

Los Enigmas del Campo Magnético Solar

López Ericsson¹; Aldás Franklin¹

¹Escuela Politécnica Nacional, Observatorio Astronómico de Quito, Quito, Ecuador.

Resumen: En la presente contribución se hace una revisión del rol que desempeña el campo magnético en la ocurrencia de eventos solares tales como: explosiones solares, emisiones de masa coronaria CMs, manchas solares, viento solar y el mecanismo de dínamo para la creación de un campo magnético auto sustentado que esté en concordancia con las observaciones. En este contexto, se presenta una serie de problemas abiertos de la física solar que requieren un mayor estudio para lograr una solución y entender la naturaleza física de los mismos.

Palabras clave: Campo magnético, Sol, CMs, dínamo.

The Secrets of the Solar Magnetic Field.

Abstract: In this contribution a review of the role played by the magnetic field in the occurrence of solar events such as: solar flames, coronal mass emissions (CMs), sunspots, solar wind and the dynamo mechanism for creating a magnetic field self-sustaining in agreement with the observations. In this context, a series of open problems of solar physics that require further study to bring them a solution and understand its physical nature, are presented.

Keywords: Magnetic field, Sun, CMs, dynamo.

1. INTRODUCCIÓN

Algunos de los intereses de la comunidad científica de hace 100 años, era conocer la edad del Sol, su composición química, cómo produce su energía, qué son las manchas solares, entre otros. Se han dado respuestas a estas interrogantes, pero hoy en día tenemos nuevos problemas que necesitan un mayor esfuerzo para llegar a su explicación y entendimiento, problemas ligados al avance tecnológico que nos permite escudriñar la esencia misma de los fenómenos físico que observamos, obteniéndose una gran cantidad de datos de alta calidad que precisan de modelos teóricos que describan la naturaleza física que está detrás de los eventos que tienen lugar en el Sol y en su medio circundante.

El campo magnético está presente en casi todos estos fenómenos solares, pues existen campos fuertes que superan los miles de Gauss los cuales están fuertemente ligados a las corrientes de plasma turbulento que se desplazan por las líneas de fuerza. Las zonas activas del Sol y en particular las manchas solares ocurren debido a la presencia de campos magnéticos cuya naturaleza y su comportamiento aún no se entiende con claridad.

En el presente artículo se describe la presencia del campo magnético en los distintos fenómenos que tienen lugar en el Sol, el papel que desempeña en los modelos físicos y los grandes problemas abiertos contemporáneos ligados al estudio de la naturaleza del astro rey.

lopez.ericsson@epn.edu.ec
franklinaldas@epn.edu.ec

2. LAS MANCHAS SOLARES

Los primeros detalles que observamos en la superficie solar son las manchas solares, las cuales bajo buenas condiciones, son observables incluso a simple vista. Estas manchas nos proporcionan información de la actividad del Sol, la cual la podemos obtener simplemente realizando un seguimiento de las mismas.

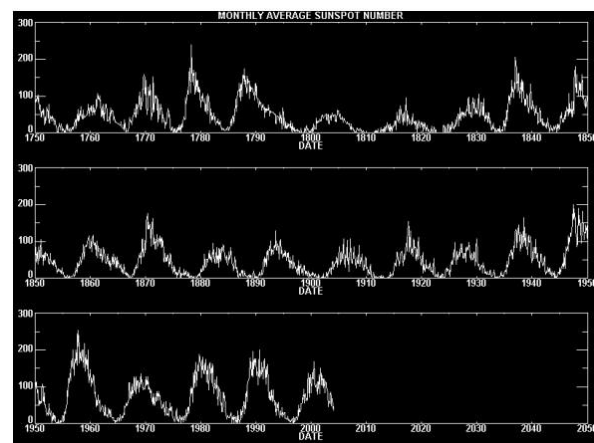


Figura 1. Ciclo de manchas solares. (NASA/Marshall Space Flight Center.)

Cuando no existen manchas en la superficie solar, nos encontramos en un mínimo de actividad. Con pocas manchas solares, estamos en una época de baja actividad y un gran número de manchas distribuidas principalmente en las zonas polares del Sol, corresponde a un máximo de actividad. Luego las manchas disminuyen en número paulatinamente, mientras se desplazan hacia el ecuador hasta desaparecer completamente. Este patrón se repite aproximadamente cada 11 años constituyendo los llamados ciclos solares, que es un

fenómeno ligado a la presencia de un campo magnético variable y bastante complejo (Hathaway, 1994). Actualmente, como se aprecia en la Figura 1, nos encontramos en el ciclo número 24 que comenzó oficialmente el 8 de enero del 2008 (Wilson, 2009), los ciclos solares se empezaron a contar a partir de 1755 que es el año desde el que se tiene un registro sistemático de las manchas solares (Zharkova, 2015).

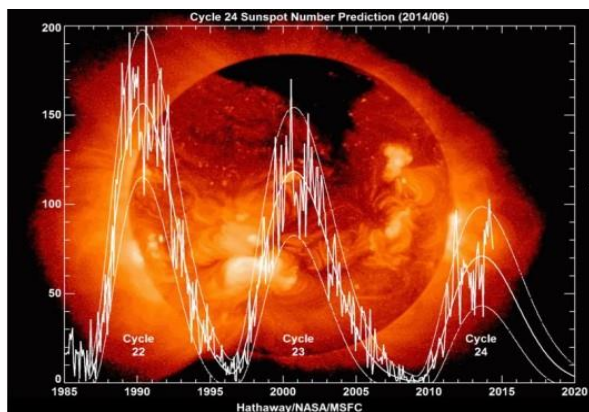


Figura 2. Actividad solar desde 1985 hasta 2015 junto con predicciones hasta el año 2020 (NASA/Marshall Space Flight Center.)

Como se aprecia en la Figura 2, en el presente año nos encontramos en una época de baja actividad, hemos salido de la máxima actividad que se produjo en el 2012 y ahora nos desplazamos hacia el mínimo de actividad que se espera que se alcance en el 2020 (Wilson and Hathaway, 2009). Realizando el seguimiento de las manchas solares, y tomando en consideración el número grupos de manchas solares y el número de manchas solares individuales, se establece el denominado índice de Wolf, que caracteriza la variación de la actividad del Sol (Echer, 2004). Las primeras observaciones fueron realizadas por Samuel Heinrich Schwabe en 1844 (Carrasco, 2015), logrando determinar que el Sol tiene una luminosidad que va cambiando con el tiempo y en periodos de 11 años.

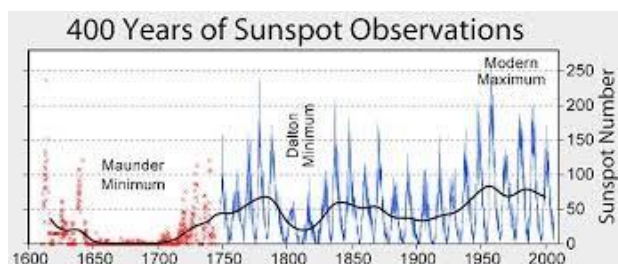


Figura 3. Número de manchas solares tomadas durante 400 años. Se aprecia que desde 1600 hasta 1750 existió una época mini glacial. (Sokolov, 2009)

Remitiéndonos a la Figura 3, se puede encontrar que el sol es muy variable, pues existen épocas de mucha actividad mostrando picos pronunciados, alternados con periodos en los cuales prácticamente no se encontraban manchas solares, es decir épocas de muy baja actividad. Una de época particularmente especial ocurrió alrededor de 1640, durante la cual el planeta se enfrió, por el lapso de unos 100 años, a tal extremo que toda Europa estaba congelada sin otra causa aparente que la actividad solar (Sokolov, 2009). En aquella época no podíamos atribuir a la contaminación ni al efecto

invernadero como las causas de ocurrencia de ésta época mini glacial denominada Mínimo de Maunder (Sokolov, 2009).

En las curvas de la Figura 2, se aprecia la disminución en altura de los picos, estos son cada vez menos pronunciados, lo que indica que los ciclos son menos energéticos, por lo que varios investigadores infieren que nos estamos acercando a una mini edad de hielo.

Otro comportamiento muy interesante del Sol, es que las manchas solares se distribuyen de manera diferente sobre la latitud geográfica solar; cuando estamos en una época de mínimo de actividad, las manchas están alejadas del Ecuador y más bien se ubican cerca de los polos. Es decir, un indicador de la actividad solar es la posición latitudinal de las manchas solares. Esta distribución permite construir el diagrama mariposa (butterfly) (Shove, 1983) (Figura 4) que da una imagen global de la variación de la actividad solar y sus ciclos.

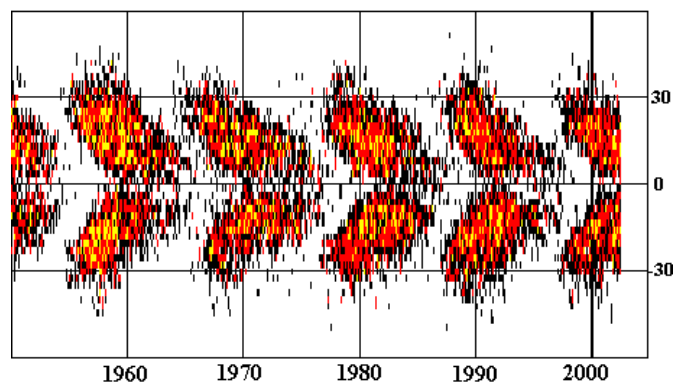


Figura 4. Ciclo mariposa (butterfly) encontrado por Schwabe. (Usokin, 2013)

Por otro lado, se descubrió que las manchas solares se visualizan en pares y con polaridad positiva y negativa, regiones de plasma caliente y turbulento con la presencia de campos magnéticos muy fuertes, del ordenes de miles de Gauss (~ 3000 Gauss). En el centro de las manchas solares el campo magnético es muy intenso, y va disminuyendo en sus alrededores.

3. REGIONES ACTIVAS

Contrariamente a la imagen que observamos cada día de un sol apacible, éste en realidad es bastante violento, en él ocurren permanentemente explosiones expulsando una gran cantidad de materia y radiación hacia el espacio interplanetario. Gigantescas nubes de partículas altamente energéticas se desplazan en lo que llamamos el viento solar, que llegan a las vecindad terrestre interactuando con la magnetósfera, la misma que desvía este flujo de partículas, protegiendo la vida en la Tierra. Las líneas del campo magnético son presionadas por el viento solar dando lugar a fenómenos como la reconexión magnética, que se producen cuando dos líneas de campo magnético se contraen llegando a un límite crítico en el que las líneas se reconectan, provocando la conversión efectiva de la energía magnética en energía cinética y calor. Esta energía es liberada produciendo una aceleración de los electrones del plasma, que se

manifiestan en la ocurrencia de las auroras boreales y australes. La interacción del viento solar con la atmósfera terrestre puede ser tan intensa, que puede provocar graves afectaciones a la operación de los satélites, a las redes de suministro eléctrico y a los sistemas de comunicaciones (Omatola, 2012).

Además de las manchas solares, que son manifestaciones de las regiones activas del Sol, es decir regiones donde el campo magnético es particularmente fuerte, en la corona solar también ocurren emisiones altamente energéticas a las que se les conoce como Emisiones de Masa Coronaria (CMs), las cuales lanzan ingentes cantidades de materia y radiación electromagnética hacia el espacio más allá de la superficie solar.

En algunos casos estas eyecciones se quedan en la corona (llamándose entonces prominencias solares) o pueden adentrarse en el sistema Solar o incluso más allá, al espacio interestelar (Schwarzschild, 1958). El material eyectado es un plasma que consiste principalmente de electrones y protones los cuales salen expedidos a velocidades muy altas del orden de 400 a 800 km/s, partículas que forman parte del viento solar. Las emisiones de masa coronaria (Figura 5) ocurren en promedio una por semana en periodos de mínima actividad y de dos a tres veces por día en máxima actividad (Schwarzschild, 1958).



Figura 5. Llamada solar con emisión de masa coronaria (NASA/Marshall Space Flight Center.)

4. ENIGMAS DEL CAMPO MAGNÉTICO

Todos los fenómenos activos que tienen lugar en el Sol, están relacionados a la existencia de campos magnéticos que provocan y regulan la ocurrencia de los mismos; las manchas solares, las protuberancias, las explosiones solares, las fáculas, las CMs, y el mismo viento solar involucran en su naturaleza la presencia de campos de diversa intensidad y estructura. La complejidad topológica del campo magnético se manifiesta en fenómenos observados que aún no son entendidos enteramente. Por ejemplo, se conoce que en la superficie del Sol (fotosfera) la temperatura promedio es de 6000 K, mientras en la corona solar, que está a más de un millón de kilómetros sobre la fotosfera, la temperatura puede llegar fácilmente a los 2000000 K. Un gran enigma, sobre el cual aún no se tiene una respuesta para explicar cómo es

posible el calentamiento extremo de la corona, cuando por sentido común se espera una disminución de la temperatura en las capas exteriores de la atmósfera solar. Es como pensar en que es posible mantener un pedazo de hielo en el interior de una fogata sin que éste se descongele. Este es un problema abierto de la astrofísica que requiere de mayor estudio para explicar cómo este tipo de sistemas pueden coexistir y mantenerse en forma estable. Una de las contribuciones importantes, realizada por Parker en 1955, fue el desarrollo de un modelo magneto hidrodinámico para explicar el viento solar (Dikpati, 1999).

El viento solar se origina principalmente en las zonas polares, donde las velocidades que alcanza son de alrededor de 900 km/s. Las emisiones ecuatoriales son menos energéticas y más lentas con velocidades del orden de 200 a 400 km/s. Los mecanismos de aceleración del viento solar son aún desconocidos y son uno de los principales problemas de estudio que ocupa en la actualidad, a los físicos solares.

En resumen, los principales problemas ligados al estudio del Sol, que la ciencia trata de resolver son:

- Descubrir los mecanismos de producción de los vientos solares, erupciones prominentes y de la emisión de masa coronal. Se sabe que están relacionados con el campo magnético pero no se conoce exactamente cómo tienen lugar estos fenómenos.
- Las causas del ciclo de 11 años de ocurrencia de las manchas solares y de la variación de la actividad solar. Y el problema de inversión de polaridad del campo magnético; las manchas solares tienen lugar en pares, una con polaridad positiva y otra con negativa, en lo que respecta al campo magnético local. Igualmente, el campo magnético solar global es positivo en un polo y negativo en el otro, pero al transcurrir el periodo de 11 años, de manera misteriosa y casi instantánea, se invierte la polaridad de los campos magnéticos (Shove, 1983). No se ha encontrado la razón por la que ocurre, y no se conoce el mecanismo de la inversión de polaridad mostrado por los datos observacionales.
- El mecanismo por el cual la corona se calienta y el viento solar es acelerado.

La recombinación magnética está siendo utilizada para tratar de explicar la producción de las erupciones solares y la transferencia de energía para el calentamiento extremo de la corona. Este mecanismo, al parecer permite transferir una gran cantidad de energía de las zonas bajas de la atmósfera del sol (fotosfera) hacia las zonas altas (corona). Como también, al formarse bucles con las líneas de campo, estos se saturan y finalmente el campo se rompe permitiendo que el material salga expedido hacia el exterior.

Según la evidencia actual, la respuesta a estas preguntas está en entender el magnetismo solar y es por ello que se realizan

grandes esfuerzos en el desarrollo de modelos, simulaciones, y en las observaciones con mayor precisión y resolución.

El estudio del campo magnético solar es un problema muy complejo, del cual solo conoce que es toroide a gran escala como se aprecia en la Figura 6 (Dikpati, 1999).

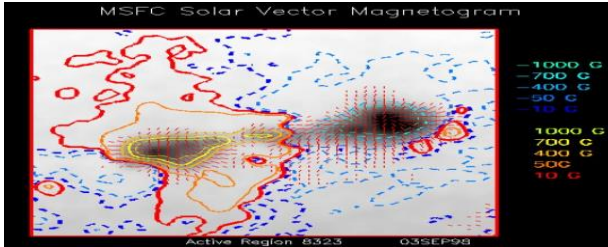


Figura 6. Imagen óptica de una mancha solar, curvas de contorno del campo magnético y direcciones de la componente transversa. (Babcock, 1961)

Las mediciones del campo magnético se realizan a través del efecto Zeeman; que es la división de una línea espectral en varios componentes debido a la presencia de un campo magnético, o por la medida de la rotación de Faraday; que tiene lugar cuando la radiación pasa por un medio en el que está presente un campo magnético, que hace que el vector eléctrico de la radiación electromagnética, rote en un ángulo determinado en función de la intensidad del campo magnético presente.

5. MODELO DEL DÍNAMO SOLAR

Uno de los resultados observacionales de los últimos tiempos, logrado gracias a la alta resolución alcanzada en la determinación de la variación temporal y espacial del campo magnético solar, es el haber encontrado un diagrama tipo butterfly, bastante similar al que Parker descubrió para las manchas solares (Dikpati, 1999). Curioso comportamiento que muestra la complejidad del campo magnético y la existencia de ciertos patrones, como se indica en la Figura 7.

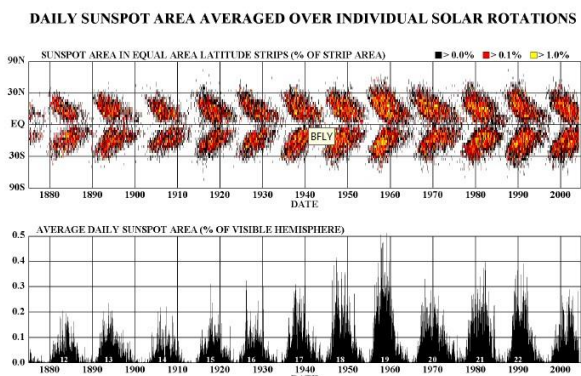


Figura 7. Distribución latitudinal de las manchas solares en la superficie solar (NASA/Marshall Space Flight Center.)

Por otro lado, existen varias capas internas y externas en el Sol. En las externas se tiene: la fotosfera, cromósfera, la región de transición, la corona y el viento solar que son las regiones visibles y directamente observables. Entre las internas: el núcleo, la capa radiactiva, la zona de convección y ahora se añade una región intermedia entre las zonas radiactiva y conectiva, denominada tachocline, región en la

cual se transforman los campos de toroidal a poloidal y viceversa. Esta región de transición fue descubierta gracias a la introducción de las nuevas técnicas de helio-sismología que nos permiten escudriñar el interior solar bajo la zona conectiva (Kosovichev, 2013).

La clave para entender el campo magnético del Sol, es entender cómo se genera en su interior y es ahí en donde se enfocan los mayores esfuerzos y los grandes desarrollos. Al momento, la propuesta de mayor aceptación es la teoría del dínamo solar, es decir el campo magnético creado por la rotación diferencial de un fluido cargado, y que es capaz de mantener un campo magnético frente a la disipación óhmica. Esta formulación fue hecha por Parker en base a las ecuaciones de la magneto hidrodinámica que son: ecuación de la continuidad (1), inducción (2), momento (3) y energía (4).

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{u}) \quad (1)$$

Inducción:

$$\nabla \vec{B} = 0, \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{u} \times \vec{B} - \epsilon \nabla \times \vec{B}) \quad (2)$$

Momento:

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{u} \nabla \vec{u}) - \nabla P + \rho \vec{g} + \nabla \tau + F_{others} \quad (3)$$

Energía:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \right) \left(\frac{P}{\rho \gamma} \right) = Fuentes - Sumideros \quad (4)$$

Dónde: \vec{B} es el campo magnético, \vec{u} es la velocidad del plasma, \vec{j} es la corriente de densidad, ρ es la densidad de masa, P es la presión del plasma, y t es el tiempo. En la mayoría de trabajos se simplifica las ecuaciones por la dificultad de su tratamiento analítico, generalmente se hacen algunas consideraciones sobre el magnetismo en la superficie del Sol y en los fluidos. No son modelos muy buenos porque están colmados de simplificaciones, pero son las mejores propuestas que existen hasta el momento. Para realizar el planteamiento de un modelo de dínamo existen 3 requisitos básicos:

- Se debe tener un fluido eléctricamente conductivo.
- La energía cinética debe provenir de la rotación del Sol.
- Debe existir una fuente de energía interna que mantenga el movimiento conectivo dentro del fluido.

De estas relaciones, la ecuación de la inducción (2), desempeña un rol muy importante en estos modelos, en la misma, entran en juego dos partes, las que permiten mantener la estabilidad del sistema: la componente de inducción ($\nabla \times (\vec{u} \times \vec{B})$) que produce el aumento de la energía a través de las líneas de campo y la componente negativa ($\nabla \times \epsilon (\nabla \times \vec{B})$) que cuantifica la disipación óhmica del campo magnético, es decir la pérdida de energía en forma de calor.

El problema del dínamo esta reformulado hacia la preservación de la regeneración cíclica del campo magnético asociado con el ciclo solar observado. Las ecuaciones de la

magneto hidrodinámica de Navier-Stokes dan cuenta de la continuidad, del estado de la materia, de los momentos, de las fuentes, entre otras magnitudes físicas, que deben ser consideradas en acoplamiento con el campo magnético auto consistente. En un campo magnético axisimétrico se tiene una componente poloidal la cual es la responsable de los campos débiles y una componente toroidal la cual es dominante en la superficie solar. En el interior domina la componente toroidal que permite la formación de manchas solares (Kosovichev, 2013). Dentro del Sol se puede identificar un campo poloidal ($B_r\vec{e}_r + B_\theta\vec{e}_\theta$) y un campo toroidal ($B_\phi\vec{e}_\phi$), por lo tanto el campo magnético total lo podemos expresar como (5) y la velocidad del plasma como (6).

$$\vec{B} = B_r\vec{e}_r + B_\theta\vec{e}_\theta + B_\phi\vec{e}_\phi \quad (5)$$

$$\vec{u}(r, \theta) = u_r(r, \theta)\vec{e}_r + u_\theta(r, \theta)\vec{e}_\theta \quad (6)$$

Sea: $w = r\sin(\theta)$, entonces, el potencial vectorial \vec{A} , cumplirá con la ecuación (7) y el campo magnético la ecuación (8):

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \varepsilon \left(\nabla^2 - \frac{1}{w^2} \right) \vec{A} - \frac{u_p}{w} \cdot \nabla (w\vec{A}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \varepsilon \left(\nabla^2 - \frac{1}{w^2} \right) \vec{B} - \frac{1}{w} \frac{\partial (w\vec{B})}{\partial r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} - wu_\rho \cdot \nabla \left(\frac{\vec{B}}{w} \right) - \vec{B} \nabla \cdot u_\rho + w \left(\nabla \times (\vec{A}E_\theta) \right) \cdot \nabla \omega \quad (8)$$

El campo poloidal se puede transformar en toroidal debido a la rotación diferencial, es decir debido a que el Sol es un gas y no todas sus regiones rotan a la misma velocidad. La transformación de la componente toroidal en poloidal es más difícil de explicar porque requiere una fuente adicional, la que podría encontrarse al considerar la turbulencia de las capas superficiales del Sol (Kosovichev, 2013).

Los modelos de dínamo solar deben reproducir el periodo de 11 años del ciclo solar, dar cuenta de la migración de manchas solares a la zona ecuatorial, la inversión de polaridad, tener en cuenta la fuerza del campo magnético toroidal, la simetría de paridad observada en las manchas solares y la helicidad magnética negativa predominante en el norte del hemisferio solar, siendo positiva en la parte sur. Los resultados cobran interés y valor cuando son interpretados a la luz de la teoría de base; presentada en la sección anterior.

6. CONCLUSIONES

Los modelos de dínamo describen el proceso a través del cual, un fluido rotante, convectivo y eléctricamente conductor, actúa para crear y mantener un campo magnético. El origen del campo magnético solar se mantiene como un obstinado reto de la astrofísica moderna.

En la superficie solar el campo magnético asume una estructura jerárquica compleja en espacio y tiempo. Algunas características sistemáticas como el ciclo solar y el diagrama butterfly apuntan concluir que el campo magnético es predominantemente toroidal de gran escala. El problema del dínamo solar es que es muy difícil abordar a través de una

simulación numérica directa del conjunto completo de las ecuaciones de la magneto hidrodinámica. Esta teoría no está concluida, en realidad es campo abierto muy activo estimulado con la incorporación de nuevos datos de la heliosismología, que permite observar el movimiento del gas en las capas más internas del sol y llegar a la zona convectiva.

Para el desarrollo de nuevos modelos o la mejora del modelo del dínamo solar, los datos observacionales de alta calidad obtenidos con los telescopios espaciales como el SLOAN y el SOHO, ubicados en los puntos de Lagrange, es decir, de gravedad cero, constituyen un gran aporte.

REFERENCIAS

Babcock, H.W., 1961. The topology of the sun's magnetic field and the 22-year cycle, The Astrophysical Journal 133, 572-587. Basu, S., Antia, H. M., 2003. Changes in Solar Dynamics from 1995 to 2002. The Astrophysical Journal, Volume 585, Issue 1, pp. 553-565.

Carrasco V, Sunspots during the Maunder Minimum from Machina Coelestis by Hevelius, Universidade de Évora, Évora, Portugal, pp. 3-4, 2015

Echer E, Prediction of solar activity on the basis of spectral characteristics of sunspot number, Annales Geophysicae (2004) 22, pp.9-10.

Chiappori, P.-A., DŽavila, J.: Sunspot and cycles: the Poincaré-Hopf approach. Journal of Mathematics 26(3), (1996)

Dikpati, A Babcock-Leighton Flux Transport Dynamo with Solar-like Differential Rotation, The American Astronomical Society, 1999.

Eddy, J. A.: The solar output and its variation: O. R. White, Colorado Associated University Press, Boulder, 1977.

Hathaway D. "The shape of the sunspot cycle", Space Science Laboratory, 1994, NASA Marshall Space Flight Center, 35812, Huntsville, AL, USA

Kosovichev E, A. G. (eds.), Helioseismic Constraints and Paradigm Shift in Solar Dynamo, 2013 Astronomical Society of the Pacific, 2013

Kosovichev E, A. G. (eds.), Multi-Wavelength Investigations of Solar Activity, IAU Symp. 223, 257.

Omatola, Impacts of solar storms on energy and communications technologies, Arch. Appl. Sci. Res., 2012, 4 (4):1825-1832, 2012

Ronan, A comparison of vector magnetograms from the Marshall space flight center and mees solar observatory, Solar Physics, March 1992, Volume 138, Issue 1, pp 49-68

Schwarzschild, M. : 1958, Structure and Evolution of the Sun, Princeton University Press, p. 32

Shove, D. J.: 1983, Sunspot Cycles, Hutchinson Ross Publ., Stroudsburg, Pennsylvania, p. 81.

Sokolov Dmitry, Sunspot cycles and Grand Minima, 2009, International Astronomical Union 2010 doi:10.1017/S1743921309992511

Usoskin Ilya, "A History of Solar Activity over Millennia", Living Rev. Solar Phys., 10, (2013), 1, doi:10.12942/lrsp-2013-1

Wilson, R. M. and Hathaway, D. H., 2009a, "Predicting the Size of Sunspot Cycle 24 on the Basis of Single- and Bi-Variate Geomagnetic Precursor Methods," NASA/TP-2009-215687.

Zharkova, Heartbeat of the Sun from Principal Component Analysis and prediction of solar activity on a millenium timescale, Scientific Reports 5, Article number: 15689, 2015.