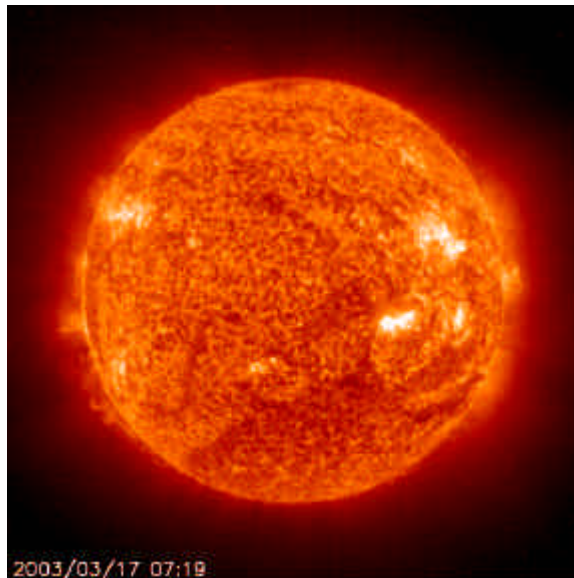


## La variabilidad del interior del Sol y sus posibles efectos climáticos

En marzo de 2003 visitó el Instituto de Astrofísica de Canarias el Profesor Sabatino Sofia, miembro del Departamento de Astronomía de la Universidad de Yale, EE.UU. Durante su estancia en Tenerife, impartió dos conferencias: una divulgativa y un seminario para los científicos del IAC. Su tema de investigación es la variabilidad del interior solar, tema atacado desde el punto de vista teórico y observacional, así como el estudio de los posibles efectos climáticos que estas variaciones pueden tener en la atmósfera terrestre.

### ¿Por qué estudiamos el Sol?

El profesor Sabatino comenzó la conferencia divulgativa con esta pregunta: ¿Por qué estudiamos el Sol? Al fin y al cabo, el Sol sólo es una de alrededor de trescientos mil millones de estrellas que forman parte de nuestra galaxia, y existen miles de millones de galaxias en el Universo. Sin embargo, el Sol es para nosotros un astro muy especial porque es *nuestra* estrella, y responsable última de nuestra existencia. De esta estrella cercana nos llega prácticamente toda la energía que disponemos, sin la cual la vida sobre la Tierra sería imposible y el mismo planeta no existiría. Visto desde este punto de vista antropocéntrico, es importante estudiar el Sol. Pero podríamos citar otros tipos de razones por las que los seres humanos nos esforzamos por comprender cómo funciona: estudiamos el Sol por motivos culturales, porque es fuente de ciencias básicas y porque tiene importantes efectos directos sobre la Tierra.



*Una imagen reciente del Sol (17 de marzo) en ultravioleta, por el satélite SOHO*

Desde la remota Antigüedad, se ha adorado al Astro Rey, al ser dador de luz y calor. Desde tiempos inmemoriales, su recorrido diario a través del cielo ha fascinado al hombre, mitificándolo como dios y sirviendo de base para crear una útil herramienta, el calendario, una vez desarrollados los conceptos de hora, día y año. Ha sido un referente único para conceptos filosóficos y religiosos, se han escrito poemas, libros y canciones sobre él. Se ha representado en esculturas, pinturas y edificios importantes. La cultura de las diferentes civilizaciones a lo largo de nuestro mundo rebosa de referencias al Sol.

Si nos situamos en el punto de vista científico, nuestra estrella ha sido fuente de ciencias básicas a lo largo de toda la Historia. Aparte de su utilidad calendárica, sirvió para demostrar que nuestro planeta no era plano, sino esférico. Ya en la antigua Alejandría macedónica, Eratóstenes llegó a calcular el radio de la Tierra gracias a la sombra que los obeliscos egipcios proporcionaban a distintas latitudes. Fue entonces cuando se comprendió que girábamos

alrededor de él, y no viceversa. Sin embargo, el modelo heliocéntrico fue postergado, y durante más de mil años la hipótesis geocéntrica de Ptolomeo fue la aceptada (o la impuesta). Copérnico, Brahe, Galileo y Kepler recolocaron el Astro Rey en el lugar que le correspondía, provocando el cambio de paradigma científico más importante de la Historia, y abriendo camino a la exitosa teoría de la Gravitación Universal de Newton. En la actualidad, el Sol continúa siendo vital para el estudio de los fenómenos físicos. Uno de los grandes logros de la Astrofísica es la comprensión del ciclo de vida estelar, y el conocimiento de que, dentro de 1000 millones de años, nuestra estrella emitirá tanta energía que la vida en la Tierra será imposible, transformándose paulatinamente en una gigante roja. Pero el fin último del Sol, dentro de unos 4500 millones de años, será una nebulosa planetaria, en cuyo interior descansará una enana blanca. La física de plasmas, la magnetohidrodinámica y la física nuclear se han desarrollado gracias al esfuerzo de entender cómo funciona el Sol. Un gran éxito fue encontrar la fuente de energía de las estrellas, la fusión termonuclear, en la que cuatro núcleos de hidrógeno se funden para proporcionar uno de helio, y energía. Este tipo de energía nuclear por fusión es eventualmente la solución al problema energético al que el mundo se precipita. Más recientemente, el Sol ha sido banco de pruebas para la física de partículas, sobre todo para el estudio de los escurridizos neutrinos. En las últimas décadas del siglo pasado se pensaba que esta partícula elemental, que tiene tres clases y aparece muy involucrada en los procesos de fusión nuclear, no tenía masa. Las dificultosas detecciones de neutrinos provenientes del Sol no concordaban con las cantidades teóricas predichas por los modelos solares: eran tres veces menor de lo esperado. Los físicos de partículas sostenían que el problema era de los modelos astrofísicos del interior solar; los astrofísicos argüían que el fallo era de los modelos de partículas. Recientemente se ha demostrado que el neutrino tiene masa, propiedad que hace que el neutrino pueda “cambiar” entre sus tres clases posibles. Científicamente, este fenómeno se conoce como *oscilaciones de neutrinos*. Como nosotros detectamos mayoritariamente sólo un tipo de neutrino (el neutrino del electrón), el factor tres de las observaciones solares es correcto. El problema está resuelto.

### **Efectos del Sol sobre la Tierra**

Los efectos del Sol sobre la Tierra son evidentes. Continuamente recibimos su luz. Algunos fotones alcanzan la superficie terrestre: son los que nos proporcionan la vista en el rango óptico del espectro. Otras radiaciones son absorbidas, como la poderosa radiación ultravioleta. Una fina capa de ozono es capaz de retener este tipo de luz, protegiendo la vida. Las partículas más energéticas del viento solar también llegan a las inmediaciones terrestres, pero son desviadas por el campo magnético terrestre. En los momentos de máxima actividad solar, estas partículas son capaces de destruir satélites y matar astronautas en órbita. El campo magnético terrestre es más débil en los polos, por donde se cuelan estas partículas energéticas, dando lugar a las famosas auroras boreales y australes. Las pequeñas variaciones en el Sol debido al ciclo solar de 11 años hacen calentar más la atmósfera terrestre. Ésta se expande, alcanzando mayores alturas, y “frenando” a los satélites que se encuentran en órbitas bajas. Si el descenso de velocidad es muy acusado, pueden llegar a caer hacia la superficie. Por este motivo, los satélites deben empujarse hacia fuera cada cierto tiempo. Actualmente, tras el desastre del Columbia y la parada de los lanzamientos tripulados, la misma Estación Espacial Internacional correría este peligro si su órbita no se corrigiera en varios meses.

Una de las causas más importantes por las que interesarse en estudiar la variabilidad solar es por su efecto directo sobre nuestro planeta. Desde el descubrimiento de las manchas solares sobre la fotosfera solar por Galileo, se observó que en algunos años aparecían más manchas o grupos de manchas que en otros, encontrándose un ciclo de once años. Cuando se alcanzan momentos de mayor número de manchas, se tiene un máximo de la actividad solar, y se suceden las fulguraciones y protuberancias, la atmósfera solar se expande, y se incrementan las tormentas magnéticas. En el último siglo se ha podido estudiar con más detalle la actividad solar, encontrándose que la variación de la irradiación solar a lo largo del ciclo de 11 años es de sólo 0.1%. ¿Afecta sobre la temperatura media terrestre? Puede ayudarnos a responder a esta pregunta el hecho de que en el siglo XVII un período de varias décadas de bajos máximos solares correspondía a una pequeña edad de hielo en la Tierra, en la que se sucedieron las bajas temperaturas. A este período se le conoce como “Mínimo de Maunder”, durante el que la radiación solar fue entre 0.2 y 0.3% menor de lo que es en la actualidad. Debería existir alguna relación entre el descenso de la radiación solar y la bajada de la temperatura media terrestre.

Sabemos que uno de los problemas medioambientales más serios en la actualidad es el calentamiento global de la Tierra debido fundamentalmente al efecto invernadero. Pero vamos a ver que este calentamiento también está asociado a la variabilidad solar.

### **¿Por qué necesitamos comprender la variabilidad solar?**

Cualquier fenómeno que aparece en la superficie solar viene del interior. El campo magnético del interior solar, muchas veces ignorado por los modelos al igual que otros fenómenos como la rotación, tiene efectos pequeños pero importantes en los parámetros físicos del interior solar (presión, energía interna, convección, turbulencia). Estas variaciones se traducen en cambios en las variables externas de la estrella, como el radio, la temperatura efectiva, la luminosidad y la irradiancia total emitida. Pero no se conoce aún los órdenes de magnitud de este fenómeno. Para cuantificar estas variaciones internas se desarrollan técnicas para estudiar con detalle las oscilaciones solares, esto es, la forma que tiene el Sol de vibrar. El estudio de las oscilaciones solares es parecido al realizado para conocer cómo es el interior terrestre a través de los terremotos, y se conoce con el nombre de heliosismología.

La variabilidad solar tiene varias propiedades. Una de las más importantes es la escala de tiempo en el que ocurren las variaciones, siendo la más destacada el período del ciclo solar de 11 años. Pero también se están encontrando ciclos menores y mayores, que incluso pueden alcanzar los 1000 años. Por otro lado, no se conoce la energía total de las variaciones puesto que, aunque sean pequeños cambios, se podrían traducir en grandes efectos. Algunos rasgos de variabilidad interna podrían ser difíciles de detectar observacionalmente con los medios actuales. Basta mostrar como ejemplo el cambio en la sensibilidad de los radiómetros, tanto terrestres como espaciales, a lo largo de los años. Actualmente, se suelen asociar estos pequeños cambios con problemas instrumentales, pero podrían ser en parte reales. Para complicarlo todo aún más, la variabilidad del interior solar puede estar relacionada con la variabilidad externa asociada a las manchas y fáculas superficiales. Y existen problemas a la hora de conseguir los datos reales de la irradiancia total, puesto que distintos instrumentos proporcionan al mismo tiempo valores distintos, siendo difícil de calibrar.

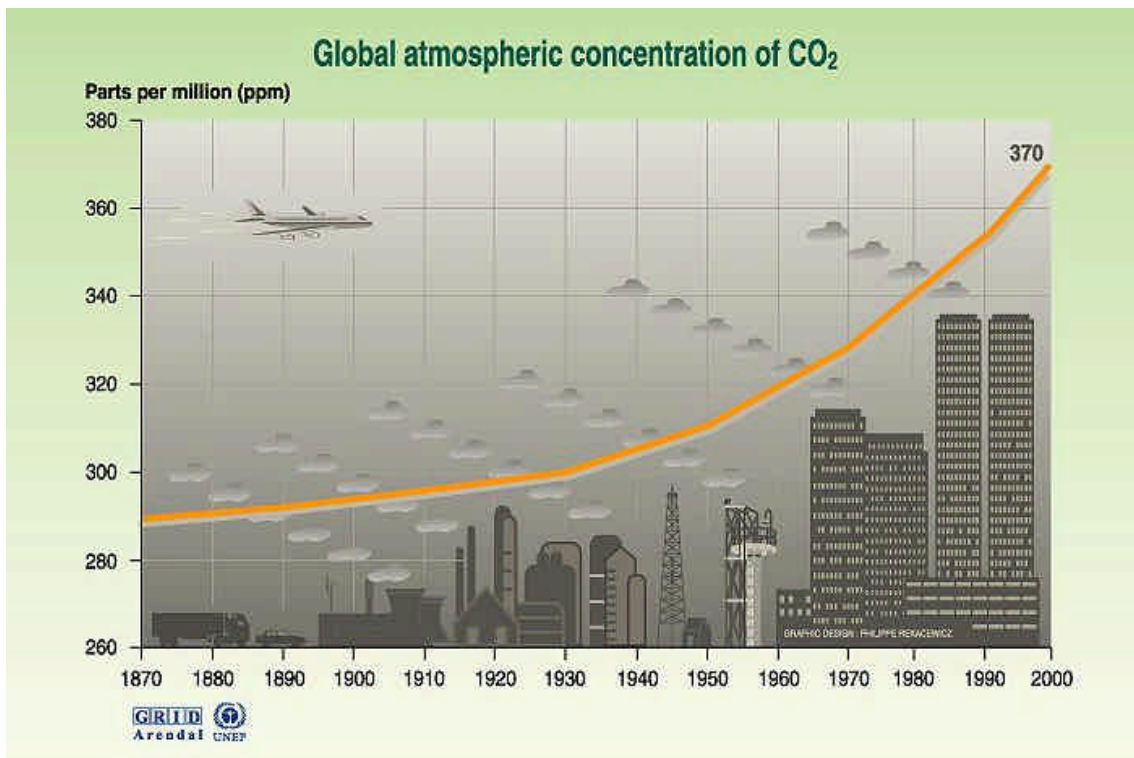
¿Ocurren realmente estos cambios estructurales internos? Las observaciones indican que sí. Por ejemplo, se detectan variaciones de la temperatura fotosférica, alcanzándose incluso variaciones en un 0.1% al día (recordemos que es el mismo valor de la variación que se tiene a lo largo de todo el ciclo solar) que en parte parecen explicarse por los cambios internos. También se producen cambios en el radio del Sol y variaciones de las oscilaciones del interior solar, además de diferencias de la irradiancia total entre dos períodos de mínima actividad.

Para tratar matemáticamente la acción de los campos magnéticos en el interior estelar, deben adaptarse las cuatro ecuaciones principales que rigen el interior del Sol: la conservación de la masa, del momento, de la energía y el transporte energético. Esto se consigue añadiendo dos nuevos parámetros que dan cuenta del campo magnético y la turbulencia. Las ecuaciones de estructura así obtenidas son similares a las estándares, pero ahora aparece un término de dinamo, que puede tener grandes efectos: un campo magnético interno variable puede afectar a los parámetros globales. Los modelos numéricos que mejor reproducen las observaciones son aquellos en los que la densidad de energía magnética es equiparable a la energía que procede del movimiento turbulento. Este resultado parece bastante razonable, puesto que ambos factores están muy relacionados: el campo magnético induce el movimiento de las partículas, y éstas al moverse inducen campo magnético.

### **¿Existe el cambio climático? ¿Lo ha provocado la actividad humana?**

Los gases invernadero, fundamentalmente el dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , y el vapor de agua, pero también otros como el óxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), el metano ( $\text{CH}_4$ ), los fluorocarbonatos (CFCs) y el ozono ( $\text{O}_3$ ) retienen la radiación infrarroja que emite el suelo como consecuencia de la incidencia directa de la radiación solar sobre la superficie. Sin los gases invernadero, esta radiación infrarroja se escaparía hacia el espacio. Un poco de efecto invernadero es bueno: si no existiera, la Tierra sería un mundo cubierto de hielo. Pero el crecimiento constante de la concentración de los gases invernadero, sobre todo dióxido de carbono, hace aumentar la

temperatura media de la atmósfera terrestre. Este hecho está actualmente totalmente comprobado, como se observa en las gráficas que muestran la variación de la concentración de CO<sub>2</sub> en los últimos 150 años. Este crecimiento no es lineal, sino exponencial. El problema es realmente grave.



Sources: TP Whorf, Scripps, Mauna Loa Observatory, Hawaii, institution of oceanography (SIO), university of California La Jolla, California, United States, 1999

*Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> durante los últimos 130 años.  
Datos del observatorio de Mauna Loa, en Hawai.*

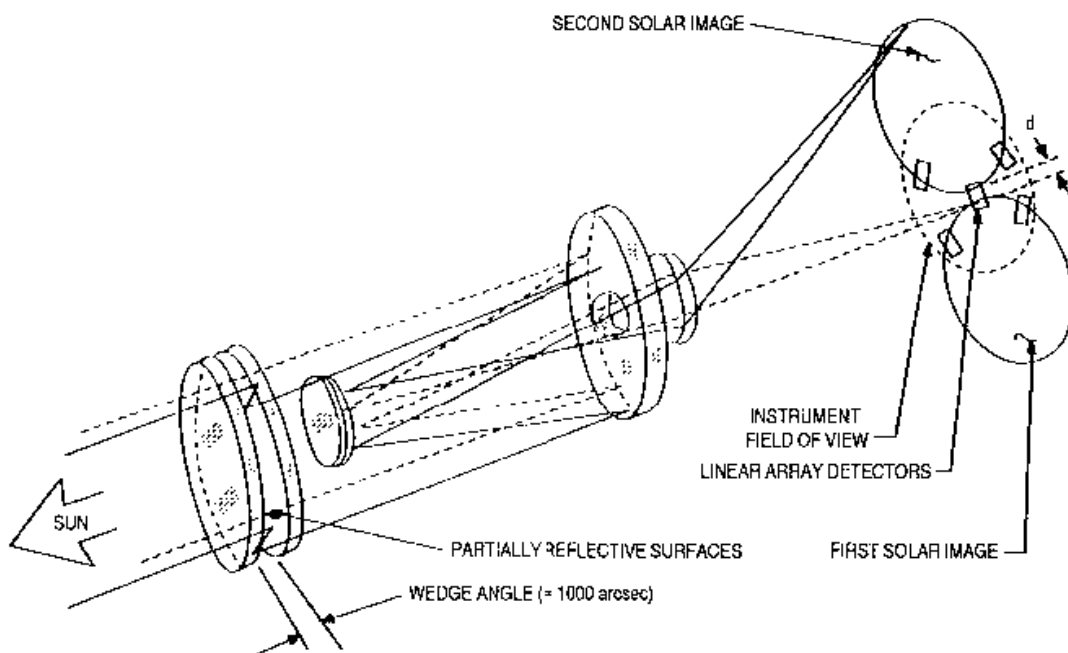
El año pasado se reunieron en Shangai los científicos internacionales más importantes en el estudio del cambio climático, alcanzándose dos conclusiones fundamentales. La primera, que la mayoría del calentamiento observado durante los últimos 50 años es debido a gases de efecto invernadero. La segunda, que el calentamiento para 2100 será entre 1.4° y 5.8° si sólo se doblase la concentración actual de CO<sub>2</sub> en 100 años. Una subida de 1.4° durante este siglo es un problema serio, pero subir 5.8° sería un desastre total. El calentamiento se realiza sobre todo en latitudes altas, provocando el deshielo de los polos y el consecuente aumento del nivel de los océanos como resultado de la fusión de enormes cantidades de hielo continental. La faz de la Tierra cambiaría totalmente, muchas islas desaparecerán, y grandes ciudades costeras quedarán bajo el agua. Además el cambio climático desastroso asociado a este aumento de la temperatura atmosférica media induce un desecamiento de las zonas continentales lejanas de los océanos, ampliándose los desiertos interiores, y una subida de la humedad en las zonas costeras, que se traducen en el incremento descontrolado de las lluvias y fenómenos atmosféricos violentos como huracanes. Ambas variaciones, destacando ésta última, están sucediendo ya.

¿Podemos prever qué ocurriría si doblamos la concentración actual de dióxido de carbono mediante los modelos climáticos que disponemos?. Diseñar un modelo climático de la atmósfera terrestre es un trabajo arduo por la complicación de conocer los propios elementos que intervienen (masas de aire, océanos, masas continentales), todos los parámetros internos (temperatura media atmosférica, densidad, nubes, humedad, dinámica atmosférica) y externos (radiación solar, cobertura vegetal, aerosoles liberados por volcanes, efecto invernadero) implicados, además de todas las interrelaciones que surgen entre ellos. Los ordenadores actuales más potentes tardan cerca de medio año en obtener resultados de los modelos numéricos climáticos. Se suelen despreciar los efectos del Sol en dichos modelos, pero

recientes estudios detallados con códigos numéricos que sí incluían el efecto de la variabilidad solar concluyen que es importante tenerlo en cuenta, siendo además necesario para calibrar los datos numéricos con las observaciones. No obstante, el mayor problema para obtener una buena calibración sigue siendo que no se conoce con precisión cuál ha sido la variación solar debida a cambios internos en el último siglo, porque es algo que se ha comenzado a investigar hace muy poco tiempo.

### El experimento del Sextante del Disco Solar

La radiación solar puede variar tanto por fenómenos superficiales (manchas, fulguraciones, campos magnéticos fotosféricos) como por fenómenos internos que, como ya hemos comentado, son difíciles de medir. No obstante, la teoría indica que estas variaciones internas deben afectar a parámetros medibles observacionalmente, como la temperatura fotosférica, el radio solar y la energía emitida, además de en las propias oscilaciones solares. Durante la pasada década el departamento de Astronomía de la Universidad de Yale (EE.UU.) ha llevado a cabo un experimento, liderado por el profesor Sabatino Sofia, que conseguía medir pequeñas variaciones del radio solar, superando en más de 100 veces a las estimaciones anteriores. Dicho experimento, que recibió el nombre de Solar Disk Sextant (SDS, Sextante del Disco Solar), también medía la forma del disco solar, y sus variaciones temporales. Se lanzaba en un globo aerostático sobre el desierto de Nuevo México, alcanzando una altura de 36 kilómetros, para minimizar problemas debidos al movimiento de las capas de aire de la atmósfera. La precisión del experimento es tan asombrosa que en sólo 20 minutos se consiguió medir el cambio aparente del disco solar por el movimiento propio de la Tierra en su órbita elíptica (se acercaba al perihelio, y el disco solar se incrementaba). Uno de sus resultados más importantes es que en los momentos de menor número de manchas solares, el radio del Sol aumenta. Este cambio es debido a lo que ocurre en el interior estelar.



*Esquema del funcionamiento óptico del instrumento principal del Sextante del Disco Solar, basándose en la técnica de múltiples reflexiones. 5 detectores miden con precisión la separación entre las dos reflexiones principales. De ahí se puede obtener el radio solar en cualquier momento con muy pequeños errores.*

Sin embargo, para contabilizar la variación del radio solar con precisión, se necesitan largos períodos de tiempo. De esta forma, el equipo del profesor Sabatino está realizando una ardua labor recopiladora de medidas de tiempos de eclipses totales y tránsitos de Mercurio, muchas de ellas tomadas por astrónomos aficionados. Si se puede estimar la franja exacta de la totalidad para cada eclipse solar, se puede conocer el radio del Sol, conociendo previamente la posición exacta de cada observador y la distancia a la que la Luna se encuentra de la Tierra en

el momento del eclipse. Aunque llevan estudiados eclipses desde 1715, año en el que Halley predijo uno que cruzó Inglaterra, uno de los casos más curiosos que han recopilado fue el ocurrido a mitad del siglo XX sobre Nueva York. Una de las compañías eléctricas de la ciudad quiso hacer un estudio del mismo, para conocer en qué lugares de la ciudad se llegaba a la totalidad, y dónde no. Se colocaron empleados cada pocas calles, de tal forma que cada uno contabilizó la duración de la fase de la totalidad, en caso de llegarse a producir. Así, se estimó con precisión de metros el límite sur de la sombra de la Luna. Pero en el límite norte no se tenían medidas. Casualmente, el equipo del profesor Sabatino encontró una referencia de un astrónomo que envió una carta a una revista de aficionados pidiendo disculpas porque no pudo obtener unos ansiados espectros de la cromosfera solar, porque el eclipse sólo duró 5 segundos desde su lugar de observación. Conociendo la posición de este astrónomo, justo a unos 80 kilómetros al norte de Nueva York, se determinó con un margen de error de 50 metros el límite norte de la totalidad y, de ahí, el radio del Sol aquel día.

En conclusión, aunque a veces nos preguntamos la utilidad real que tienen los estudios de Astrofísica para la vida cotidiana, encontramos que en el caso del Sol este estudio es eminentemente práctico. Y de gran importancia además, pues del caprichoso comportamiento de nuestra estrella, ese Astro Rey adorado por todas las culturas a lo largo del mundo, depende totalmente nuestra existencia. Debemos esforzarnos por comprender lo que ocurre en su interior. Por nuestra propia seguridad.

*Ángel R. López Sánchez*  
*Astrofísico residente IAC*  
*Presidente Agrupación Astronómica de Córdoba*  
[angelrls@ll.iac.es](mailto:angelrls@ll.iac.es)