

El Sol: un reactor termonuclear a 150 millones de kilómetros

Guillermo Sánchez (guillermo@usal.es ; <http://web.usal.es/guillermo>)

Actualizado: 2009-11-24

The Sun is a yellow star containing about 99.86% of the total mass of the Solar System. The distance from the Earth is approximately 149.6 million kilometers. The core has a density of up 150 times the density of water on Earth and a temperature about 13,600,000 Kelvin. The temperature in its surface is around 5,800 Kelvin. The solar field creates sunspots that generate solar storms. On September 1–2, 1859 the largest recorded solar storm occurred, causing the failure of telegraph systems all over Europe and North America. Auroras were seen in Spain and in many other places. If a similar event happened in our days the consequences could be unpredictable.

La Tierra se encuentra a unos 150 millones de km del Sol, una estrella enana amarilla como muchas de nuestra galaxia. Sin su presencia no existiríamos. Aunque se ha mantenido relativamente estable durante sus 5 mil millones de años de vida, tiene episodios convulsos asociados a los ciclos de las manchas solares. En estos periodos se producen erupciones solares que alcanzan nuestro planeta. El campo magnético terrestre nos protege de ellas, pero algunas tienen una intensidad inusitada. Hace siglo y medio se produjo una erupción especialmente violenta, que si se repitiese hoy podría afectar gravemente a las telecomunicaciones y al transporte de electricidad. Hay científicos solares que creen que estamos a punto de entrar en un ciclo solar especialmente virulento en el que existe el riesgo de que un episodio de estas características vuelva a suceder. Además, sabemos que el comportamiento del Sol afecta sustancialmente al clima terrestre. También hay científicos que sostienen que el fenómeno conocido como calentamiento global puede estar parcialmente relacionado con un periodo de intensa actividad solar. En última instancia son las reacciones termonucleares que se producen en el núcleo del Sol las que han permitido la existencia de la vida en la Tierra y las que determinarán su futuro.

Una erupción solar excepcional

El 1 y 2 de septiembre de 1859 se observaron espectaculares auroras boreales en toda Europa y Norteamérica. El fenómeno pudo ser visto en Madrid, Roma, en las Montañas Rocosas e incluso en el Caribe. Las incipientes comunicaciones telegráficas se vieron en muchos casos interrumpidas.

El CLAMOR PUBLICO [1], periódico del partido liberal, en su edición de Madrid de 6 de septiembre de 1859 se decía (transcripción literal, incluido errores): “AURORA BOREAL.- La aurora boreal que se observó en Madrid, ó por mejor decir en España, en la noche del domingo al lune de la semana pasada, ha sido ostensible en toda Europa, á juzgar por las noticias que van llegando de Paris, y otras varias. El Diario de Bruselas ha hecho observar que el mismo día

se hicieron visibles varios fenómenos curiosos de la física del globo. Al medio día del domingo, la aguja magnética empezó á sufrir impresiones violentas y las líneas telegráficas en Ostende, Anveres, Lóndres, París y Berlin, y aun el cable sub-marino entre Ostende y Donores dejaron percibir signos evidentes de relacion con el precipitado fenómeno durante el espacio de su aparicion”

Las auroras boreales y australes son relativamente frecuentes en las proximidades de los círculos polares ártico y antártico, pero raramente pueden contemplarse en España o Brasil. Las auroras se producen cuando partículas cargadas procedentes del Sol penetran en la atmosfera, siguiendo las líneas del campo magnético terrestre, ionizando el oxígeno y el nitrógeno. El fenómeno produce una luz visible de extraordinaria belleza.

¿Qué sucedió aquel año para que se viesen en lugares tan inusuales? La explicación la encontró el astrónomo aficionado británico Richard Carrington. Desde años antes venía observando sistemáticamente el Sol. Se interesaba especialmente por las manchas solares. Desde finales de agosto de 1859 [2] se percató de que había una gran actividad solar. El día 1 de septiembre vio cómo una gigantesca llamarada se desprendía del Sol (A este fenómeno los astrofísicos lo denominan CME, acrónimo en inglés de eyección de masa de la corona solar) y originaba una gigantesca tormenta solar que se dirigió directamente a la Tierra alcanzándola 18 horas después (las partículas subatómicas, que preceden al viento solar, tardarían unos 25 minutos) y causando las excepcionales auroras a las que nos hemos referido. Normalmente una tormenta solar tarda 3 ó 4 días en recorrer el trayecto desde el Sol hasta la Tierra.

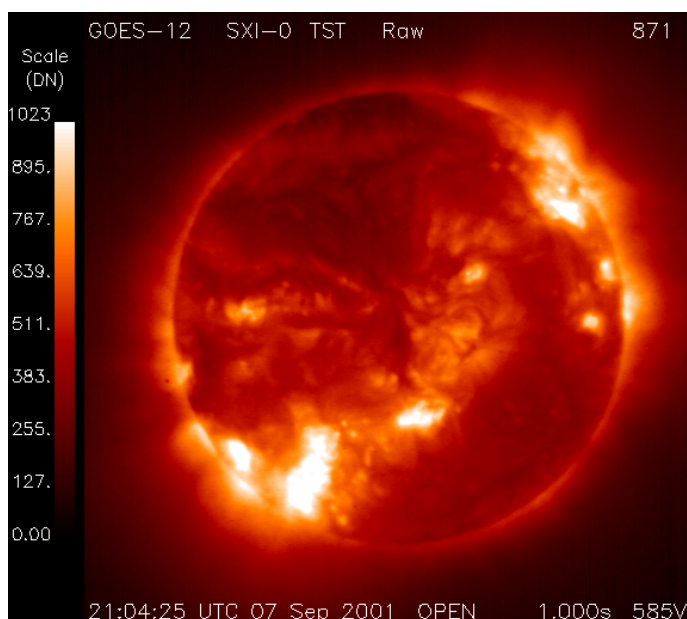


Ilustración 1. El Sol es una estrella enana amarilla. Su diámetro es de 1,4 millones de km (109 veces el diámetro de la Tierra). Contiene alrededor del 98,6% de la masa del Sistema Solar. La distancia media del Sol a la Tierra es de aproximadamente 150 millones de kilómetros. Su densidad es 1,4 veces la del agua líquida. Fuente: [NOAA/NASA](#)

¿Qué pasaría si en la actualidad se produjese una tormenta solar de esta magnitud? Probablemente el impacto sería mucho mayor que en 1859, cuando las telecomunicaciones eran incipientes. Los principales y primeros afectados serían los satélites. No sólo los de comunicación, también los pertenecientes al GPS, los meteorológicos y otros que son fundamentales para nuestra vida. Sus consecuencias también afectarían al sistema eléctrico. El 13 de marzo de 1989 unos 6 millones de personas de la región canadiense de Quebec se vieron sorprendidos por un

gigantesco apagón que duró 9 horas. Los apagones también se produjeron en varias zonas de Norteamérica y en Suecia. El origen fue una gigantesca tormenta solar, mucho menor que la de 1859. Pero, ¿pueden preverse estos episodios? El asunto no es baladí y el riesgo se toma bastante en serio. Por ejemplo, el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos dispone de una sección denominada SWPC [3], que se encarga de seguir las erupciones solares y otros fenómenos cósmicos. Tras la emisión de masa coronar (CME), que se puede detectar en tiempo real, se dispone de varias horas hasta que la tormenta solar alcance el campo magnético terrestre. Los satélites podrían tomar medidas de protección, que incluyen su apagado parcial hasta que la tormenta amaine. Los astronautas de la Estación Espacial Internacional podrían dirigirse a la cápsula Soyuz donde estarían más protegidos. Incluso el tráfico aéreo podría ser suspendido. De hecho ya ha habido ocasiones en que se han tomado algunas de estas medidas. Con el conocimiento actual sólo disponemos de horas para protegernos de sucesos de este tipo, pero una tormenta solar como la de 1859 tendría graves consecuencias que hacen conveniente disponer de más plazo de actuación. Se sabe que volverá a ocurrir; la duda es cuándo. Algunos especialistas opinan que el nuevo ciclo solar que estamos comenzando puede ser especialmente intenso. Para poder hacer pronósticos a más largo plazo debemos profundizar en nuestro conocimiento de la física del Sol.



Ilustración 2.- Imagen tomada por un astrónomo aficionado utilizando un pequeño telescopio refractor (5 cm de diámetro) y proyectando la imagen sobre un papel blanco a unos 30 cm de distancia del ocular.

Fuente: [Wikipedia](#)

Manchas solares, actividad solar y cambio climático

Las tormentas solares están directamente relacionadas con el número y tamaño de las manchas solares. Los años 2008 y 2009 han sido particularmente plácidos, con meses carentes de manchas solares [4]. La primera referencia a las manchas solares data del año 28 a.C. y se debe a astrónomos chinos, pero es en torno a 1610 cuando varios astrónomos, entre ellos Galileo, inician un estudio sistemático ayudado por el telescopio. La abundancia de manchas solares sigue un ciclo irregular de unos 11 años. A veces, y de forma impredecible, estos ciclos se interrumpen con periodos de decenas de años sin prácticamente manchas, como el ocurrido entre 1645 y 1715, llamado mínimo de Maunder. La parte central de este ciclo

coincidió con el periodo más frío, llamado Pequeña Edad del Hielo [6]. Esta aparente coincidencia ha llevado a buscar una relación entre clima y actividad solar.

Se ha podido reconstruir el índice de manchas solares de los últimos 11400 años [5] a partir del tamaño de los anillos de los árboles y de su concentración de carbono 14. Se sabe que los anillos son más delgados en periodos más fríos. Además los anillos correspondientes a estos periodos presentan concentraciones muy elevadas de carbono 14 (el 10% de la típica). La formación del carbono 14 se debe a la interacción de la radiación cósmica extrasolar al incidir a gran altura sobre el nitrógeno atmosférico. El viento solar actúa como un protector frente a esta radiación cósmica: una menor concentración de carbono 14 implica mayor viento solar y por consiguiente mayor actividad radiativa en el Sol. Esta información ha servido para reconstruir el índice de manchas solares y compararlo con el clima del pasado, que se puede conocer mediante el estudio de testigos de hielo de Groenlandia y de la Antártida.

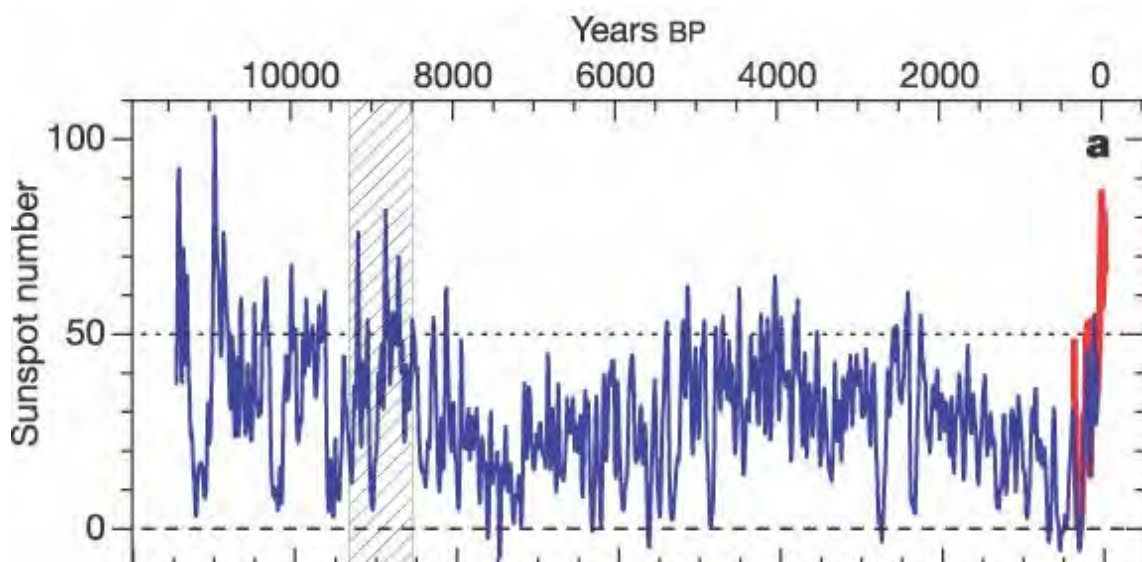


Ilustración 3.– Evolución de las manchas solares desde hace 11400 años. Fuente: [NOAA/NASA](#)

De este estudio se concluye que, de los 11400 años estudiados, los últimos 70 han tenido una alta actividad, que se ha visto súbitamente interrumpida en el año 2006. Desde entonces hasta el verano de 2009 se ha producido una casi total ausencia de manchas. Se ha llegado incluso a pensar que estábamos ante un nuevo mínimo como el de Maunder. Sin embargo, ya empiezan a aparecer nuevas manchas indicándonos que iniciamos un nuevo ciclo de 11 años.

Este último periodo de intensa actividad solar ha llevado a algunos científicos a especular que ésta puede ser la causa más importante del incremento de la temperatura media terrestre de los últimos 40 años. Aunque está claro que existe una conexión causal entre ciclos solares y clima, la gran mayoría de los estudios [6] sostiene que su contribución al calentamiento global es muy inferior a las emisiones antropogénicas de CO₂ y de metano. De hecho, las variaciones de la irradiación solar, para los últimos milenios, entre periodos con gran actividad solar y

periodos de calma oscilan en torno al 0,1%. Este valor es muy pequeño si lo comparamos con la energía retenida en la atmósfera como consecuencia del efecto invernadero producido por el CO₂ y por el metano.

Pero, ¿qué son las manchas solares? Una observación visual, que puede hacerse con un sencillo telescopio, proyectando la imagen sobre una hoja de papel en blanco (nunca por observación directa) las muestra como una zona oscura en la superficie del Sol, aunque su luminosidad es algunas decenas de veces mayor que la de la Luna. Su anchura normalmente es de varios miles de kilómetros, y algunas alcanzan hasta 80.000 km (6 veces el diámetro terrestre). Su temperatura es de 3.000 a 4.500 K, frente a los 5.780 K de la superficie solar. Cuando se analizan en mayor detalle, se ve que son zonas de intensa actividad magnética en las que se inhiben los movimientos de convección. Si nos desplazásemos con una brújula sobre la superficie del Sol, veríamos cómo ésta se movería erráticamente en las proximidades de las manchas. Normalmente las manchas suelen formar grupos que se comportan como huracanes. En estas regiones se originan protuberancias desde las que a veces se desprenden las CME, dando lugar a las tormentas solares. La estructura de las manchas solares ha sido investigada por el satélite SOHO utilizando la transmisión de las ondas sonoras a través de la fotosfera.

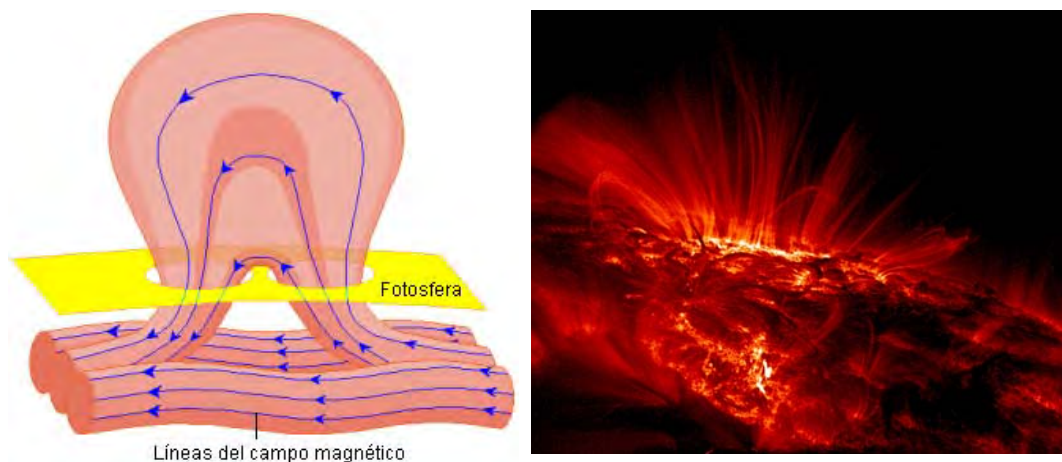


Ilustración 4.- El esquema de la izquierda muestra cómo se forma una llamarada solar. La imagen de la derecha es una fotografía en ultravioleta de la superficie solar. Las manchas corresponden a las zonas más oscuras. La parte central muestra eyecciones de gas caliente de alrededor de un millón de grados. Fuentes: [NASA](#)/Wikipedia.

Un reactor nuclear en el centro del Sol

En última instancia, el responsable de todos estos fenómenos es la energía producida en el interior del Sol. Durante siglos el origen de esta energía fue desconocido. Si el calor del Sol procediese de la combustión química y supusiésemos que todo él es de madera, consumiría toda su energía en 5 mil años. Estaba claro que debía tratarse de otro tipo de reacción. Desde

la década de 1920 sabemos que el origen de esta energía se debe a las reacciones de fusión nuclear que suceden en su interior. Casi toda la masa solar es hidrógeno (73,46%) y helio (24,85%). Dos núcleos de hidrógeno se unen para formar deuterio, el deuterio se fusiona con hidrógeno originando helio 3, dos núcleos de helio 3 se combinan dando lugar a helio 4 y dos núcleos de hidrógeno. Todos estos procesos liberan energía. Las reacciones son posibles por la altísima densidad del núcleo (150 veces la del agua líquida) y la elevada temperatura 14 millones de grados kelvin [7].

Los fotones que se producen en el núcleo en las reacciones descritas tardan cientos de miles de años en llegar a la superficie solar debido al camino tremendamente errático (es un caso extremo de lo que en estadística se conoce como “el andar del borracho”) que recorren para atravesar los aproximadamente 500.000 km que les separan, en línea recta, de la superficie solar. Sin embargo, una vez en la superficie solar, al tratarse de fotones, viajan a la velocidad de la luz siguiendo una línea recta. Los que se dirigen a la Tierra lo hacen en poco más de 8 minutos desde la superficie del Sol.

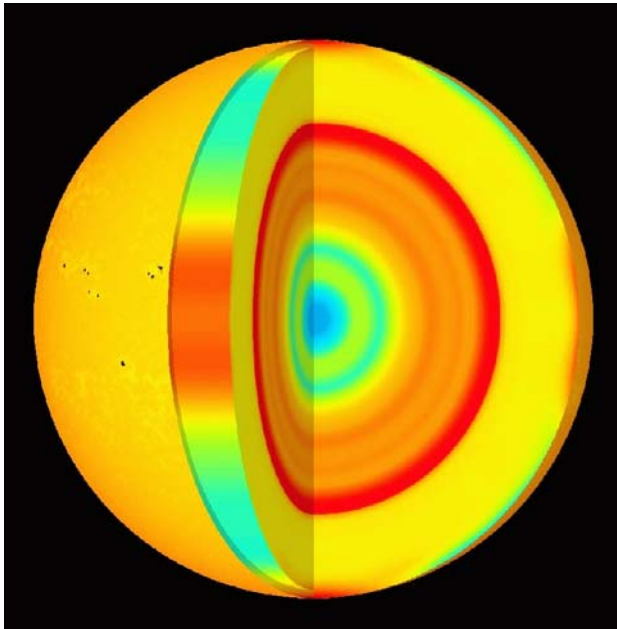


Ilustración 5.- Estructura del Sol, obtenida a partir de la información suministrada por el satélite SOHO. Básicamente podemos distinguir desde dentro hacia fuera, núcleo, zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, cromosfera y corona.

Fuente: [ESA-NASA](#)

La energía emitida por el Sol puede parecer enorme y lo es (en un segundo emite más energía que la producida por la humanidad en toda la historia). Sin embargo, en términos relativos (energía por unidad de masa) la cantidad de energía es muy pequeña, aproximadamente 0,02 calorías por kilogramo y segundo. Si dispusiésemos de una cafetera eléctrica con 1 L de agua con la misma potencia tendríamos que esperar más de cien años en hacer que el agua alcance el punto de ebullición. Ésta es parte de la explicación de por qué el Sol se consume tan lentamente y permanece tan estable durante miles de millones de años, suficientes para haber permitido el desarrollo de la vida en la Tierra.

El Sol y el destino de la Tierra

El Sol inició su vida hace unos 5.000 millones de años, y se espera que permanezca de forma relativamente estable otro tanto, hasta que finalmente se convierta en una gigante roja que engulla a Mercurio y Venus. La Tierra, como cuerpo celeste, probablemente se salve, pero no la vida, puesto que la temperatura en su superficie sobrepasará los mil grados, incompatible para la vida como la conocemos. Sin embargo, eso no debe llevarnos a pensar que las condiciones de la vida en la Tierra se mantendrán estables durante los próximos 5.000 millones de años. Desde su formación, el Sol ha ido elevando muy lentamente su flujo radiativo y así continuará. La irradiación solar ha aumentado el 30% en los últimos 4500 millones de años transcurridos desde la formación de la Tierra. Como la irradiación solar durante miles de millones de años fue mucho menor que la actual, cabría esperar que durante ese tiempo la Tierra debería haber sido una gigantesca bola de hielo, y no lo ha sido [8]. La menor irradiación solar fue compensada por una alta concentración de CO₂ que produjo un gran efecto invernadero, como ahora ocurre con Venus. En menor medida también ha influido el calor interno de la Tierra, debido, entre otras causas, a las desintegraciones radiactivas de los isótopos de las series del uranio y el potasio 40, que eran considerablemente mayores que las actuales. La aparición de la fotosíntesis hace 2.000 millones de años fue disminuyendo la concentración de CO₂, actuando como un gigantesco termostato que ha ido compensando la mayor irradiación solar. Pero este proceso no puede continuar eternamente. La irradiación solar continuará aumentando y en unos centenares de millones de años la temperatura de la Tierra se incrementará en varias decenas de grados haciendo cada vez más difícil la permanencia de la vida en la Tierra. Llegará un momento en el que sólo las bacterias aguantarán las condiciones climáticas.

Es curioso que a un mismo tiempo se estén dando tres fenómenos aparentemente contrapuestos: a) A muy corto plazo: incremento de temperatura por efecto invernadero; b) A medio plazo: disminución de temperatura, al encaminarnos hacia una nueva glaciación y c) A largo plazo: incremento de temperatura por aumento de la irradiación solar.

En resumen: El Sol es la fuente de nuestra vida y el que marcará nuestro destino como especie. Parece que tiene vida para rato, pero a corto plazo puede que nos dé sorpresas para las que debemos estar preparados, como es la repetición de una tormenta solar como la de 1859. Además, su estudio nos permite continuar maravillándonos de la serie de coincidencias que se han tenido que dar para que podamos haber llegado hasta aquí.

Notas y referencias

[1] Hemeroteca de la Biblioteca Nacional de España (<http://www.bne.es/es/Catalogos/HemerotecaDigital>)

CRÓNICA ESTRANGERA.

—AURORA BÓREAL.—La aurora boreal que se observó en Madrid, ó por mejor decir en España en la noche del domingo al lunes de la semana pasada, ha sido ostensible en toda Europa, á juzgar por las noticias que van llegando de París, Londres y otras varias capitales. El *Diario de Bruselas* ha hecho observar que el mismo día se hicieron sensibles varios fenómenos curiosos de la física del globo. Al medio día del domingo, la aguja magnética empezó á sufrir impresiones violentas, y las líneas telegráficas en Ostende, Anvers, Londres, París y Berlín, y aun el cable submarino entre Ostende y Dunroes dejaron percibir signos evidentes de relación con el precitado fenómeno durante el espacio de su aparición.

[2] The Largest Magnetic Storm on Record (<http://www.geomag.bgs.ac.uk/carrington.html>), The "Carrington Event" of August 27 to September 7, 1859; Recorded at Kew Observatory, London [Accedido 2009-11-16]

[3] SWPC es el acrónimo del Space Weather Prediction Center (<http://www.swpc.noaa.gov>). Hace un seguimiento continuo de la actividad solar a través de una serie de satélites y observatorios terrestres.

[4] El índice de masas solares es recopilado por el Solar Influences Data Analysis Center (SIDC, <http://sidc.oma.be>)

[5] Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. *Nature*, Vol. 431, No. 7012, pp. 1084 - 1087, 28 October 2004. S.K. Solanki, I. G. Usoskin, B. Kromer, M. Schüssler, and J. Beer ; <http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/pubs/solanki2004/solanki2004.html>

[6] Fundamentos científicos del cambio climático: Una aproximación al 4º Informe del IPCC. (Nuclear España). Nov 2007. G. Sánchez.

[7] Reacciones de fusión hidrogeno-hidrogeno e hidrogeno-helio, como las descritas, a densidades bajas sólo pueden producirse a miles de millones de grados de temperatura. Por eso los proyectos para generar energía de fusión nuclear en la Tierra, como el ITER, utilizan otra vía basadas en reacciones que se inician con la fusión deuterio-tritio que pueden producirse a menos temperatura. Por eso, no es del todo correcto decir que con los reactores de fusión se pretende conseguir un Sol en la Tierra.

[8] Ha habido episodios durante los que la Tierra estuvo cubierta en gran parte de hielo y no me refiero a las glaciaciones que, por otros motivos, cubren cíclicamente de hielo gran parte de Europa, Norteamérica y el sur de Sudamérica.

=====



GUILLERMO SÁNCHEZ trabaja en ENUSA Industrias Avanzadas S.A. desde 1983. Enseña matemáticas en la Universidad de Salamanca. Ha publicado más de 100 artículos y ponencias.