

Cuando calienta el Sol

Inés Márquez Rodríguez (Universidad de La Laguna)

Fecha de recepción: 23 de noviembre de 2009

Artículo solicitado a la autora por la revista

Resumen

El Sol es la estrella más cercana a La Tierra y por ello ha sido objeto de adoración en muchas culturas desde tiempos inmemoriales. Sin embargo, resulta curioso que su comprensión genere tan poca atracción entre los aficionados amantes de la Astronomía, y que en general se tenga tan poco conocimiento de sus características. En este artículo daremos una descripción general del Sol, de las capas que lo componen, de las estructuras que se observan y estudian en cada una de ellas, y de algunos de los fenómenos solares que inciden más directamente en nuestro planeta. Hablaremos de la importancia que tienen los observatorios solares canarios, ya que las Islas Canarias están consideradas como el lugar astronómico europeo por excelencia: El Observatorio Europeo del Hemisferio Norte.

Palabras clave

El Sol, Física Solar, Observatorios Solares, Magnetismo Solar, Actividad Solar.

Abstract,

The Sun is the closest star to The Earth and that is why it has been a worship idol in many cultures from time immemorial. Surprisingly, the knowledge of the Sun has excited scarce interest among amateur astronomers. In this paper we perform a general description of the Sun, its stratification and the structures observed and studied in its different layers, as well as the solar phenomena having direct impact onto our planet. We shall discuss about the significance of the Canary solar observatories since the Canary Islands are considered as the European astronomical site for excellence: The European Northern Observatory.

Keywords

The Sun, Solar Physics, Solar Observatories, Solar Magnetism, Solar Activity.

Introducción

El Sol es la estrella que nos da luz y calor. Así nos lo definían las enciclopedias y libros de estudio del S. XX.

El Sol ha sido uno de los objetos más adorados de todos los tiempos como salvador y portador de vida, repartiéndose ese honor con el culto a la Madre Tierra. Así, en las distintas mitologías de todas las culturas y civilizaciones que han existido, desde la prehistoria hasta nuestros días, había un poderoso dios que representaba al Sol; unas veces identificándolo como la fuente de la energía que recibimos y otras como representación de un disco destacado en el cielo diurno.

Son muy relevantes en la historia las divinidades solares egipcias Horus, Aton, Amón y Ra, o las griegas Helios y Febo, o el Sol Invictus y Mitra romanas. En Japón adoraban a la



diosa solar Amaterasu, los hindúes a su dios-sol Surya o a Garuda y en China cabe destacar la leyenda de los Diez Soles, de los que sólo sobrevivió uno que estaba cuidado y conducido por el dios-sol Yan Di. En Méjico, los aztecas adoraban al dios solar, medio hombre y medio mujer, Huitzilopochtli-Tonatiuh y en el Imperio Inca a Inti. Así mismo se veneraba al Sol en todas las tribus indígenas del resto de Norteamérica, de África o de Oceanía. En Canarias el Sol es omnipresente y los antiguos aborígenes lo adoraban utilizando distintos nombres en cada una de las islas (Magec en Tenerife, Acorán en Gran Canaria y Abora en La Palma).

En todas las culturas se pueden encontrar símbolos solares rupestres localizados en lugares de cultos sagrados, o incluso grabados como ornamento en la arquitectura de distintas épocas. El trisquel, el tetrasquel o esvástica, el hexaskel y la hexapétala son ejemplos de símbolos solares indoeuropeos que podrían indicar las fuerzas de rotación solares. En Canarias se han encontrado símbolos astronómicos, en varias islas, como son las espirales rupestres en La Palma, que representaban al Sol, o los grabados podiformes de Tindaya en Fuerteventura.

En 1901, el astrónomo inglés Sir Norman Lockyer quiso demostrar que la mayoría de monumentos y templos prehistóricos o de la historia antigua tenían su eje principal direccionado hacia el Sol, la Luna o hacia alguna estrella destacada del cielo. Así por ejemplo, para el conjunto monumental neolítico de Stonehenge, construido hacia el 1800 a. C. según datación con carbono 14, confirmó que desde la "piedra del altar", mirando hacia la "piedra talón" se podía observar la salida del Sol durante el solsticio de verano, con un margen de error debido a la precesión de los equinoccios. ¿Era un calendario con los ciclos estacionales o un templo para adorar al Sol y la Luna que regían esos ciclos? Parece demostrado que en algún momento fue un sitio sagrado de oración y peticiones en el que además se realizaban ritos funerarios. Alineaciones parecidas encontró en monumentos egipcios, como en el Gran Templo de Amón-Ra en Karnak, y así mismo en varios monumentos de la antigua Grecia. Sus resultados contenían errores de cálculo por algunos supuestos iniciales que hacía, además de que podrían existir otras causas para las orientaciones que conducirían a la misma alineación de algunos de los monumentos. Sin embargo, estos estudios y otros parecidos, confirman que la humanidad ha sido consciente en todas las épocas de la relevancia del Sol en nuestra vida religiosa y cultural. Hoy día la Arqueoastronomía goza de un notable desarrollo y tiene como objetivo fundamental determinar la importancia de la astronomía como parte integrante de la cultura y de la civilización a lo largo de la historia desde el Paleolítico a la actualidad.

El griego Aristarco de Samos (S. III a.C.) fue el primer astrónomo que propuso el modelo heliocéntrico del Universo: la Tierra gira sobre su propio eje y gira alrededor del Sol. Sus ideas astronómicas fueron desechadas por revolucionarias, y él mismo acusado de blasfemia. En esa época, la propuesta aceptada religiosamente era la del modelo geocéntrico de Aristóteles, con la Tierra como centro del Universo, modelo que fue desarrollado posteriormente por Ptolomeo (S. II d.C.). Fue en el S. XVI cuando el astrónomo polaco Copérnico, retomó el modelo heliocéntrico, apoyado posteriormente por Galileo. En el juicio más famoso de la Historia, Galileo tuvo que retractarse públicamente de sus teorías, ante la acusación de herejía por parte de la Iglesia. Es una leyenda que Galileo después de negar sus ideas, terminó afirmando: "y sin embargo se mueve". En 1992 la Iglesia pide disculpas por su error, y en 2009, conmemorándose los 400 años de la invención del telescopio con el Año Internacional de la Astronomía, el actual Papa rehabilita la figura de Galileo Galilei y se decide erigir una estatua suya en El Vaticano. Recientemente se han retractado y han decidido

no levantar un monumento que habría sido un recuerdo permanente de uno de los mayores errores de la historia de la Iglesia.

Datos del Sol

El Sol es una estrella de la secuencia principal, tipo espectral G2 en el diagrama H-R de Hertzsprung-Russell (en el que se relaciona la magnitud absoluta o brillo de una estrella con su temperatura superficial). Se encuentra en uno de los brazos de la Vía Láctea y se formó hace unos 4500 millones de años. Es la estrella del Sistema Solar, y está ocupando uno de los focos de cada una de las órbitas elípticas de los planetas que giran alrededor de él. El futuro del Sol será pasar por diversas fases de expansión (estrella gigante) y contracción (estrella enana), colocándose en cada una de estas fases en distintas ramas del diagrama H-R.

Algunos números del Sol son:

- Tiene un diámetro de 1.400.000 km (unas 109 veces el terrestre), su distancia media a La Tierra es de 150 millones de km y su luz tarda en llegar a La Tierra 8 min.
- Su temperatura es de 15.000.000° C en el centro, decreciendo hasta 6.000° C en la superficie, y volviendo a crecer hacia las capas más exteriores.
- Su masa es 333.000 veces la de La Tierra, y contiene casi el 99% de la masa de todo el Sistema solar.
- Composición: casi 94% de hidrógeno, casi 6% helio y 0.2% de elementos más pesados C, N, O, Fe, etc.
- Estado: gas ionizado (plasma), con densidad creciente hacia el centro.
- Período de rotación promedio 28 días: (con una rotación diferencial de 30 días en los polos y 24 en el ecuador).

Estructura del Sol

El Sol es una esfera incandescente. En su interior se fusionan átomos de hidrógeno para producir helio. En este proceso se libera la energía que viaja hacia el exterior. En el viaje hasta la superficie, la energía se transporta de distintos modos a través de las diversas capas del Sol, en un recorrido que puede durar un millón de años.

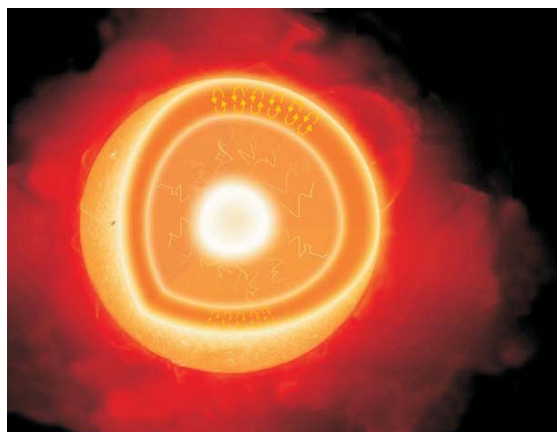


Fig.1: Secciones del Sol

Se puede establecer una distribución de capas o zonas distintas del Sol, según sea el modo como se propaga la energía del interior al exterior:

1. Núcleo

El núcleo es la zona más interior del sol y alcanza hasta el 25% del radio solar. Es en esta zona donde se realiza la fusión de hidrógeno en helio que proporciona toda la energía que el Sol produce. Es un enorme reactor nuclear.



2. Zona radiativa

Abarca el 45% del radio solar. El transporte de la energía que le llega desde el interior se produce por radiación: los fotones, tras chocarse con los átomos repetidas veces, consiguen transportar su contenido energético hasta la zona exterior siguiente.

3. Zona convectiva

Su anchura es de casi un 30% del radio solar. En esta región el transporte de energía se realiza por convección. Debido a las altas temperaturas los fluidos se dilatan transportando energía hacia el exterior. En una cierta altura se enfrían suficientemente y se producen movimientos descendentes de material por efectos gravitatorios. Se forman así las celdas convectivas.

4. Fotosfera

La fotosfera es la zona desde la que se emite la mayor parte de la luz visible del Sol, por eso se considera como la superficie solar. Tiene unos 600 km de grosor y se presenta formada por *gránulos* (zona superior de las celdas convectivas, cuyo diámetro es 1.500 km y cuya vida

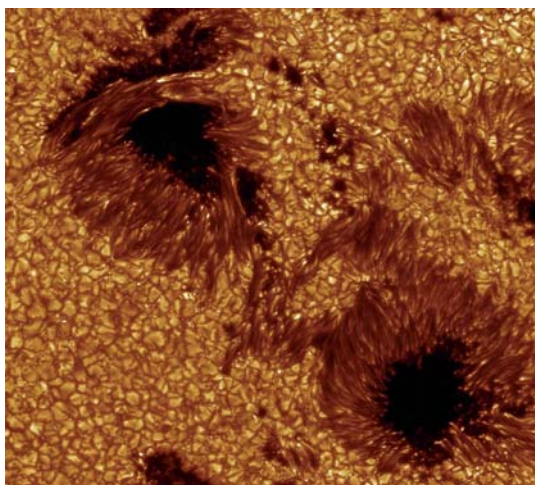


Fig.2: Manchas solares (Foto: SST La Palma)

media es de 8 minutos) y *manchas* (zonas más frías y oscuras que su entorno). Una mancha solar tiene un tamaño variable, en general es enorme, pudiendo alcanzar un diámetro mayor que el de la Tierra. Su número e intensidad varía cada 11 años aproximadamente (ciclo de actividad solar). En el 350 a.C. Theophrastus de Atenas, discípulo de Aristóteles, observó manchas solares a simple vista, pero este resultado iba en contra del cuerpo perfecto que esperaba Aristóteles y fueron olvidadas. Los antiguos chinos parece que también las observaron a simple vista. Muy posteriormente, en el S. XVII, Galileo las ve por primera vez a través de su recién inventado telescopio.

5. Cromosfera

La capa siguiente a la fotosfera es la cromosfera. Es mucho más caliente y transparente, y resulta eclipsada por el mayor brillo de la fotosfera. Su grosor es de aproximadamente 10.000 km. La cromosfera se observa en longitudes de onda específicas, como $H\alpha$, y presenta un tono rojizo característico.

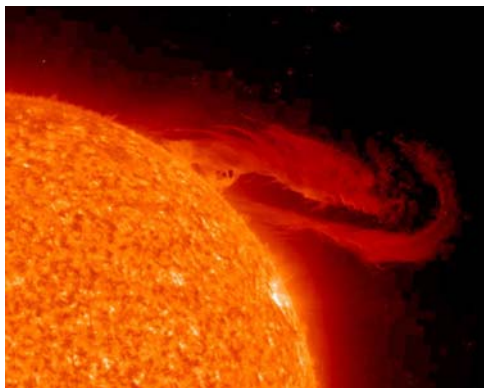


Fig.3: Protuberancia solar (Foto: SOHO)

En la cromosfera se pueden distinguir los *filamentos*, que son de color oscuro y están sobre el disco solar, pero que se vuelven brillantes si se ven en el borde, llamándose entonces *protuberancias*. Las protuberancias solares ascienden ocasionalmente desde la fotosfera alcanzando alturas de hasta 150.000 km produciendo erupciones solares espectaculares.

6. Corona solar

La corona solar está formada por las capas más tenues de la atmósfera solar y sólo es observable durante un eclipse solar o con un disco (coronógrafo) que eclipsa artificialmente el Sol. Su temperatura alcanza hasta 2 millones de grados, una cifra muy superior a la de las capas anteriores, siendo este crecimiento de temperatura uno de los enigmas en continuo estudio en la física solar.



Frecuentemente se producen gigantescas erupciones llamadas *eyecciones de masa coronal*. Desde la corona se emite un flujo continuo de partículas cargadas, a gran velocidad y en todas direcciones, denominado *viento solar*. El espacio bajo la influencia del viento solar se llama *heliosfera* y abarca más allá de la órbita de Plutón.

Fig.4: Corona solar durante un eclipse (Foto: Shelios)

Magnetismo solar

Como consecuencia de la alta conductividad del plasma solar y de su rotación diferencial en torno al eje solar, se generan campos magnéticos que son arrastrados arriba y abajo en la zona de convección. Estos campos magnéticos emergen hacia la superficie del Sol y se concentran, por un lado, en las manchas solares, donde alcanzan una intensidad de unos 3.000 gauss (un imán casero genera unos 100 gauss, y una brújula terrestre funciona con 0.5 gauss); y por otro lado, en las protuberancias solares. Pero el magnetismo solar no se reduce a manchas y protuberancias, en general, los campos magnéticos emergen en la superficie del Sol en forma de pequeños filamentos, separados por distancias tan pequeñas que no podemos resolverlos con los telescopios actuales.

La luz emitida por los átomos en presencia de un campo magnético está polarizada (presenta distintas orientaciones del vector campo eléctrico). Para obtener información sobre la intensidad, geometría y evolución de los campos magnéticos del Sol debemos estudiar la polarización de la luz solar. Se debe realizar una cuidadosa observación, con telescopios y espectropolarímetros, hacer un adecuado tratamiento de los datos obtenidos y por último, una correcta interpretación física de los resultados. Con el estudio de los efectos Zeeman y Hanle podemos obtener información sobre campos magnéticos en la atmósfera solar, desde 0.001 hasta miles de gauss.



Ciclo de Actividad Solar

El flujo de energía que escapa del Sol cambia con el tiempo. Estas variaciones constituyen el "ciclo de actividad solar" y están relacionadas con el número de manchas solares que varía con un período de 11 años. Esta variación parece que es debida al campo magnético. El Sol es un enorme imán que influye en todo su entorno, por lo que el clima de la Tierra está modulado por la actividad magnética del Sol.

Estudiando registros de manchas solares a finales del S. XIX, E. Maunder se dio cuenta de que había una relación entre su número y ciertos fenómenos que ocurrían en la Tierra (como las auroras boreales), y contemporáneos suyos observaron que el magnetismo solar provocaba perturbaciones en sus aparatos de medida. Ahora parece claro que el ciclo de actividad solar influye en la parte alta de la atmósfera terrestre provocando cambios en el clima de La Tierra. Un ejemplo de esta influencia ocurrió entre 1645 y 1715. En este periodo, conocido con el nombre de "mínimo de Maunder", las manchas solares desaparecieron prácticamente del Sol. El mínimo de Maunder coincidió con un enfriamiento del hemisferio norte del planeta que provocó continuas heladas, y como consecuencia de ello, obligó a emigraciones a sitios más cálidos. A esta época se le llama "Pequeña edad de hielo". Se han descubierto otros mínimos y máximos del número de manchas solares coincidiendo con descensos y aumentos, respectivamente, de la temperatura global del planeta. Está documentado que el Támesis se ha congelado coincidiendo con los mínimos del ciclo solar, y en Flandes y Holanda diversos pintores recrearon escenas de transportistas y patinadores en canales y ríos helados durante el mínimo de Maunder.



Fig. 5: Época del mínimo de Maunder (A. Beerstraten, 1639-1665)

Heliosismología

Las observaciones que se realizaban en el Sol daban información de sus capas más externas, pero el interior del Sol era impenetrable al conocimiento. Trabajos pioneros en los años 70 realizados en el Observatorio del Teide por investigadores del IAC y de la Universidad de Birmingham, dieron lugar a nuevas técnicas instrumentales y de observación

basadas en sismos. Actualmente se han establecido redes mundiales de heliosismógrafos (por ejemplo la red GONG), o instrumentos a bordo de satélites como SOHO. La heliosismología permite deducir información del interior del Sol. Estudia el espectro de frecuencias de las ondas acústicas y gravitatorias producidas y atrapadas en su interior y proporcionan información de su estructura y dinámica.

Observando la superficie solar podemos descubrir las frecuencias de las ondas que se propagan por su interior. Así pues, el Sol emite sonidos. Una de las frecuencias principales es de 0.003 Hertzios, que corresponde a una vibración del Sol cada 5 minutos, pero que no oímos ya que el oído humano sólo es sensible a vibraciones entre 100 y 20.000 Hertzios. Por otro lado, según afirman científicos británicos, los arcos coronales, unos enormes anillos de gas caliente y electrificado de la atmósfera del Sol, se comportan como un instrumento musical y portan ondas sonoras que actúan casi de la misma manera que un órgano de tubos. Podemos encontrar varias direcciones de Internet (por ejemplo <http://www.youtube.com/watch?v=vEdCYyEvLQo>) en las que, parece ser, que eliminando y filtrando frecuencias para descontaminar de efectos espúreos, y escalándolas hasta hacerlas audibles, podemos escuchar el sonido resultante del Sol. Usando simplemente el oído, en uno de estos vídeos, el Sol canta, aunque de una forma muy monótona, aproximadamente en Re.

Telescopios para la astronomía solar en Canarias

Debido a la alta calidad astronómica del cielo de Canarias, varios países europeos han construido grandes telescopios solares muy competitivos.



Fig. 6: De izquierda a derecha, Torres VTT, GREGOR, y THEMIS (Tenerife), y SST y DOT (La Palma)

- *En el Observatorio del Teide (Tenerife) se encuentran los telescopios:*

Las torres alemanas **VTT** (70 cm) y **GREGOR** (1.5 m), y el telescopio italo-francés **THEMIS** (90 cm).

Además de estos telescopios situados en grandes edificios, aún existe el vetusto telescopio español **Newton** (40 cm), que en su momento jugó un extraordinario papel en la decisión de la localización de los telescopios posteriores y el **Laboratorio Solar**, con la Pirámide Van der Raay que en sus inicios, en los años 70, contribuyó con un notable descubrimiento que desarrolló la Sismología Solar.



- En el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma) están:

La torre sueca **SST** (1m), y el telescopio abierto (y transportable) holandés **DOT** (45cm).

Actualmente parece necesaria la utilización de telescopios cada vez mayores y con tecnología avanzada, por lo que se hacen consorcios entre diferentes países para compartir los extraordinarios costes de proyectos tan pretenciosos. Como una perspectiva de futuro en Europa está el proyecto de construcción del Gran Telescopio Europeo EST (4 m). Actualmente está en fase de diseño conceptual y se prevé su localización en La Palma, junto a la torre sueca SST.

El trabajar con telescopios cada vez más potentes y con técnicas de restauración de imágenes más refinadas ha permitido captar detalles sobre el Sol que resultaban inconcebibles hace unos años. Muchos de los fenómenos interesantes desde el punto de vista de la Física Solar se dan a escalas muy pequeñas, siempre en el límite de resolución de los telescopios utilizados. El estudio de estos fenómenos se conoce como *Alta resolución en Física Solar*. En esta línea de trabajo, en octubre de 2008 un grupo de astrónomos españoles hace un interesante descubrimiento (Bonet et al., 2008): en la granulación solar observan unos “pequeños remolinos” del tamaño de huracanes terrestres (500 km). La teoría de la convección solar ya predecía tal fenómeno, pero su confirmación mediante observación, aunque perseguida, había permanecido esquiva durante muchos años. Es el efecto de bajada del material debido a la gravedad, de un modo similar a lo que ocurre en los desagües de las bañeras. El descubrimiento fue muy resaltado por la prensa nacional e internacional, y en casi todos los resúmenes de prensa calificaron el hallazgo como “encontrado por casualidad”. El hecho de que estos movimientos se descubrieran ahora, y no antes, se debe a varias razones:

- a) Las observaciones se realizaron con uno de los mejores telescopios sobre La Tierra, la Torre sueca del Roque de los Muchachos.
- b) Las observaciones se hicieron en el mejor cielo astronómico que se contempla sobre La Tierra (en La Palma).
- c) Los datos se restauran mediante una compleja técnica de reconstrucción de imágenes, que utiliza bases infinitas de polinomios ortogonales para modelar las aberraciones ópticas inducidas por el telescopio y la atmósfera terrestre. Por tanto, se puede descontaminar la imagen de estos efectos.
- d) Los datos son analizados por avezados ojos de científico que saben mirar en una película de granulación, en la que todo se está moviendo, y pueden descubrir lo que resulta nuevo entre esos movimientos.
- e) Los adecuados ajustes de espirales logarítmicas a puntos brillantes y significativos, escogidos en las animaciones resultantes, permiten caracterizar los movimientos. Por ejemplo, se obtiene su situación, número, duración, sentido de giro, velocidad de las partículas, etc.

Como se ve, el fenómeno no fue “encontrado por casualidad”.

Un video informativo sobre este evento se puede encontrar en:

http://www.youtube.com/watch?v=zn5C1FPI_SQ.

La música que lo acompaña es el espectacular 2º movimiento de la 7ª Sinfonía de Beethoven.

Observaciones con telescopios no basados en la Tierra

En los últimos años se están realizando observaciones del Sol desde satélites situados en el espacio exterior a La Tierra, evitando así la contaminación producida por la atmósfera terrestre en las imágenes solares. En este sentido, el satélite japonés *Hinode* presta su colaboración desde septiembre de 2006 a las observaciones solares hechas desde tierra, coordinándose en posición y tiempo con los observatorios solares de La Palma y Tenerife.

Otra manera de evitar la contaminación de la atmósfera terrestre consiste en la utilización de globos estratosféricos. El proyecto *SUNRISE*, en el que participan España, Alemania y E.E.U.U., consiste en un telescopio de 1 m de apertura que voló durante seis días en junio de 2009 en un globo estratosférico con trayectoria circumpolar sobre el Polo Norte, aprovechando así el día eterno que ofrece ese lugar en esas fechas. Ensamblado al telescopio se encontraba un magnetógrafo vectorial de alta resolución, IMAx, diseñado por cuatro instituciones españolas lideradas por el IAC. Una vez recogido el material y pre-analizado, las imágenes resultantes presentan una formidable resolución. Los resultados completos aún no han sido publicados, pero la misión, que era un pretencioso reto, ha sido calificada científicamente como un éxito.



Fig.7: Lanzamiento del experimento *SUNRISE* desde el Polo Norte (Base sueca de Esrange).

Es importante resaltar que, con la actual tecnología, el Sol sigue siendo la única estrella donde podemos observar directamente detalles en su superficie, es decir, vemos un disco con muchas estructuras. Cualquier otra estrella se ve sólo como un punto luminoso en el foco de nuestros más potentes telescopios. Así pues, en el Sol tenemos una gran fuente de inspiración



Cuando calienta el Sol

I. Márquez Rodríguez

en cuanto a procesos estelares y a técnicas de detección y medida de estos procesos. Se nos ilumina la mente con la luz de nuestro Sol para así estudiar otras estrellas. Y nos alegra mucho que la estrella que más nos calienta pueda describir de una manera ejemplar a todas las demás.

Bibliografía

The Cambridge Atlas of Astronomy. *Cambridge University Press*, 1988

<http://es.Wikipedia.org>

<http://www.iac.es>

<http://www.iaa.es/revista>

J. A. Bonet, I. Márquez, J. Sánchez Almeida, I. Cabello, and V. Domingo. *The Astrophysical Journal*, 687: L131–L134, 2008

Inés Márquez Rodríguez, es Profesora Titular del Departamento de Análisis Matemático de la Universidad de La Laguna, en Tenerife. Es Colaboradora de investigación del Instituto de Astrofísica de Canarias, y desarrolla sus líneas de investigación en Alta Resolución en Física Solar. Ha presentado varios trabajos en congresos y publicado numerosos artículos en revistas nacionales e internacionales. Tiene gran interés en la Docencia Universitaria y en la Divulgación Científica. Además de su dedicación a las labores de docencia e investigación, es muy aficionada a la Música, al Dibujo y a la Pintura.
e-mail: imarquez@ull.es