes Kepler y Jean-Dominique Cassini en el siglo XVII, la distancia siempre se subestimó hasta que se llegó a un valor muy cercano a 150 millones de km⁴.

El Sol subtende un ángulo promedio de 31' 59,3" cuando se encuentra a su distancia media de la Tierra, a 149.600.000 km. Con estos datos se puede determinar su radio lineal, que es de 696.000 km, 109 veces mayor que el radio de la Tierra. Por lo tanto, el volumen del Sol es 1.300.000 veces mayor que el de nuestro planeta. Con esto, la densidad media del Sol es bastante menor que la de la Tierra, alcanzando solo 1,4 gr/cm³ (la densidad de la Tierra es de 5,5 gr/cm³). La densidad del Sol depende fuertemente de la distancia al centro; en la fotosfera es muy baja, en cambio, en el centro supera los 150 gr/cm³.

Con los valores indicados para la masa y el radio podemos calcular la aceleración de gravedad en la "superficie" del Sol: resulta ser 28 veces mayor que la terrestre. Esto se refleja en que una masa que aquí tiene un peso de un kilogramo, en la "superficie" del Sol pesaría 28. Imagínese, una persona de 70 kg pesaría 1.960 kg. Esta es una afirmación puramente académica, pues ni el Sol tiene superficie ni sería posible "posarse" sobre ella debido a la temperatura reinante.

Por mucho tiempo la temperatura del Sol fue un gran misterio. Se lo comparaba con la llama y el fuego, pero sin poder precisarse su temperatura. En el siglo XVII, con los trabajos de Cassini en Francia, se dan los primeros pasos en astrofísica, pero no existían las herramientas teóricas ni instrumentales adecuadas

4 Hoy el valor de la unidad astronómica de distancia (la distancia media al Sol) se define como 149.597.870.700 metros, aproximadamente 499 segundos-luz. La luz del Sol demora 8 minutos 19 segundos en llegar a la Tierra.

para atacar el problema. Recién en el siglo XIX se desarrolló la termodinámica y las leyes que describen el comportamiento de la radiación, lo que permitió que se estimara la temperatura de la “superficie” del Sol, la cual resulta ser de, aproximadamente, 5.800 K (grados Kelvin o absolutos de temperatura)⁵. A esa temperatura la superficie del Sol no puede ser ni sólida ni líquida, solo puede estar en forma gaseosa; incluso ni siquiera pueden existir moléculas, sino solamente átomos individuales. La presión debe aumentar hacia el centro del Sol debido al peso de las cáscaras exteriores; mientras más adentro, más peso, pues hay más cáscaras que soportar. La temperatura debe crecer hacia el interior del Sol para proporcionar ese aumento de presión; en modelos detallados del interior solar se obtiene una temperatura central de 15 millones de grados. A esas temperaturas solamente puede existir materia en forma gaseosa. Los choques entre las partículas son violentísimos, al punto de que los átomos pierden la mayoría de sus electrones. La muy alta densidad de las zonas centrales contribuyen a que los átomos estén ionizados, pues los núcleos atómicos se encuentran a distancias promedio menores que la mínima que les permite mantener todos sus electrones. El interior solar es una “sopa” de núcleos atómicos y electrones libres. El Sol es una gran esfera de gas incandescente, un gigantesco globo de gas.

Si el Sol es una simple esfera de gas ¿por qué no se evapora en el espacio? Por la misma razón por la que no se pierde en el espacio la atmósfera terrestre: la fuerza de gravedad. El Sol, la Tierra y todos los cuerpos atraen a las partículas a su alrededor. El Sol es una masa enorme; como hemos señalado su aceleración de gravedad en la superficie es 28 veces mayor que la correspondiente a la Tierra. El campo gravitatorio de un cuerpo celeste implica que es necesario tener una velocidad mínima para poder

⁵ La escala Kelvin de temperatura, llamada escala absoluta, usa intervalos de temperatura de un grado igual a la escala Celsius, pero el cero Kelvin corresponde a $-273,15$ Celsius. Por lo tanto, la temperatura Kelvin (K) está relacionada con la Celsius (C) por la relación sencilla: $K = C + 273,15$ o lo que es lo mismo: $C = K - 273,15$. La temperatura de las estrellas siempre se mide en grados Kelvin.

alejarse de él para siempre. Esa velocidad, llamada “velocidad de escape”, es de 11,2 km/s en el caso de la Tierra y de 620 km/s para la superficie del Sol. De acuerdo con la teoría cinética de los gases, una molécula o átomo en un gas se mueve con una velocidad mayor si su temperatura aumenta. A 300 K, temperatura típica de la atmósfera terrestre, las moléculas en ella se mueven a una velocidad menor a 3 km/s, inferior a los 11,2 km/s necesarios para escapar. A los 5.800 K de los átomos de la atmósfera solar, el hidrógeno se mueve a 12 km/s, velocidad muy por debajo de la velocidad de escape del Sol. Por lo tanto, los átomos no se escapan de la atmósfera del Sol porque simplemente no pueden hacerlo: su velocidad es muy baja.

La “superficie” del Sol a la que hemos hecho referencia anteriormente es en realidad una ilusión óptica, no existe, pues se trata de una esfera gaseosa y como tal no tiene superficie. Pero si miramos al Sol, por ejemplo al momento de la puesta, parece tener un borde muy bien definido. Es cierto, pero es necesario recordar que lo estamos viendo desde una gran distancia y lo que percibimos es la zona de la cual la radiación alcanza a salir; desde más adentro la radiación es absorbida por las capas más externas. La superficie aparente del Sol es como la superficie aparente de las nubes en la atmósfera o como el límite de visibilidad en una noche de neblina que hace parecer que las luces de nuestro automóvil encuentran una pared blanca a una cierta distancia. La fotosfera es una superficie aparente causada por la opacidad del gas de la atmósfera solar.

La cantidad de energía que emite el Sol por unidad de tiempo fue la característica solar que causó mayor desconcierto entre los astrónomos durante mucho tiempo. Se define la constante solar como la cantidad de energía que incide por centímetro cuadrado por minuto sobre la superficie de la Tierra (descontando el efecto de la atmósfera terrestre). La constante solar alcanza a 1,92 calorías por centímetro cuadrado por minuto (una caloría es la cantidad de energía que eleva en un grado la temperatura de un gramo de agua). A partir de la constante solar podemos calcular

la cantidad total de energía emitida por el Sol en cada segundo de tiempo, lo cual se conoce con el nombre de luminosidad solar. El Sol está, como hemos dicho, a 149.600.000 km y, por lo tanto, en una esfera centrada en el Sol, con ese radio, en cada centímetro cuadrado inciden 1,92 calorías por minuto; entonces, la luminosidad solar resulta ser de $9,0 \times 10^{25}$ cal/s. Usualmente, la luminosidad se expresa como $3,8 \times 10^{33}$ ergs/s o en términos de otra unidad de potencia como $3,8 \times 10^{23}$ kilowatts. Esta es una cantidad gigantesca de energía que en el siglo pasado causó grandes complicaciones a los astrónomos, pues no se conocía ningún proceso químico o físico que pudiese mantener al Sol brillando, sin variaciones y por miles de años, con ese inmenso derroche de energía por segundo.

Cualquier cuerpo que esté perdiendo energía continuamente está obligado a enfriarse paulatinamente, a menos que tenga una manera de reponer la energía que pierde. ¿Se enfría el Sol? Hay evidencias geológicas que indican que la cantidad de radiación solar que ha recibido la Tierra ha permanecido constante en los últimos 3.000 millones de años. Eso indica que el Sol se debe haber mantenido constante a lo menos durante ese lapso de tiempo.

Distintas mediciones coinciden en señalar que la Tierra tiene una edad de 4.600 millones de años. Las teorías de formación del Sol y las estrellas indican que debe haberse formado simultáneamente con sus planetas, lo que fija la edad del Sol en 4.600 millones de años. Hasta el siglo XX no se conocía absolutamente nada acerca de la fuente de energía del Sol. Se sabía que si fuese de carbón de piedra y oxígeno, la combustión de una masa tan enorme como la del Sol, emitiendo energía a la tasa que lo hace, solo duraría un siglo. Su edad es casi 50 millones de veces más larga, por lo que necesitamos una fuente de energía mucho más eficiente que la hulla, el petróleo o cualquier combustible químico. El Sol, definitivamente, no es una fogata.

En 1853, el físico alemán Hermann von Helmholtz (1821-1894) propuso que la fuente de energía del Sol era de carácter gravitacional. El Sol —y cualquier estrella— al contraer-

se disminuye su energía gravitacional y la mitad de esa variación se utiliza para aumentar la energía interna del sistema y la otra mitad es radiada al espacio. El diámetro solar debería disminuir en 75 m por año para producir la energía que radia actualmente. Esto estaba muy por debajo de lo que podían detectar los instrumentos del siglo XIX (el Sol disminuiría su diámetro angular aparente en un segundo de arco en 10.000 años). Si se calcula la energía gravitacional total que el Sol podría haber liberado si se inició como una nube totalmente dispersa en el espacio, se podría ver cuánto tiempo habría llegado a vivir con esa fuente de energía. La respuesta es de aproximadamente 20.000.000 años. Ese tiempo, inmenso comparado con el de cualquier combustión química, pareció acertado durante varias décadas. Sin embargo, al consolidarse la determinación de la edad de la Tierra en torno a varios miles de millones de años, se volvió a entrar en las tinieblas en relación con la verdadera fuente de energía para el Sol y las estrellas. La edad de la Tierra logró determinarse gracias al descubrimiento de la radioactividad; al analizar muestras de rocas se pudo calcular la edad de ellas y de los fósiles que allí se encuentran.

El físico Albert Einstein (1879-1955) propuso que la masa es una forma de energía y que existe una equivalencia entre ambas dada por la fórmula: $E = mc^2$. De acuerdo con ella, el aniquilamiento⁶ de un gramo de masa produce 9×10^{20} ergs (2×10^{13} calorías), energía suficiente para evaporar 13 piscinas olímpicas con 2,5 millones de litros de agua cada una. Si en el interior del Sol se aniquilara la materia, su masa podría producir la energía para mantenerlo brillando por muchos miles de millones de años, bastante más que su edad actual. El Sol debe aniquilar 4.000.000 de toneladas de materia por segundo para compensar la pérdida de energía que tiene su fotosfera. Con eso la idea estaba lanzada, pero tuvieron que pasar tres décadas para que se comprendiera cabalmente el proceso de transmutación de materia en energía.

6 Aniquilar: Reducir a la nada. Transformar materia en energía.

En 1938, los físicos Hans Albrecht Bethe (1906-2005), germano-norteamericano, y Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007), alemán, propusieron en forma independiente un mecanismo de transmutaciones nucleares que explica la producción de energía del Sol y las estrellas, el cual se denomina ciclo del carbono-nitrógeno, que empieza con un átomo de carbono-12 captando un protón y termina cuando se emite un átomo de helio-4 y un átomo de carbono-12. El ciclo gasta 4 átomos de hidrógeno y produce 1 de helio; el carbono actúa como catalizador de la reacción. Posteriormente, el norteamericano Charles Louis Critchfield (1910-1994) propuso lo que ahora se conoce como la cadena protón-protón. El resultado neto de una serie de reacciones consiste en la fusión de 4 átomos de hidrógeno para originar 1 átomo de helio. La temperatura en el centro del Sol alcanza los 15.000.000 de grados, valor al cual los choques entre los átomos son tan violentos que todos los átomos de hidrógeno han perdido sus electrones (están ionizados). El núcleo de un átomo de hidrógeno está constituido por solo 1 protón, partícula nuclear con carga positiva. 2 protones se repelen con una fuerza eléctrica que puede ser muy intensa a pequeñas distancias; por eso, si se acercan 2 protones en un gas, nunca llegan a chocar. Sin embargo, a una temperatura superior a 10.000.000 de grados las velocidades típicas de los protones son tan altas que esporádicamente se encuentran violentamente 2 protones y se acercan lo suficiente para que opere entre ellos la fuerza de atracción nuclear, que a distancias pequeñísimas es aún más poderosa que la repulsión electrostática. Se forma así 1 átomo de hidrógeno pesado, 1 deuterio. Los núcleos de deuterio son impactados por otro átomo de hidrógeno para formar 1 núcleo de helio-3 (^3He); finalmente, la colisión de 2 núcleos de ^3He forma 1 ^4He , liberando 2 protones. El resultado neto del proceso es que 4 átomos de hidrógeno producen 1 átomo de helio. Como el átomo de helio tiene una masa algo menor que la suma de 4 hidrógenos, esa pequeña diferencia de masa se transforma en energía.

Cabe destacar que pese a la inmensa temperatura, la reacción nuclear entre dos protones en el interior del Sol continúa siendo

demasiado poco probable; millones y millones de encuentros entre dos protones siguen terminando en un triunfo de la repulsión coulombiana⁷. Solo eventualmente dos protones se pareaan, superando por efecto túnel la repulsión, para producir un deuterio. Por este motivo el Sol es un inmenso altoporno nuclear de fusión autocontrolado por su fuerza de gravedad, y no una bomba de hidrógeno. La vida media de un átomo de hidrógeno en el centro del Sol es de 200.000.000 de años.

Ya sabemos que 1.000 gramos de hidrógeno puro se transforman en 993 gramos de helio puro, más 7 gramos de energía. Entonces, la transmutación de un kilogramo de hidrógeno produce $6,3 \times 10^{21}$ ergs. Eso significa que en el Sol se están transformando 600.000.000 de toneladas de hidrógeno por segundo, creando 595,8 millones de toneladas de helio y 4,2 millones de toneladas de masa se transmutan en energía. Pese a que el Sol pierde una gran cantidad de masa por segundo, en los próximos 5.000.000.000 de años gastará $6,7 \times 10^{29}$ g, el 0,03 % de su masa por las transmutaciones nucleares, una cantidad bastante pequeña para tener una influencia, por ejemplo, en las órbitas de los planetas del sistema solar.

Gracias al análisis espectral de la luz, se ha podido ir conociendo la composición química de las estrellas. Robert Bunsen (1811-1899) y Gustav Kirchhoff (1824-1887) estudiaron en el laboratorio la emisión de luz de diferentes elementos químicos llegando a la conclusión de que cada elemento tiene líneas de emisión —y de absorción— que le son únicas, características propias de cada elemento. En la segunda mitad del siglo XIX se descubrió cuáles eran los principales elementos químicos presentes en las atmósferas estelares. Sin embargo, solo a partir de 1930 se empezó a tener claridad acerca de la composición química de las estrellas y el Sol, gracias al trabajo pionero de Cecilia

⁷ Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806) fue un ingeniero y científico francés que descubrió una relación inversa entre las fuerzas de atracción o repulsión de dos cargas eléctricas y el cuadrado de la distancia que las separa. Esta relación, semejante a la ley de gravitación universal, se la designa como ley de Coulomb. Por ello, la repulsión entre dos cargas eléctricas se la llama repulsión coulombiana.

Payne-Gaposchkin (1900-1979), que en su tesis doctoral en 1925 demostró que el hidrógeno y el helio son los elementos químicos más abundantes. La razón de esta demora fue que no se conocía la dependencia exacta entre la intensidad de las líneas espectrales y las condiciones físicas del gas que las produce. Por ejemplo, un gas muy caliente puede no absorber ciertas líneas no porque no contenga el elemento químico que las produce, sino simplemente porque los átomos están ionizados y no en estado neutro. Al aclararse las leyes que gobiernan la excitación y la ionización de los átomos se llegó a la sorprendente conclusión de que la composición química de todas las estrellas es muy similar y que un 74 % de la masa es hidrógeno, un 24 % helio y el otro 2 % está constituido por el resto de los elementos químicos. El universo primigenio, en el *big bang*, la composición química es de un 75 % de hidrógeno y un 25 % de helio. Solo los dos elementos químicos más simples son de origen primordial. La posterior evolución química de las galaxias se debe a las estrellas, que son las grandes fábricas de elementos químicos pesados. Hoy, después de 13.800.000.000 de años solo han logrado generar el 2 % del contenido del universo.

Aun cuando un 2 % de elemento pesado es poca cosa, la masa del Sol es tan grande que la cantidad de toneladas de elementos pesados que contiene es varios miles de veces mayor que la masa de la Tierra entera. Después del hidrógeno y el helio, los elementos presentes en el Sol y las estrellas son oxígeno, carbono, nitrógeno, magnesio, sodio, aluminio, silicio, azufre, potasio, calcio, hierro, etcétera. Ese 2 % de elementos pesados varía entre las estrellas. Por ejemplo, hay algunas en que solo llega a 0,1 %, como sucede con las estrellas de los cúmulos globulares. En otras, en cambio, los elementos químicos pesados pueden ser algo más que el 2 %, pero nunca más del 3 %. Por lo tanto, es posible afirmar que el hidrógeno y el helio, en proporción de tres partes de hidrógeno y una de helio, constituyen a lo menos el 98 % de la masa inicial de las estrellas del universo. En términos generales, las estrellas poseen una composición química que solo cambia en la proporción de elementos pesados, pero no en las cantidades

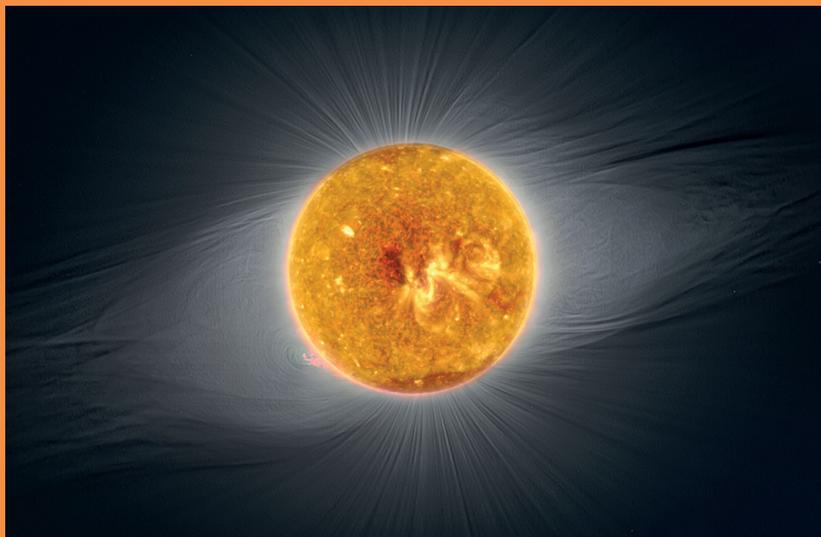


Imagen del Sol tomada en el cerro La Silla, Chile, en un eclipse, a la cual se le ha superpuesto otra imagen del Sol tomada por el satélite SOHO. Se ve la belleza de la corona y de su campo magnético que la orchestra. CRÉDITOS: ESO/P. Horálek/SOHO (NASA&ESA)/SDO (NASA).

relativas de oxígeno, carbono, calcio o hierro. En algunas estrellas se encuentran “anomalías” de ciertos elementos, como el helio o el carbono, pero se cree que corresponden a casos en que los elementos formados en su interior han aflorado a la superficie. Se trata de casos donde se ha alterado la mezcla de elementos en la atmósfera de la estrella. Cuando se habla de una estrella “de carbono” no se trata de una estrella compuesta solo por carbono, sino de una en que la abundancia del elemento en su atmósfera es mucho más alta de lo normal.

A medida que una estrella “envejece” transmutando hidrógeno en helio, la proporción entre ellos cambiará, pero solo el 20 % central de la masa de una estrella como el Sol está sometida a condiciones de presión y temperatura tales que efectuarán reacciones nucleares. Por ello, aunque el 100 % del hidrógeno presente en el núcleo de la estrella se transforme en helio, el

hidrógeno seguirá siendo el elemento químico más abundante de la estrella en su conjunto.

El Sol rota sobre un eje lentamente, completando un giro en unos 25 días. No lo hace como un cuerpo rígido, girando más rápido las zonas ecuatoriales, en solo 24,47 días y en los polos llega a 38 días. Se puede decir que en promedio un giro toma unos 28 días. La rotación solar es en el sentido directo, contra reloj visto desde el norte.

En 1610 los astrónomos David y Johannes Fabricius observaron manchas en la fotosfera solar. Galileo Galilei en 1611, al igual que el jesuita Christoph Schneider, también las observó. Como las manchas en general duran varias semanas permitieron descubrir la rotación solar. Galileo disputó inútilmente la prioridad del descubrimiento con el jesuita Schneider, sin saber que eran los Fabricius quienes se les habían adelantado a ambos.

Transcurrieron dos siglos y el estudio de las manchas solares no avanzó. A partir de 1826 el químico de Dessau, Alemania, Heinrich Schwabe (1789-1875), observó sistemáticamente las manchas solares descubriendo que la cantidad de estas variaba significativamente, siendo máxima entre 1828-1829 y 1836-1839, y mínima en 1833 y 1843. De acuerdo con estas investigaciones Schwabe dedujo que el Sol tiene un ciclo cercano a una década, resultados que publicó en 1843. Posteriormente, el astrónomo suizo Rudolf Wolf (1816-1893) demostró, al analizar registros históricos del número de manchas, que el ciclo solar es de 11,1 años, variando desde 7 hasta 17 años. Al poco tiempo se encontró una correlación entre el número de manchas y las perturbaciones del campo magnético terrestre (presencia de auroras boreales).

Edward Walter Maunder (1851-1928) de Greenwich, analizando datos históricos, encontró que no hubo manchas solares entre 1645 y 1715. Este intervalo, conocido como el mínimo de Maunder, es un tiempo en que la temperatura de la Tierra fue menor que lo habitual, lo que produjo inviernos particularmente rigurosos. Diversas evidencias apuntan a una anomalía climática durante dicho período. Sin embargo, no hay ninguna que ligue

el ciclo solar de once años con ciclos meteorológicos en la Tierra, pero si el Sol deja de presentar actividad magnética por un período mucho mayor de los 11 años del ciclo solar (en el caso del mínimo de Maunder el Sol se “olvidó” de producir manchas por casi siete ciclos) cambios en la magnetósfera terrestre producen cambios que disminuyen la temperatura en la Tierra. El mínimo de Maunder es conocido como la “miniera glacial”.

El Sol posee un campo magnético global, un polo magnético en cada polo de rotación, con líneas de intensidad de campo magnético que los conectan, que la rotación diferencial va alargando en la dirección del ecuador (el ecuador rota más rápido que las latitudes heliográficas mayores). Después de dos o tres años ese alargamiento hará que los tubos magnéticos se alinearan con el ecuador y se rompan, apareciendo en la superficie dos manchas de distinta polaridad magnética. Las manchas poseen una temperatura menor, entre 3.000 y 4.500 K, que por emitir menos luz que el resto de la fotosfera se ven negras. La presión magnética en la región de la mancha hace que la temperatura de la fotosfera baje. En los dos o tres años de máximo magnetismo en la fotosfera hay gran presencia de manchas, asociadas a zonas brillantes (fáculas), lazos coronales, prominencias y eventos de reconexión. Las erupciones solares y las eyecciones de masa coronal están asociadas con las manchas. Las manchas solares usualmente poseen dos zonas: la umbra y la penumbra. Esta última rodea la umbra y posee una temperatura intermedia.

En el año 1859 se registró en la Tierra la tormenta magnética solar más grande de la historia reciente, la cual se ha denominado evento Carrington. Auroras boreales se vieron no solo a altas latitudes, como Noruega o Suecia, sino incluso en Cuba, Colombia, Santiago de Chile y Concepción. Los cables de telégrafos, que se habían instalados en 1843, sufrieron un daño severo, tanto en Estados Unidos como en Europa. Este tipo de eventos contienen un evidente peligro para las comunicaciones en la Tierra. Por tal razón, en la actualidad se observa al Sol en forma continua para dar una alerta ante la aparición de una eyección de masa coronal que venga en dirección a la Tierra.

Finalicemos este capítulo del Sol señalando algo acerca de su vida futura. Por 4.600.000.000 de años el Sol ha transformado hidrógeno en helio como su fuente de energía. Se estima que ha gastado un poco menos de la mitad del hidrógeno que puede transmutar. En 5.400.000.000 de años el Sol agotará su hidrógeno, contraerá su núcleo elevando con ello su temperatura central y su densidad, y sus capas exteriores se expandirán notablemente, aumentando su tamaño en un factor de cien⁸. La fotosfera del sol se irá enfriando y con ello enrojeciendo y este se transformará en una estrella gigante roja. Ese proceso terminará cuando la temperatura central del Sol se eleve desde 15 a 100 millones de grados. Ahí se iniciará un nuevo proceso nuclear: tres átomos de helio se unirán para formar uno de carbono. Esa nueva fuente de energía le permitirá al Sol alargar su vida en 1.000.000.000 de años. Cuando agote el helio en su núcleo volverá a contraerlo, pero no logrará gatillar nuevas reacciones nucleares. El núcleo, muy denso, se separará de sus cáscaras exteriores que serán arrojadas al espacio y el remanente será una enana blanca que se irá enfriando lentamente. Después de 11.000.000.000 de años el Sol será una esfera muy densa, del tamaño de la Tierra (de unos 10.000 km de diámetro) y de una densidad de una tonelada por centímetro cúbico. La Tierra morirá carbonizada en la etapa de gigante roja del Sol.

⁸ El radio solar que ahora es de 700.000 km llegará a valores cercanos a 70.000.000 de km. En esa expansión el Sol “se tragará” la órbita de Mercurio y se acercará a la de Venus que tiene un radio medio de 108.000.000 de km. No se tragará la órbita de Venus, pero la diosa del amor terminará rostizada. Tampoco se tragará la órbita de la Tierra ni a nuestro planeta, pero también lo asará, en 5.400.000.000 de años.





Aurora boreal sobre el lago Bear, en la base de la Fuerza Aérea Eielson, Alaska, Estados Unidos.