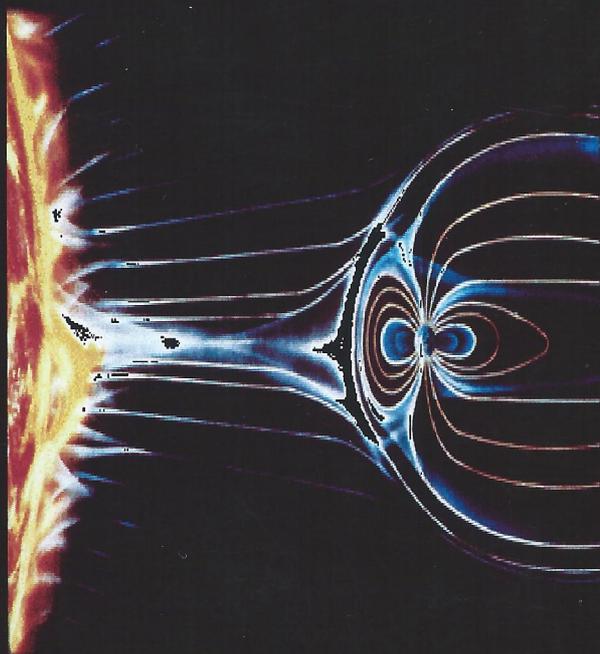


Los Enigmas del Sol

Sergio Dasso



Esta publicación se edita en
el marco del convenio entre la
**ASOCIACIÓN GREMIAL DOCENTE DE LA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES (AGD-UBA) y
EDICIONES COOPERATIVAS**

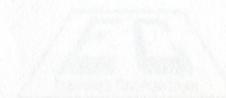
Comité Editorial

Prof. Carlos Bulcourf
Lic. Alejandro García Venturini
Lic. Axel Kicillof
Act. Alberto Landro
C.P. Juan Carlos Seltzer

Otras Publicaciones editadas en el marco del convenio
AGD-Ediciones Cooperativas:

El Espacio-Tiempo de Einstein,
de Rafael Ferraro

Los Enigmas del Sol



Sergio Dasso



Los Enigmas del Sol



*Ediciones Cooperativas es un emprendimiento
cooperativo de docentes de la Facultad de Ciencias
Económicas de la Universidad de Buenos Aires para
difundir sus trabajos e investigaciones.*

Ninguna parte de esta publicación, incluido el diseño de cubierta
puede ser reproducida, almacenada o transmitida en manera
alguna ni por ningún medio, ya sea electrónico, mecánico,
óptico de grabación o de fotocopia sin permiso previo del Editor.
Su infracción está penada por las leyes 11723 y 25446.



Dasso, Sergio
Los Enigmas del Sol 1ª. ed. – Buenos Aires: Ediciones Cooperativas, 2005.
110 p.; 21x15 cm.

ISBN 987-1076-92-4

1. Tormentas Solares I. Título
CDD 523.7

© 2005 Sergio Dasso
Derechos exclusivos

© 2004 Ediciones Cooperativas

Billinghurst 940, 4º 20 (1174)

Buenos Aires – Argentina

1ª edición, marzo 2005

☎ (54 011) 4864 5520 / (15) 4198 5667

🌐 <http://www.edcooperativas.com.ar>

✉ info@edcooperativas.com.ar

Diseño de Cubierta y diagramación: Matías Reck

Hecho el depósito que establece la ley 11.723

Impreso y encuadernado por:

Imprenta Dorrego. Av. Dorrego 1102, Cap. Fed.

1ª. ed. Tirada: 50 ejemplares. Se terminó de imprimir en marzo de 2005.

IMPRESO EN ARGENTINA – PRINTED IN ARGENTINE

Editorial asociada a:



Les dedico este trabajo especialmente a las tres
personas que día a día le dan sentido a mi vida: a
mi esposa Nancy, y a mis dos hijos Bianca y Rocco.
Y a mi madre, quien me obsequió y me enseñó a
amar la vida.

Índice

Presentación	13
1 La Ciencia del Sol y del Entorno Terrestre	19
1.1 El Recorrido histórico del Átomo	19
1.2 Cuando el Electrón y el Núcleo se Divorcian (o Plasma, el Cuarto Estado de la Materia)	23
1.3 Un Tenue Soplido desde Sol	24
1.4 Un poco más de historia	28
1.4.1 <i>La Manzana de Newton</i>	29
1.4.2 <i>Brújula, Magnetismo Terrestre y Tormentas Magnéticas</i>	30
1.4.3 <i>Hay Manchas en el Sol !</i>	34
1.4.4 <i>La Conexión Sol-Tierra</i>	35
1.4.5 <i>Una Capa Atmosférica con Propiedades Especiales. La Ionosfera</i>	37
1.4.6 <i>Un Viento Interplanetario en el Sistema Solar</i>	38
1.4.7 <i>La Emisión de proyectiles Solares</i>	43
1.4.8 <i>Un Proceso Durante la Interacción Sol-Tierra Llamado "Reconexión Magnética"</i>	43
1.4.9 <i>Un Cinturón de Radiación Cercano a Nuestro Planeta</i>	44
2 El Astro Rey	47
2.1 Sol y Fusión Nuclear	48
2.2 Su Interior	52
2.2.1 <i>El Horno Solar</i>	52

2.2.2 Un Fotón Perezoso y Burbujas Surgiendo por Flotación	53
(o Las Primeras Etapas del Escape de la Energía Solar)	53
2.2.3 Las Tres Capas más Externas: Fotosfera, Cromosfera y Corona	54
(o La Atmósfera Solar)	54
2.3 El Sol Gira sobre Sí Mismo !	58
2.4 El Ciclo del Sol	59
2.4.1 La Evolución de las Manchas Durante el Ciclo	60
2.4.2 Hay Varios Indicadores de la Actividad Solar	61
2.5 Mínimos de Maunder y de Spörer, y Gran Máximo	62
2.5.1 Un Testigo Terrestre de la Actividad Solar	63
2.5.2 Radiación Cósmica y Ciclo Solar	64
2.5.3 Temperatura Terrestre y Actividad Solar	65
2.6 Transición desde un Mínimo Solar al Próximo	66
2.7 Viento Solar I - El Viento Cerca de la Tierra	67
2.8 Pérdida de Masa Solar	68
2.8.1 Debido al Viento Solar	69
2.8.2 Debido a la Radiación Electromagnética	70
2.9 Viento Solar II - Un Viento no tan Ordenado	71
3 Nuestro Hogar	75
3.1 La Atmósfera Terrestre y sus Capas	76
3.2 Hay Magnetismo en el Entorno Terrestre	77
3.2.1 La Estructura Magnética	79
(o Estructura de la Magnetosfera)	79
3.2.2 ¿Cómo es la Descripción Matemática del plasma en la Magnetosfera Terrestre?	80
3.3 Su TV, su teléfono y las Sondas Espaciales en el Entorno Terrestre	81
3.4 No Todas las Órbitas son Iguales	82
3.5 El Otro Rol de los Satélites del Entorno Terrestre	84

4 Las Nuevas Carabelas. Instrumentos y Sondas Científicas	85
4.1 Una Misión para Aprender acerca del Máximo Solar	85
4.2 Cooperación Científica internacional, el ISTEP	86
4.3 Una Misión para Aprender más acerca del Viento Solar: La Sonda "Wind"	86
4.4 Mediciones Simultáneas. El Proyecto Cluster	87
4.5 Propiedades del Viento solar en Altas Latitudes. La Sonda Ulysses	88
4.6 ACE, un Centinela. TRACE y el Aumento de la Temperatura Coronal	88
4.7 Argentina y su Proyecto Espacial	89
4.8 Las investigaciones e instrumentos en Argentina.	91
5 La Influencia del Sol sobre las Actividades Humanas	93
5.1 Algunos Hechos Negativos	93
5.2 ¿Qué es una Tormenta Geomagnética?	94
5.3 Causas de las Tormentas Geomagnéticas	96
5.4 Comentarios Finales	99
Bibliografía Básica Sugerida para Ampliar los Temas Tratados	103
Sitios de Internet para Ampliar los Temas Tratados	105
Magnitudes Importantes del Sistema Solar	107

Presentación

Al comenzar a diseñar este texto pensé en aquellas creencias antiguas que sugerían influencias misteriosas desde el Sol y desde otros objetos astronómicos sobre la Tierra y sobre sus habitantes ...

Cuando manifesté mi interés en escribir un volumen acerca del Sol, un colega de la Universidad me mostró a través de un artículo, el gran respeto que la cultura prehispánica mexicana tenía hacia la astronomía y particularmente hacia el Sol. Quizá este especial interés haya motivado el nivel tan avanzado de conocimiento astronómico que tenía esta antigua cultura. Un conocimiento que aprovecharon, por ejemplo, para mejorar técnicas del desarrollo de su agricultura aplicando sistemas calendarios de gran exactitud.

Quizá lo más destacable de lo que hoy se cree acerca de la historia antigua de la humanidad sea el nivel de conocimiento que se había alcanzado en Grecia y en Babilonia hacia el año 600 AC. El nivel de conocimiento matemático que disponían les permitía construir mapas con la posición de las constelaciones; actuales excavaciones arqueológicas han podido mostrar que al menos 400 años antes de Cristo, los babilonios no sólo registraban las posiciones de los planetas sino que construían tablillas conteniendo cálculos de éstas. Incluso se cree que en Grecia, Tales de Mileto pudo predecir el eclipse que ocurrió el 28 de mayo del año 585 AC. Eratóstenes, quien fuera director de la biblioteca de Alejandría, midió el valor del radio terrestre con gran exactitud hacia el año 240 AC; para obtenerlo supuso que la Tierra era redonda (¡ya los griegos de aquella época no lo dudaban!) y comparó observaciones de la posición aparente del Sol en Alejandría y en Siena; mediante estas mediciones y a través de cálculos trigonométricos pudo estimar el radio

terrestre en 6000 Km, un valor sorprendentemente cercano al que se conoce actualmente.

Desde aquellos primeros descubrimientos obtenidos en la antigüedad ha habido avances, estancamientos y retrocesos en el progreso del conocimiento astronómico. La humanidad atravesó un largo y espinoso camino hasta alcanzar el nivel actual de comprensión de las influencias que tiene el Sol sobre la Tierra. Las primeras etapas transitadas fueron llevadas a cabo por muchas personas con inquietudes especiales. Algunas lograron imponer sus ideas oponiéndose al paradigma científico establecido y otros lo hicieron reforzando el caudal en la dirección en que fluía el río del conocimiento. En la actualidad existe un gran consenso acerca de las leyes físicas que determinan el movimiento de la Tierra respecto del Sol, sin embargo no es tan conocido el papel detallado que desempeña el electromagnetismo en la interacción Sol-Tierra.

Uno de los objetivos principales de la Física Espacial ha sido (y es) comprender los mecanismos de interacción entre la Tierra y el Sol, en particular aquellos mecanismos mediados por el espacio interplanetario. Hay un interés especial en conocer detalladamente aquellos procesos que ocurren en el Sol y tienen consecuencias significativas en la Tierra. Por tal motivo organizaciones científicas mundiales han diseñado sensores que enviaron al espacio, montados en naves espaciales; el desafío de los hombres de ciencia es extraer el máximo provecho posible de la información que se dispone de estas misiones.

El efecto negativo que tienen algunos fenómenos solares sobre ciertos dispositivos tecnológicos modernos utilizados en la Tierra o en las inmediaciones de ella intensificó, en los últimos 20 años, el interés sobre la interacción Tierra-Sol. Los efectos mencionados actúan, por ejemplo, sobre satélites meteorológicos, sondas espaciales de comunicaciones, satélites militares y centrales eléctricas.

Para comprender la influencia del Sol sobre la Tierra necesitamos entender los mecanismos que hacen posible su interacción. Esta interacción tiene tres 'actores' principales: la gravedad, la radiación electromagnética y la transferencia de partículas eléctricamente cargadas. La gravedad es la que hace posible que la Tierra orbite ligada al Sol. La trayectoria que realiza la Tierra es consecuencia de la atracción gravitatoria. La radiación electromagnética puede observarse en las ondas luminosas emitidas por el Sol. Sin embargo éste no sólo irradia luz, sino que emite ondas electromagnéticas en un amplio rango de energía; parte de esta radiación es absorbida en las capas atmosféricas terrestres. La transferencia de partículas cargadas proviene en parte del soplo permanente que el Sol realiza desprendiendo un flujo continuo de partículas cargadas en estado de plasma, llamado viento solar. La transferencia de partículas también puede provenir de violentas emisiones espontáneas de grandes cantidades de masa, provocadas por el retorcimiento de líneas magnéticas solares, que perturban el espacio interplanetario produciendo intensas modificaciones en las condiciones magnéticas terrestres.

Es mi interés a través de este trabajo divulgar las etapas principales que la humanidad ha transitado en su camino hacia el conocimiento de los efectos solares sobre nuestro planeta. Con este fin intentaré informar y comentar las diferentes opiniones que físicos y astrónomos han tenido sobre el Sol y su influencia en la Tierra, destacando aquellos descubrimientos científicos de relevancia que permitieron modificar su pensamiento. En particular la sección 1.4 desarrolla una visión histórica que pretende motivar y adelantar los temas que luego serán tratados durante el resto del libro con mayor profundidad desde una visión actualizada. En el resto de los capítulos se le otorgará una mayor extensión e importancia al estado actual del conocimiento, en especial a

las novedades que han aportado las sondas científicas lanzadas al espacio por el hombre. También pretendo mencionar algunos aspectos de la participación de la comunidad científica Argentina en este camino.

El carácter divulgativo del volumen aspira a no necesitar conocimientos de ninguna disciplina para su comprensión. Por este motivo ciertos aspectos o nociones elementales de las ciencias físicas, que considero necesarios para concebir con cierta profundidad los temas tratados, serán brevemente explicados dentro de la obra para aquel que los requieran. Sin embargo este libro no pretende ser autocontenido en la gran variedad de los conceptos involucrados en la física solar terrestre, por lo cual se recomienda al lector interesado profundizarlos con libros de física básica.

Tanto las personas que han colaborado en la elaboración de este texto como yo mismo, hemos hecho todo el esfuerzo posible para concluirlo libre de errores. Sin embargo hacerlo es una tarea utópica. Tanto para aquel lector que quisiera manifestarme el hallazgo de errores o el comentario de sugerencias para posteriores ediciones de esta obra, dejo la siguiente dirección de correo electrónico:
info@edcooperativas.com.ar.

Finalmente quisiera expresar un sincero agradecimiento a todos quienes, directa o indirectamente, me han ayudado a darle forma a la idea original del presente libro. Primeramente quiero hacer un agradecimiento especial a Pablo Masondo, quien diseñó y le dio su forma final a una gran cantidad de las figuras que se incluyen en esta obra. También le agradezco especialmente a Cristina Mandrini, a César Moreno y a María Eugenia Ángel por sus consejos, sus sugerencias y por el tiempo que dedicaron a revisar mis primeros manuscritos. Deseo agradecerles también a Daniel Gómez y a Alejandro Lepone por las valiosas charlas que tuvimos, algunas de ellas cuando sólo había simplemente un somero proyecto en mi mente.

El conocimiento que la humanidad tiene sobre el entorno que la rodea ha evolucionado con el fluir del tiempo. Ello ocurrió debido al aporte de muchos granos de saber, brindados por miles de personas. La contribución con que cada una ha colaborado, haciendo uso de su talento con dedicación y trabajo, nos permite hacer hoy sofisticadas descripciones dentro de cada disciplina científica. También nos permite disponer de una gran construcción social forjada a lo largo del tiempo, una Sociedad Científica. Para describir nuestra "realidad científica" nos valemos de elementos que se asemejan a piezas estratégicamente colocadas en un infinito campo de batalla, piezas que esperan al día D, en el cual se producirá el próximo movimiento. El insaciable deseo de iluminar una tormentosa y oscura noche en el inmenso océano de lo desconocido es tan grande, que frecuentemente suele hacerse común un sentimiento de conformidad colectiva cuando un resplandor efímero se produce, durante la presencia del relámpago asociado a un descubrimiento científico.

*El conocimiento es como una esfera en el espacio;
cuando aumenta su volumen también aumenta su
contacto con lo desconocido.*

Blaise Pascal.

1

La Ciencia del Sol y del Entorno Terrestre

Un gas tenue compuesto de partículas eléctricamente cargadas, el viento solar, fluye rápidamente desde el astro rey hasta los límites del sistema solar, mucho más allá de Plutón. En esta frontera finaliza su viaje fundiéndose con el viento interestelar, un gas que navega por el espacio que existe entre las estrellas de la vía láctea, como un río que desemboca en el gran océano galáctico.

Gran parte de la Física Espacial se dedica a estudiar las propiedades del viento solar y su interacción con los cuerpos presentes en el espacio interplanetario: planetas, satélites naturales, cometas, etc. Uno de los objetivos principales de la Física Solar-Terrestre es investigar cómo el viento solar influye sobre la cavidad magnética que rodea al planeta Tierra.

1.1 El Recorrido Histórico del Átomo

Primeramente, para poder comprender mejor aquellos procesos solares que afectan los alrededores de la Tierra, realizaremos un pequeño viaje por una parte importante de la historia de la física, descubriendo conceptos que nos ayudarán a responder cómo es la estructura de la materia que compone el Universo.

La palabra *átomo* tuvo su origen en la antigua Grecia, donde se la utilizaba para referirse a un ente primario e indivisible que componía a toda la materia percibida por el

hombre. Con el paso del tiempo la ciencia mostró la existencia de un ente al que denominó *átomo* pero, a diferencia de los hipotéticos *átomos* de los antiguos griegos, sus propiedades no coincidieron completamente con su etimología ya que hacia principios del siglo XX pudo mostrarse la posibilidad de fraccionar estos *átomos* en otras partículas aún más pequeñas. Los primeros modelos atómicos del siglo XX se han basado en las pistas aportadas por experimentos cuidadosamente elaborados y en las ingeniosas ideas aportadas por tres científicos: J. J. Thomson, E. Rutherford y N. Bohr, entre los años 1898 y 1913. Ellos propusieron respectivamente tres modelos atómicos que hoy pueden identificarse con los inicios de la física atómica.

Sir Joseph John Thomson (1856-1940) fue un físico inglés quien en 1898, basándose en experimentos que sugerían la existencia de partículas livianas con carga eléctrica negativa y partículas pesadas con carga positiva, propuso al átomo como un "budín con ciruelas". Su átomo contenía un núcleo pesado con toda su carga positiva distribuida uniformemente (el budín) ocupando una esfera de un radio aproximado de 10^{-8} cm (la centésima parte de una millonésima de centímetro). El tamaño de este núcleo se aceptaba en esa época como el radio atómico. Las ciruelas del átomo de Thomson eran los electrones negativos que estaban esparcidos sobre la superficie del budín. Thomson pensaba que al calentar un átomo, los electrones comenzaban a vibrar con mayor intensidad alrededor de su posición de equilibrio y en consecuencia, como lo hacen todos los cuerpos cargados cuando se aceleran, emitirían radiación electromagnética. Esta propiedad del átomo de Thomson explicaba cualitativamente el aumento de la radiación emitida cuando se incrementaba la temperatura de un material, cuestión que ya era observada en aquella época. Sin embargo el mo-

delo de Thomson no podía explicar las cantidades observadas de radiación emitida.

El físico británico Lord Ernest Rutherford (1871-1937) descubrió que el núcleo del átomo es mucho más pequeño y que casi la totalidad del volumen ocupado por el átomo es espacio vacío. Este gran descubrimiento fue conseguido como consecuencia de los trabajos que realizó en su laboratorio con sus colaboradores; bombardeando átomos con partículas cargadas y observando la dispersión de estos mini-proyectiles determinó que el núcleo positivo del átomo debía ser mucho más pequeño que el átomo mismo. En 1911 Rutherford propuso una teoría para describir la estructura atómica; en su modelo los electrones livianos orbitan alrededor de un núcleo central esférico muy pequeño y pesado, cuyo radio es aproximadamente 10^{-12} cm. A pesar del éxito relativo del átomo de Rutherford, las predicciones teóricas basadas en leyes de la electricidad y el magnetismo, indicaban que la trayectoria de los electrones no sería estable y éstos deberían perder rápidamente su energía emitiendo radiación electromagnética; deberían caer hacia el núcleo en tiempos muy breves. Los grandes logros obtenidos por Rutherford lo convirtieron en uno de los investigadores más importantes en la historia de la física nuclear.

Niels Bohr (1885-1962) recibió su Ph D en 1911, estudió en la universidad de Cambridge con Thompson y trabajó después con Rutherford; luego, en 1913, presentó su modelo de átomo. Aunque la estructura del átomo de Bohr era muy similar a la de Rutherford, Bohr consideró la flamante Mecánica Cuántica. El átomo de Bohr permitía sólo ciertos valores para los radios de las órbitas de los electrones y como consecuencia reconcilió al átomo con el electromagnetismo; su modelo predice que un átomo debe emitir cierto paquete de energía E en forma de radiación electromagnética y sólo cuando un electrón pierde esta energía E puede

cambiar de una órbita a otra; estas órbitas son las únicas permitidas por las leyes de la Mecánica Cuántica.

El progreso logrado en el conocimiento de la física durante los últimos 100 años ha sido enorme; ha convertido al átomo actual en una partícula mucho más sofisticada que el átomo de Bohr. Dado que su complejidad va mucho más allá de los fines de este texto, será suficiente mantener una descripción simplificada de sus componentes principales: nucleones pesados (protones y neutrones) y electrones livianos. Mientras que los protones poseen una carga eléctrica positiva (+e) y los electrones carga negativa (-e), los neutrones no poseen carga eléctrica. La cantidad de protones y electrones que componen un átomo es la misma y en consecuencia el átomo es eléctricamente neutro. La cantidad de energía contenida en un átomo sólo puede pertenecer a un conjunto discreto de valores; estos valores dependen de la estructura interna del átomo; para cuantificar los estados energéticos del átomo los físicos requieren de la Mecánica Cuántica en una forma similar pero mucho más sofisticada a la que lo hizo Bohr hace casi un siglo.

Si un átomo absorbe un monto de energía superior a cierto umbral, perderá algunos o todos sus electrones; el valor del umbral de energía necesario para arrancar electrones dependerá del tipo de átomo y de su configuración interna. Para caricaturizar este proceso, llamado ionización atómica, podríamos imaginar que una partícula externa se acerca a un átomo de hidrógeno (compuesto por un protón y un electrón) y le entrega una ración de energía, esta energía es aprovechada por uno de los electrones del átomo quien la utiliza para escapar. Así, parte del átomo original se ha convertido en una gran partícula pesada (ión) con carga positiva, y un electrón (con carga negativa) quedará libre en el Universo.

1.2 Cuando el Electrón y el Núcleo se Divorcian (o Plasma, el Cuarto Estado de la Materia)

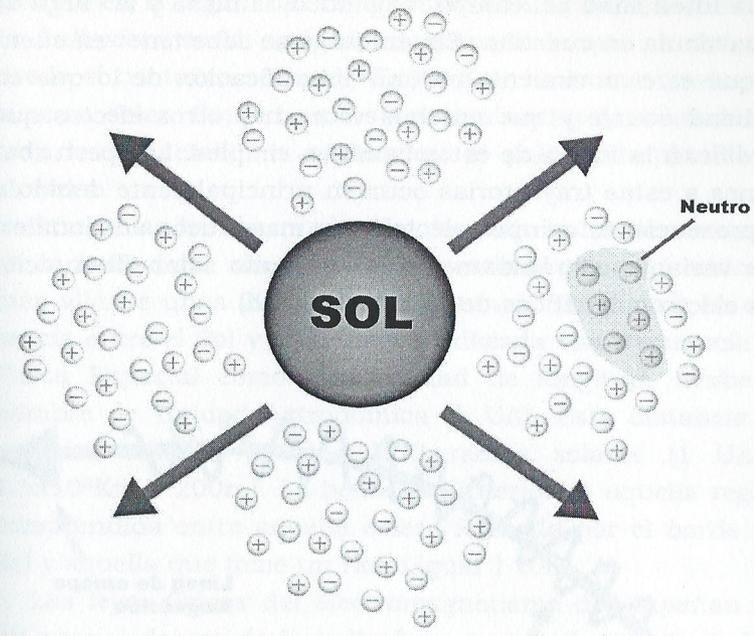
Tres de los cuatro estados de la materia que pueden encontrarse en la naturaleza son sólido, líquido y gaseoso; aunque estos tres estados son los que con mayor frecuencia percibimos en nuestra vida cotidiana, paradójicamente el 99% del Universo conocido se encuentra en el cuarto estado, en estado de plasma. Calentar un sólido lo convierte en líquido, calentar un líquido lo convierte en gas y calentar un gas lo convierte en plasma.

Cuando calentamos un gas compuesto por moléculas, éstas primeramente se disociarán y el gas se convertirá en atómico. Al continuar con el proceso de calentamiento, los átomos recibirán mayor energía y en consecuencia los paquetes de energía intercambiados serán cada vez más energéticos; como consecuencia de estos intercambios se arrancan algunos electrones y se produce una ionización parcial, tenemos un plasma débilmente ionizado. Una vez desprendido de su átomo original, un electrón libre puede ser muy eficiente para ionizar otros átomos vecinos y desprender aún más electrones; dependiendo de las condiciones en que este proceso ocurre podría producirse una avalancha de reacciones atómicas y desencadenarse un gran proceso de ionización en cadena. A muy grandes temperaturas los átomos se encuentran completamente ionizados, todos han sido convertidos en iones cargados positivamente; por supuesto que también están los electrones que compensan la carga iónica positiva y hacen que el gas, visto en grandes volúmenes, sea casi neutro. Dado que los electrones son mucho más livianos que los protones (su masa es mucho menor), las cargas negativas en un plasma pueden movilizarse con mayor soltura que las positivas.

Aunque la mayoría de la materia del Universo está en estado de plasma, en nuestro cotidiano contacto con la naturaleza no lo percibimos y sólo unos pocos eventos habituales involucran plasmas: llamas de fuego, el aire que rodea el lugar donde ocurre un relámpago, tubos fluorescentes, etc. Fuera de nuestro entorno diario podemos encontrarnos con plasma en el interior de las estrellas (por supuesto incluso en nuestro Sol), el espacio existente entre los planetas del sistema solar, los vientos interestelares, el espacio interestelar, las cavidades magnéticas planetarias (inclusive en la de nuestro planeta), etc.

1.3 Un Tenue Soplido desde el Sol

El gas que llena el espacio interplanetario tiene su origen en el Sol y su temperatura es tan alta que sus átomos se mantienen disociados en iones positivos y electrones negativos; se encuentra en estado de plasma. Aunque las partículas que lo componen están cargadas, si se consideran volúmenes que encierran muchas partículas, la cantidad de carga negativa es la misma que la positiva (ver Figura 1) y este plasma es casi neutro. La trayectoria realizada por las partículas que están en este medio está determinada por el campo magnético interplanetario.



Dibujo: Fabio Masondo

Figura 1: Esquema que representa al flujo de partículas cargadas del viento solar. A pesar de que cada partícula está cargada, el plasma es casi neutro si se consideran volúmenes que contengan muchas partículas.

Con el fin de comprender las trayectorias que desarrollan las partículas eléctricamente cargadas cuando están en un medio magnetizado, tratemos de comprender el siguiente *experimento pensado*: Llenemos el espacio con una gran cantidad de brújulas muy diminutas; las curvas que resultan de unir estas brújulas a lo largo de la dirección en la que apuntan sus agujas son las 'líneas de campo magnético'. Una partícula cargada en el viento solar describe un giro circular mientras va viajando a lo largo de una línea de campo magnético (ver Figura 2). Cada giro, llamado giro de ciclotrón, tiene una duración bien determinada que depende

de la intensidad del campo magnético, la masa y la carga de la partícula en cuestión. Sin embargo se debe tener en cuenta que este movimiento es una simplificación de lo que en realidad ocurre y que muchas veces hay otros efectos que modifican la forma de estos caminos simples. Las perturbaciones a estas trayectorias ocurren principalmente debido a la presencia de campos eléctricos y magnéticos adicionales, que varían muy rápidamente en el viento solar (fluctuaciones electromagnéticas de gran intensidad).

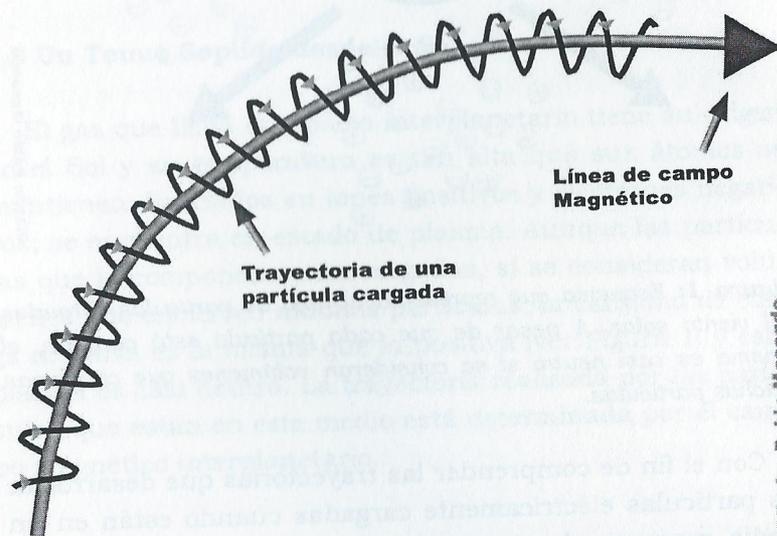


Figura 2: Esquema que representa la trayectoria de una partícula cargada, inmersa en un medio magnetizado. La trayectoria de la partícula es similar a un sacacorchos.

Uno de los principales objetivos de la Física Solar Terrestre es comprender los mecanismos relevantes que ocurren durante la interacción entre el campo electromagnético y el

plasma en la región del espacio llamada 'heliosfera interior'. La heliosfera es la cavidad interplanetaria que se extiende desde el contorno solar ($r_{\odot} = 7 \times 10^5$ Km) hasta los bordes del sistema solar. Contiene a los nueve planetas (y a sus satélites), los cometas, los asteroides, el polvo interplanetario, etcétera.

Aún no se ha observado directamente la frontera externa de la heliosfera, sin embargo se estima que está ubicada más allá de unas 200 veces la distancia Tierra-Sol. La distancia entre el Sol y la Tierra es utilizada con frecuencia en Física Espacial como una unidad de longitud, recibe el nombre de Unidad Astronómica (1 UA). Esta distancia es aproximadamente igual a 200 radios solares ($1 \text{ UA} = 1.5 \times 10^8 \text{ Km} \approx 200 r_{\odot}$). La heliosfera interior es aquella región comprendida entre aquella esfera formada por el borde del Sol y aquella que tiene un radio igual 1 UA.

Las leyes físicas del electromagnetismo desempeñan un rol crucial dentro de la heliosfera, su papel en este ámbito puede ser dividido considerando dos aspectos bien diferenciados. Uno de ellos es directo y probablemente el más conocido, es de largo alcance e involucra la propagación de radiación, parte de la cual es la luz que el Sol le envía a la Tierra. El otro aspecto, no tan conocido, está vinculado con la propagación de materia a través del viento solar e involucra mecanismos locales de corto alcance; estos procesos modifican la evolución del plasma interplanetario en su recorrido desde el Sol hasta la Tierra. El mecanismo local está vinculado con la interacción entre las partículas cargadas y los campos eléctricos y magnéticos presentes en el espacio.

El conocimiento que actualmente se tiene acerca de la Física Solar Terrestre se ha logrado como consecuencia de la acumulación de muchos pequeños aportes, éstos fueron realizados durante el transcurso de más de dos mil años; hubo pequeños y grandes progresos e incluso en ciertas

oportunidades hubo retrocesos. Estos últimos ocurrieron como consecuencia de dogmatizar las opiniones de algunos 'sabios de la época', quienes opinaron en contra de lo que hoy se sabe correcto. Sin embargo los avances más importantes logrados en este campo han ocurrido como consecuencia de las exploraciones científicas extraterrestres diseñadas por el hombre, que se vienen desarrollando desde hace más de 40 años.

Durante los próximos párrafos de este capítulo se describirá, desde una perspectiva histórica, como se fue alcanzando el conocimiento que en el presente se tiene del Sol, del magnetismo terrestre, y de la interacción entre ambos. Se encontrarán algunas ideas necesarias para responder interrogantes como ¿Cuáles han sido los conocimientos que tenía el hombre antes del lanzamiento de la era espacial y cuáles han sido sus aportes?, ¿Porqué se vincula al Sol con las auroras, el invento de la brújula y el magnetismo terrestre?, ¿Qué son el viento solar, el ciclo solar, las eyecciones de masa solar y las manchas solares?, ¿Qué es la magnetosfera y cuándo se descubrió la ionosfera?

1.4 Un poco más de Historia

El conocimiento de las interacciones entre el Sol y la Tierra tuvo dos grandes raíces en la historia. Una raíz es más conocida y está vinculada con la descripción del movimiento de los cuerpos celestes. Los avances logrados en este campo fueron necesarios para el descubrimiento de la ley de la gravedad tal como la conocemos en la actualidad. La otra raíz no es tan conocida y se asocia con el magnetismo.

1.4.1 La Manzana de Newton

El gran físico Isaac Newton (1642-1727) enunció por primera vez la ley de gravedad hacia finales del siglo XVII, aunque su hallazgo se debe principalmente a su gran talento y su dedicación desmedida a la ciencia, el éxito que obtuvo fue también consecuencia de muchos estudios y análisis que habían sido efectuados previamente, algunos de ellos originados hace más de dos mil años.

A principios de nuestra era, en Grecia, Claudio Ptolomeo (100-180 DC) desarrolló una de las primeras descripciones matemáticas del movimiento de los cuerpos celestes. En esta descripción se empleaban complejas combinaciones de movimientos circulares y se postulaba a la Tierra en reposo y en el centro del Universo, acorde al pensamiento de Aristóteles (384-322 AC) quien consideraba una fuerte distinción entre los cuerpos celestiales (estrellas y planetas) y los sublunares. Fue recién Nicolás Copérnico (1473-1543) quien propuso la idea de una Tierra girando, junto a los demás planetas, alrededor del Sol; sin embargo él también describió erróneamente el movimiento planetario con complejas combinaciones de círculos. Tycho de Brahe (1546-1601) observó y registró el movimiento de los planetas comparándolo con el fondo de estrellas y sus observaciones ayudaron a Johannes Kepler (1571-1630) a establecer sus tres leyes del movimiento planetario; estas leyes fueron formuladas por Kepler en Praga en el año 1609 y establecen trayectorias elípticas para los planetas. Galileo Galilei (1564-1642) realizó contribuciones muy importantes al estudio del movimiento, lo que él bautizó como 'cinemática'. Cuando construyó en Italia su primer telescopio, observó y estudió el movimiento de algunos objetos astronómicos, principalmente algunas lunas de Júpiter. Uno de los resultados de este estudio llevó a Galileo a concluir que Copérnico tenía razón, la tierra gira

alrededor del Sol. Sin embargo Galileo no sólo realizaba observaciones astronómicas sino que también estudiaba el movimiento de objetos aquí en la Tierra. Estudió oscilaciones de péndulos, trayectorias de proyectiles, etcétera. Todos estos conocimientos ayudaron a Isaac Newton (1643-1727) a enunciar su célebre ley de la gravedad en el año 1687. Con esta ley se desterró por completo la teoría de Aristóteles, ya que el rango de validez de la ley gravitatoria comprendió tanto a los cuerpos terrestres como a los objetos astronómicos. La fuerza de gravedad ejercida entre dos cuerpos depende sólo de la masa de éstos y de la distancia que los separa.

Cuando Albert Einstein publicó la Teoría General de la Relatividad en el año 1916, introdujo modificaciones a la ley de gravedad clásica enunciada por Newton. En la Teoría General de la Relatividad, la interacción gravitatoria es atribuida a la deformación del espacio-tiempo que se produce por la presencia de masa. Sin embargo cuando aplicamos las leyes de esta nueva teoría de Einstein al movimiento planetario, sólo es necesario modificar la ley de la gravedad de Newton para describir correctamente la órbita que Mercurio realiza alrededor del Sol. Para el resto de los planetas es suficiente con las leyes clásicas pre-relativistas, ya que ambas teorías proveen aproximadamente el mismo resultado.

Es la fuerza de gravedad la responsable de mantener a la Tierra en una órbita elíptica alrededor del Sol. Esta elipse es aproximadamente circular y muy cerca del centro de este círculo se encuentra el Sol. El movimiento de la Tierra girando alrededor del Sol es similar al que desarrolla una piedra que, atada mediante un hilo, gira alrededor de una mano.

1.4.2 Brújula, Magnetismo Terrestre y Tormentas Magnéticas

Los comienzos de la Física Solar Terrestre pueden ser atribuidos a los primeros registros de observaciones de vis-

tosas auroras vistas en el cielo, generalmente cerca de ambos polos terrestres. Frecuentemente en los cielos polares lucen auroras difusas como anillos coronando los polos, sin embargo las auroras más brillantes tienen forma de arco. Los primeros registros de estos fenómenos se remontan a varios miles de años. Algunas visiones de auroras se encuentran registradas en la literatura griega del siglo VI antes de Cristo, en pasajes del Viejo Testamento y en la literatura China de hace unos cuatro mil años.

Otro evento que merece ser destacado en el desarrollo de esta disciplina es la invención del primer instrumento para medir la dirección del campo magnético, la brújula. Los primeros vestigios de este descubrimiento radican en la cultura China alrededor del siglo XI de nuestra era. Como consecuencia del descubrimiento de la brújula pudo establecerse la existencia del campo magnético terrestre (o campo geomagnético); la principal utilidad de este instrumento ha sido medir la dirección del campo geomagnético con el fin de encontrar direcciones geográficas durante la navegación.

El físico y filósofo inglés William Gilbert señaló la similitud que existe entre la configuración magnética en la superficie terrestre con la de un gran imán. En uno de los seis libros que formaron parte de su famoso tratado 'De Magnete', publicado en el año 1600, indica que el globo terrestre es un gran imán. Gilbert creía que el eje de este gran imán estaba 'congelado' a la Tierra. Fue recién en 1653 cuando un profesor de astronomía, Henry Gellibrand, descubrió que la dirección del eje asociada al imán geomagnético no está fija y cambia con el tiempo; hoy se conoce que la dirección de este eje cambia significativamente durante un tiempo típico de diez mil años.

Un famoso constructor de brújulas fue el inglés George Graham, quien en 1722 comenzó a medir y a investigar el magnetismo terrestre. Su sucesor Hiorter, en el año 1741,

pudo mostrar la existencia de una asociación entre ciertas propiedades de las auroras (por ejemplo frecuencia de aparición e intensidad luminosa) y el geomagnetismo. Este resultado estaba basado en datos observados y asociaba dos hechos que hasta ese momento podrían haberse considerado completamente independientes el uno del otro.

La existencia de campo magnético en los alrededores del lugar donde circula una corriente eléctrica fue mostrada por el danés H.C. Oersted (1777-1851) en 1819. Continuando con la tarea iniciada por Oersted, en el año 1821 el físico británico Michael Faraday (1791-1867) trazó por primera vez el campo magnético alrededor de un conductor por el que circula corriente; este brillante científico propuso un método para visualizar las 'líneas de campo magnético': Imaginemos muchas brújulas pequeñas inmersas en un medio magnetizado y dibujemos, al menos en nuestra imaginación, una línea que siga la dirección de las brújulas. Las líneas que resultan de este procedimiento constructivo fueron llamadas por Faraday 'líneas de fuerza', aunque hoy se conocen con el nombre de 'líneas de campo magnético'. Si se imagina al entorno terrestre poblado de brújulas, las líneas del campo geomagnético podrían ser descubiertas observando la dirección de cada una de ellas. La Figura 3 muestra una configuración magnética del entorno terrestre como la que creía Gilbert, es decir como la que se forma en el entorno de un imán. A esta configuración magnética se la conoce con el nombre de configuración 'dipolar'.

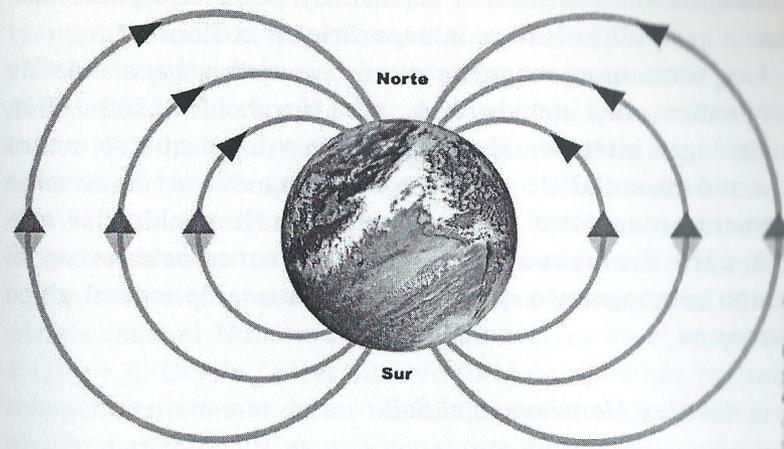


Figura 3: Esquema de las líneas de campo magnético en el entorno terrestre como las creía Gilbert. Actualmente se sabe que la configuración real no es simétrica sino que es más alargada hacia la región nocturna.

El siguiente gran paso hacia el conocimiento de las propiedades del magnetismo en la Tierra se dio en los comienzos del siglo XIX cuando se montó una gran red para efectuar mediciones simultáneas de la actividad geomagnética en diversos puntos del globo terrestre. Carl Friedrich Gauss (1777-1855) realizó una de las principales contribuciones al análisis y a la interpretación de estos resultados. Gauss mostró que la fuente principal del campo geomagnético era de origen interno, debido a corrientes eléctricas que fluyen en el núcleo terrestre, mientras que algunas variaciones podían atribuirse a un flujo de partículas cargadas (corriente eléctrica) que ocurría a cierta altura por encima de la superficie terrestre. Estos resultados permitieron discriminar la localización de las corrientes eléctricas que originan el

geomagnetismo: el interior terrestre y parte el espacio ubicado a gran altitud sobre la superficie de la Tierra.

Las tormentas magnéticas se conocieron hace más de doscientos años debido a A. von Humboldt (1769-1859), quien logró interesar al zar de Rusia y logró que se creara una red mundial de observatorios magnéticos. El término 'tormenta magnética' fue inventado por Humboldt y se empleó para denominar a las grandes perturbaciones en el campo geomagnético que ocurrían a través de todo el globo terráqueo.

1.4.3 Hay Manchas en el Sol!

Sobre la superficie solar han sido observadas manchas oscuras desde hace más de dos mil años, sin embargo sus propiedades fueron estudiadas recién después que Galileo Galilei inventara el telescopio en 1609. Estas manchas son regiones oscuras en el Sol y sólo las de mayor tamaño pueden observarse sin necesidad de telescopio.

Muchas propiedades de las manchas solares fueron caracterizadas por Heinrich Schwabe entre los años 1825 y 1850. Un comportamiento especial en la aparición de estas manchas fue mencionado por primera vez por H. Schwabe en el año 1843, cuando publicó un artículo informando la cantidad de manchas solares que él mismo observara desde 1826 hasta 1843, y remarcando un aparente comportamiento periódico con un período de unos 10 años.

Durante el comienzo de un nuevo ciclo, sobre la superficie solar van apareciendo manchas; a través de los años se incrementa su tamaño y su cantidad, éstas luego se achican y su cantidad disminuye, finalmente desaparecen por completo.

Considerando el resultado de Schwabe, R. Wolf decidió extender el período de tiempo en el cual se estudió el número de manchas. La reconstrucción histórica del número de

manchas que realizó Wolf fue perdiendo calidad y resolución temporal a medida que retrocedía en el tiempo; para el año 1749 sólo pudo disponer de un pobre y aproximado promedio mensual. La recopilación de los datos que realizó Wolf hasta 1749 ha confirmado la existencia del ciclo en el número de manchas, denominado ciclo solar. El otro gran mérito de Wolf ha sido organizar desde el año 1848, un registro sistemático de estas manchas mediante un esquema estándar.

En este esquema estándar se estima la magnitud R , conocida como el 'Número de Manchas Solares Wolf', como $R = k(10g + f)$. Donde f es el número total de manchas (tomada independientemente de su tamaño), g es el número de grupos de manchas, y k es una constante de normalización que tiene en cuenta la compatibilización entre los diferentes observadores.

1.4.4 La Conexión Sol-Tierra

Una asociación entre el ciclo solar y ciertas variaciones en el campo magnético terrestre fue observada por Edward Sabine a mediados del siglo XIX. Sabine se dedicaba a supervisar mediciones geomagnéticas y pudo mostrar en 1851 que la intensidad y la frecuencia con que ocurrían ciertas fluctuaciones del campo geomagnético variaban acorde al período solar. Un evento peculiar ocurrió el primer día del mes de septiembre del año 1859, una gran erupción de luz blanca brotó desde el Sol y dieciocho horas después, en la Tierra se desató una de las perturbaciones geomagnéticas más violentas. La hipótesis de la existencia de una asociación entre la actividad solar y la actividad geomagnética tenía su primer acontecimiento a su favor.

Con el objeto de explicar posibles mecanismos por los cuales el Sol podría tener influencias sobre el entorno terrestre, Becquerel en el año 1878 y poco después Goldstein

propusieron que el Sol disparaba partículas hacia la Tierra y que éstas se desviaban hacia aquellas zonas en las que se observan auroras, influenciadas por el campo magnético terrestre. El físico noruego Kristian Birkeland en principios de 1886, consideró la posibilidad de que el Sol dispare chorros de electrones y que éstos pudieran alcanzar la Tierra con suficiente abundancia para perturbar las condiciones geomagnéticas. Él efectuó varias expediciones al norte de Noruega desde 1897 y obtuvo mediciones que vinculaban las perturbaciones geomagnéticas con las auroras. Complementó su estudio realizando un experimento propio al que llamó 'terrela'. Éste consistía en una simulación del campo magnético dipolar¹ terrestre, sobre el que se efectuaban descargas de electrones con gran cantidad de energía. Durante estos experimentos se observó que los electrones que incidían sobre 'terrela' provocaban intensas luminosidades en aquellas zonas asociadas con las auroras; Birkeland sugería que las partículas que producían las auroras provenían del Sol. Complementando este descubrimiento experimental, un matemático noruego llamado Carl Størmer realizó cálculos acerca de las trayectorias que describen las partículas cargadas en un campo dipolar magnético. La conjunción de los resultados experimentales y teóricos sustentaban la hipótesis de Birkeland. A pesar de estos resultados exitosos, dos miembros destacados del ambiente científico de aquella época, Lord Kelvin y Schuster, se mostraron opuestos a aceptar que las alteraciones magnéticas en la Tierra tuvieran algún origen solar.

¹ El campo magnético dipolar es similar al generado por una barra imantada.

1.4.5 Una Capa Atmosférica con Propiedades Especiales. La Ionosfera

Por otro lado, un importante progreso en el conocimiento de las diferentes capas gaseosas que envuelven la Tierra lo efectuaron Kennelly y Heaviside en el año 1902. Ellos postularon independientemente la existencia de una región en la atmósfera terrestre con conductividad eléctrica muy alta para explicar el éxito que había logrado G. Marconi cuando pudo transmitir señales de radio a través del Océano Atlántico. La conductividad es una magnitud que mide cuánta corriente eléctrica se generará ante un determinado campo eléctrico. A esta capa atmosférica se la denominó posteriormente 'ionosfera', su nombre se debe a que al confirmar su existencia pudo determinarse que está compuesta por un gas de iones y electrones.

La considerable conductividad eléctrica en la ionosfera es una propiedad de los plasmas denominados 'no colisionales', gases ionizados en los cuales casi no ocurren colisiones o choques entre partículas; la gran conductividad eléctrica se debe principalmente a la libertad de movimiento que tienen los iones y electrones como consecuencia de la baja probabilidad de choque.

Los plasmas no colisionales (plasmas tenues) están presentes en muchos escenarios físicos de gran importancia como por ejemplo las inmediaciones de la Tierra, el espacio interplanetario y el espacio interestelar. Considerando algunas simplificaciones es posible comprender el motivo principal de su gran conductividad; un ion en reposo (cargado positivamente con carga Q) responderá ante la presencia de un campo eléctrico \underline{E} , moviéndose en la misma dirección y en el mismo sentido que el vector del campo, acorde a la ley que determina la fuerza eléctrica \underline{F} sobre una partícula cargada ($\underline{F} = Q \underline{E}$). Sin embargo, debido a esta misma ley, un

electrón que se encuentre en reposo (partícula con carga negativa $-Q$) se desplazará en sentido opuesto. Dado que la corriente eléctrica es la suma, para todas las partículas del plasma, de la velocidad multiplicada por la carga, el efecto producido por ambos tipos de partículas se añadirá generándose dicha corriente.

El choque entre partículas podría ser un motivo para disminuir la velocidad promedio y en consecuencia obtener una menor conductividad; sin embargo y dado que la densidad de partículas en este medio es tan baja, lo que implica que hay muy poca probabilidad de que una partícula se encuentre con otra y choque, tanto iones como electrones se desplazarán con muy baja resistencia (debida a que la colisión será despreciable); para un determinado campo eléctrico E , la velocidad de las partículas será muy elevada, el valor de la corriente también y en consecuencia este plasma tendrá una gran conductividad eléctrica.

Un fenómeno vinculado con las propiedades ionosféricas, que tardó casi medio siglo en ser satisfactoriamente descrito, son los 'silbidos'². Sus primeros reportes se remiten al año 1894, cuando en una comunicación telefónica en Austria fueron oídas cortas señales de interferencia que sonaban como silbidos. Recién en el año 1935 este fenómeno fue descrito correctamente por Eckersley, quien explicó que la característica disminución en el sonido debida a los 'silbidos' es producida por la dispersión de un paquete de ondas electromagnéticas viajando a través de la ionosfera.

1.4.6 Un Viento Interplanetario en el Sistema Solar

Las ideas que Goldstein había propuesto en los fines del siglo XIX, respecto a la existencia de una corriente de partí-

culas monocargadas que partían desde el Sol y que provocaba las perturbaciones geomagnéticas observadas, fueron reavivadas en Inglaterra en el año 1930 por Sydney Chapman y Vincent Ferraro; Lindemann sugirió más tarde que la repulsión electrostática haría inestable a este flujo monocargado, destruyéndolo. Sugirió la existencia de un flujo formado por dos tipos de partículas cargadas; cada grupo con carga de signo opuesto al otro, un flujo de plasma. De esta forma revivió la idea tan criticada por Kelvin y Schuster.

La posible existencia de un flujo proveniente del Sol había sido motivada también desde las primeras observaciones de los cometas; se pensaba que sus largas colas eran provocadas por dicho flujo. Sin embargo recién en el año 1951 Biermann interpretó correctamente su forma tan alargada y su dirección (la que se aparta de la dirección radial solar), en términos de la interacción entre la cola del cometa y un viento solar. Este resultado aportaba argumentos contundentes a favor de la existencia de una corriente de partículas emitida por el Sol.



Figura 4: Fotografía de un cometa mostrando la dirección de su cola.

Las conjeturas que se efectuaban acerca de la existencia o no del viento solar y de sus propiedades comenzaron a

² En inglés 'whistlers'.

confirmarse luego del comienzo de la 'Era Espacial'. La humanidad se proyectó al espacio exterior el 4 de octubre de 1957 con el lanzamiento de la sonda espacial Sputnik (que en ruso significa 'satélite') por parte de la ex Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). Este año fue bautizado como el 'Año Geofísico Internacional' por los Estados Unidos de Norteamérica y la URSS, cuando anunciaban el lanzamiento de sondas artificiales no tripuladas al espacio exterior. Sin embargo la primer sonda norteamericana, Vanguard, se incendió durante su lanzamiento en diciembre de ese año. Recién en principios del año 1958 este país tuvo su revancha, con el éxito obtenido en el lanzamiento del Explorer 1. A partir de estos primeros lanzamientos comenzó una carrera científica y tecnológica con el fin de mejorar los diseños de estas naves espaciales. Diferentes organismos de mucho países continúan esta carrera, lanzando nuevas sondas al espacio. Todo esto permitió que el 20 de julio de 1969 los primeros humanos pusieran sus pies sobre la Luna, cuando alunizó el célebre Apollo 11.

Las propiedades de un posible viento solar, consistentes con las leyes básicas de la Física, fueron revisadas críticamente por Parker en 1958. Él propuso que el Sol expulsa gas ionizado a un ritmo constante hacia el espacio interplanetario y su aporte principal fue deducir sus propiedades físicas.

Parker propuso un modelo para describir el balance existente entre la gravedad solar y el gas de partículas ionizadas presente en la heliosfera. Hasta ese momento se pensaba en un plasma en equilibrio estático, sin flujo neto de partículas; según las propiedades del gas interplanetario pre-Parker, su densidad de partículas (cantidad de partículas presentes por unidad de volumen) y su presión disminuyen con la distancia al Sol. Parker modificó esta visión estática, agregando la posibilidad de un flujo estacionario de masa con una sime-

tría esférica; el gas parte desde la base del Sol y fluye hacia el espacio interplanetario. Una conclusión que se obtiene de este modelo es que la velocidad del viento solar crecerá suavemente a medida que el gas avanza, la velocidad es proporcional al logaritmo de la distancia al Sol.

Parker también revisó la geometría del viento solar. Tuvo en cuenta que el Sol rota sobre sí mismo aproximadamente una vez cada 27 días y anticipó que las líneas del campo magnético interplanetario deben tener una configuración geométrica en forma de espiral, como también lo hace la traza que dejan las diferentes partículas al abandonar el Sol³ (ver Figura 5).

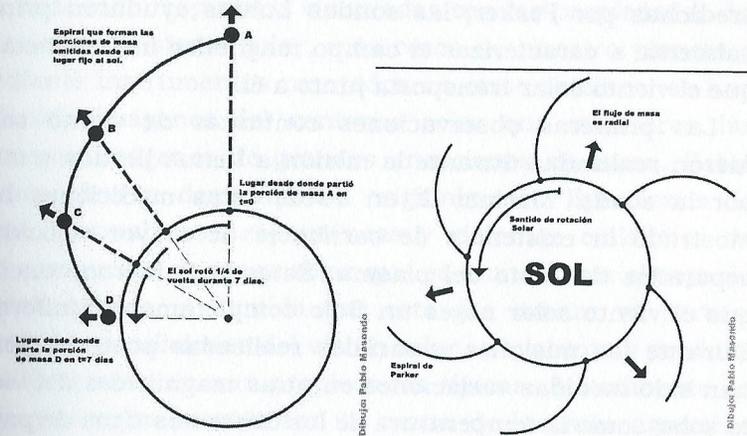


Figura 5: Aunque el flujo de masa es radial, las líneas del campo magnético interplanetario forman una espiral debido a dos efectos: la rotación solar y el congelamiento del campo magnético con la materia.

³ Este fenómeno a menudo es llamado manguera de jardín. La traza del flujo observado en un sistema fijo tiene forma de espiral, este hecho es similar al que ocurre durante el regado con un dispositivo giratorio conectado a una manguera.

A una unidad astronómica del Sol, la recta tangente a esta espiral debe formar un ángulo aproximado de 45° respecto de la línea Sol-Tierra.

La existencia del viento solar fue establecida definitivamente cuando en 1959 los sensores montados en las sondas soviéticas Luniks 2 y 3 midieron 'in situ' sus principales propiedades en las inmediaciones terrestres. Estas mediciones confirmaron en forma contundente la existencia de un viento de partículas cargadas que es expulsado desde el Sol; con los datos obtenidos se puso luz a las especulaciones que se habían realizado acerca de las características de este viento, confirmando las propiedades del flujo de partículas predichas por Parker; las sondas Luniks ayudaron principalmente a caracterizar el campo magnético interplanetario que el viento solar transporta junto a él.

Las primeras observaciones continuas de viento solar fueron realizadas durante la misión a Venus llevada a cabo por la sonda 'Mariner 2' en 1962; estas mediciones han mostrado la existencia de corrientes de mayor velocidad, separadas del resto del plasma. Éstas permitieron concluir que el viento solar no es un flujo completamente uniforme. Durante las misiones espaciales realizadas posteriormente han sido medidas variaciones en otras magnitudes del viento solar como la temperatura de los diferentes tipos de partículas, la abundancia de iones de Oxígeno, Silicio y Helio, etcétera. A pesar de la presencia de algunas perturbaciones, el campo magnético medio que subyace respeta la configuración de Parker.

En una reciente investigación realizada por L. Burlaga, cuyos resultados fueron publicados en el año 1998, se concluyó que la configuración magnética en el espacio interplanetario es consistente con la espiral de Parker al menos hasta distancias similares a 66 UA desde el Sol y latitudes heliográficas desde -5 hasta 33 grados. Esta investigación

fue sostenida con datos provenientes de uno de los satélites interplanetarios más lejanos a la Tierra, el Voyager 1, durante el período 1978-1996. Las cuatro sondas Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1 y Voyager 2 son los objetos diseñados por el hombre que se encuentran más lejos de la Tierra, estas naves espaciales han viajado durante muchos años y tres de ellas ahora estarían próximas a encontrarse con el límite del sistema solar.

1.4.7 La Emisión de Projectiles Solares

Mientras aquellas lejanas sondas se alejan más y más del Sol buscando respuestas vinculadas con las propiedades del exterior del sistema solar, más cerca de nuestro planeta y mediante instrumentos montados en otros satélites, se han obtenido imágenes del contorno solar que mostraron las primeras imágenes de grandes erupciones de masa. Estos eventos fueron denominados originalmente 'Eyecciones de Masa Coronal'; son espontáneas y violentas emisiones de gas compuesto de masa solar que se emite hacia el espacio interplanetario. A medida que este gas avanza va perturbando las condiciones del viento solar subyacente y produce modificaciones en sus propiedades típicas. Actualmente se cree que estos eventos son la causa de las más agresivas perturbaciones magnéticas al entorno terrestre.

1.4.8 Un Proceso Durante la Interacción Sol-Tierra Llamado "Reconexión Magnética"

Aunque la influencia solar sobre las condiciones magnéticas terrestres ha sido conjeturada e incluso observada desde hace más de 150 años, no se conocía la razón de tal asociación. Este vínculo recién obtuvo gran consenso por la comunidad científica internacional cuando se logró susten-

tarlo mediante un mecanismo físico, el cual fue descubierto por Dungey en 1961. Él explicó un mecanismo que permite un ingreso muy significativo de energía y de partículas eléctricamente cargadas, acarreadas por el viento solar en su viaje a través del espacio interplanetario, a la magnetosfera⁴ terrestre.

El mecanismo indica que la actividad geomagnética está asociada con la componente Norte-Sur (componente paralela al eje magnético terrestre) del campo magnético interplanetario; la gran cantidad de datos que se obtuvieron con las sondas Explorer 33 y 35, permitieron que científicos como Roger Arnoldy y Joan Hirshberg pudieran estudiar y comprender mejor este mecanismo.

El fundamento del proceso físico principal por el cual se permite el ingreso de partículas energéticas al sistema magnetosférico es conocido con el nombre de 'Reconexión magnética' y es un proceso que no solo ocurre durante la interacción viento solar-magnetosfera, sino que ocurre en una gran cantidad de escenarios naturales como por ejemplo en la superficie solar.

1.4.9 Un Cinturón de Radiación Cercano a Nuestro Planeta

La magnetosfera terrestre comprende diferentes regiones espaciales. Una de estas regiones se conoce como 'cinturón de radiación' y fue descubierto en 1958 por la primera sonda enviada al espacio por los Estados Unidos de Norteamérica, la sonda Explorer 1. Este satélite fue construido por un equipo de científicos liderado por J. Van Allen y llevaba sólo un detector de partículas energéticas; cuando la sonda alcanzó alturas de más de dos radios terrestres, el instrumen-

⁴ La magnetosfera es la configuración magnética en el entorno de un planeta.

to dejó de funcionar como consecuencia de los altos niveles de radiación recibidos. La zona más baja del cinturón de radiación se halla a una altura de un radio terrestre respecto a la superficie de la Tierra. Los electrones presentes en esta región pueden descender e interactuar con otras partículas, produciendo la emisión luminosa que puede observarse en las auroras.

2

El Astro Rey

En los próximos párrafos se describirán las capas que componen el Sol, así como también algunos mecanismos básicos que permiten comprender su funcionamiento.

El Sol tiene unos cinco mil millones de años de edad y es la estrella más cercana a la Tierra, la estrella que sigue en distancia es *Alfa Centauri C* (también llamada *Próxima Centauri*); ésta dista unos 4,3 años luz⁵ del sistema solar. El Sol está activo y es una fuente de energía esencial para la vida terrestre, las modificaciones que ocurren en la actividad solar afectan al desarrollo de la actividad natural y artificial en la Tierra.

Comprender los procesos involucrados en el Sol no sólo tiene un valor intrínseco al conocimiento solar sino que tiene el valor agregado de ayudarnos a entender el funcionamiento del resto de las estrellas.

La cantidad de masa que actualmente tiene el Sol es ligeramente más grande que la de trescientas mil masas terrestres. Su vida media es de unos cinco mil millones de años, por lo cual en este momento está en la mitad de su ciclo vital. El radio del disco solar es aproximadamente cien veces el radio terrestre. La distancia entre el Sol y la Tierra es de una Unidad Astronómica ($1 \text{ UA} = 1.5 \times 10^{11} \text{ m}$); esto significa que un rayo de luz que se emita en su superficie tardará aproximadamente 8 minutos en llegar a nuestro planeta. Dado que en nuestro universo la velocidad de la luz es la máxima velocidad admisible para el transporte de informa-

⁵ Un año luz es la distancia que la luz (viajando a través del vacío) recorre durante un año. Esta distancia es sesenta y dos mil veces la distancia que separa la Tierra del Sol.

ción y energía, cualquier evento que suceda en el Sol recién podrá ser percibido en la Tierra después de este lapso de tiempo. Mediante la atracción gravitatoria, nuestra estrella madre mantiene ligados a los nueve planetas del sistema solar (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón).

2.1 Sol y Fusión Nuclear

Desde una perspectiva funcional, la comprensión de muchos mecanismos en el Sol tiene un beneficio adicional vinculado con la futura producción de energía mediante el proceso de fusión controlada, esta nueva fuente de energía artificial será de gran utilidad para la humanidad. Los avances que se obtienen en Física Solar ayudan en el camino a recorrer hacia la fusión nuclear controlada en forma energéticamente efectiva, ya que las mismas leyes físicas regulan ambos escenarios.

Actualmente hay una intensa actividad en las investigaciones que se llevan a cabo para optimizar los procesos involucrados en la producción de energía por fusión. A largo plazo esta fuente de energía será potencialmente más segura, limpia y económica que muchos procesos que se utilizan actualmente para producir energía eléctrica. Existen predicciones optimistas las cuales estiman que la tecnología de fusión podría ser aplicable a la producción comercial de energía eléctrica recién alrededor del año 2040.

Disponer de fuentes de energía alternativa es de suma importancia en vista del crecimiento demográfico del planeta y en el del consumo de electricidad por habitante. Uno de los beneficios de la tecnología de fusión sería disponer de una cantidad casi ilimitada de combustible, ya que los combustibles necesarios para llevar a cabo muchos procesos de

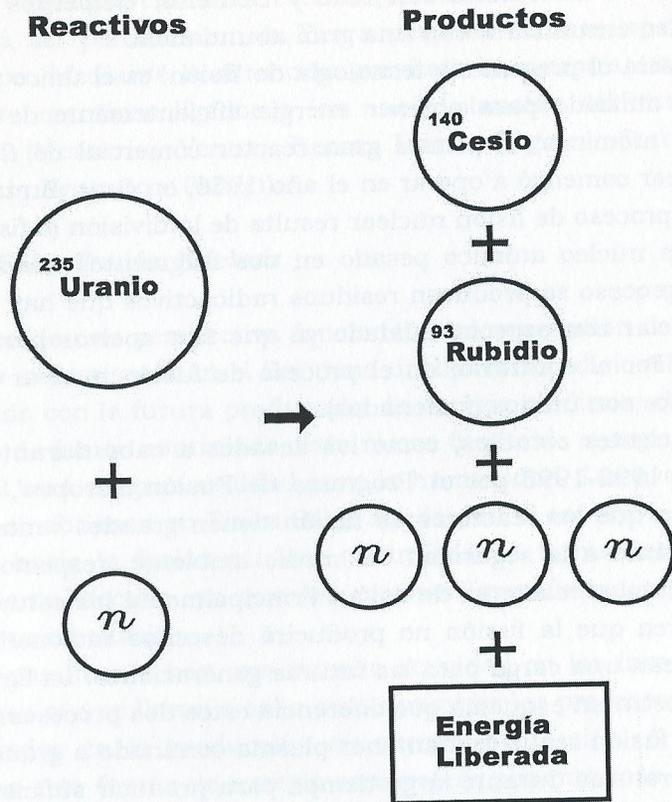
fusión en laboratorio son Litio y Deuterio, elementos que pueden encontrarse con una gran abundancia.

Hasta el presente la tecnología de 'fisión' es el único proceso utilizado para obtener energía eficientemente de núcleos atómicos; el primer gran reactor comercial de fisión nuclear comenzó a operar en el año 1956, en Gran Bretaña. Este proceso de fisión nuclear resulta de la división (o fisión) de un núcleo atómico pesado en dos fragmentos, durante este proceso se producen residuos radioactivos que hay que controlar con especial cuidado ya que son nocivos para la vida. Por el contrario, en el proceso de fusión nuclear dos núcleos son unidos (fusionados).

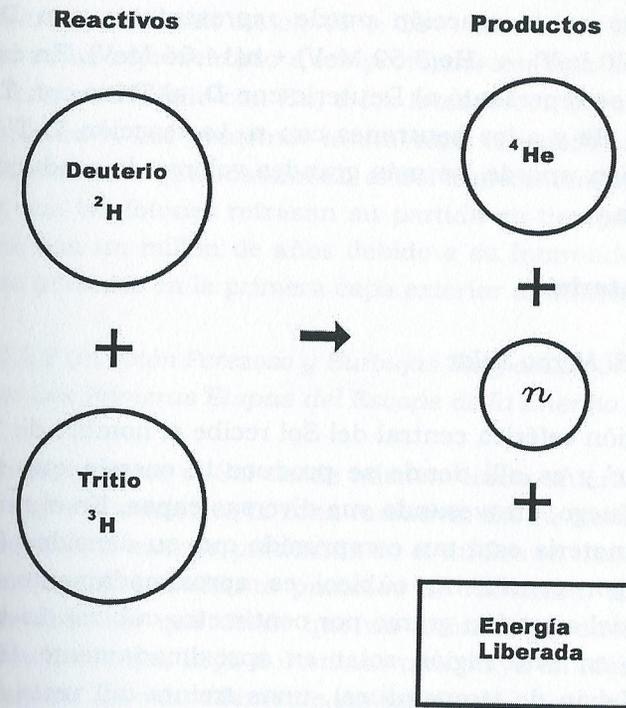
Recientes estudios, como los llevados a cabo durante el lapso 1992-1995 por el 'Programa de Fusión Europeo', advierten que los reactores de fusión tienen grandes ventajas en cuanto a la seguridad del medio ambiente, respecto de los actuales reactores de fisión. Principalmente los estudios sugieren que la fusión no producirá desechos radioactivos que sean una carga para las futuras generaciones. La figura 6 muestra un esquema que diferencia estos dos procesos.

La fusión requiere mantener plasma confinado a grandes temperaturas durante largo tiempo para producir suficiente energía. Dos grandes preguntas que actualmente se intentan responder con gran interés son ¿Cómo se logrará mantener encerrado (confinado) al Plasma? y ¿cómo se lo calentará?

Los diferentes mecanismos que actualmente se investigan para lograr un confinamiento eficiente se basan en la fuerza de gravedad (confinamiento gravitatorio), la inercia (confinamiento inercial) y el magnetismo (confinamiento magnético).



Dibujo: Pablo Masondo



Dibujo: Pablo Masondo

Figura 6: Representación simplificada que pone de manifiesto las diferencias entre los procesos de fisión (figura de arriba) y fusión (figura de abajo) nuclear.

Para calentar el Plasma a las grandes temperaturas que se necesitan para la fusión, se investigan diversos tratamientos; cada tratamiento depende del proceso efectuado para lograr el confinamiento.

En las condiciones de temperaturas alcanzadas durante los ensayos de fusión realizados en el presente, la tasa de la reacción de fusión 'D-T' (Deuterio - Tritio) es una de las más altas. Esta reacción puede representarse con la fórmula **D** +

$T \rightarrow 4He + n$. Considerando la energía de las partículas involucradas en la reacción puede representarse con $D(20 \text{ keV}) + T(20 \text{ keV}) \rightarrow 4He(3.52 \text{ MeV}) + n(14.06 \text{ MeV})$. En estas fórmulas se representó al Deuterio con **D**, al Tritio con **T**, al Helio con **He** y a los neutrones con **n**. La reacción 'D-T' posee también uno de los más grandes valores de producción de energía.

2.2 Su Interior

2.2.1 El Horno Solar

La región esférica central del Sol recibe el nombre de 'núcleo solar' y es allí donde se produce la energía que será liberada luego, atravesando sus diversas capas. En el centro solar la materia está tan comprimida que su densidad (150 gramos por centímetro cúbico) es aproximadamente 150 veces la del agua (un gramo por centímetro cúbico). La temperatura en esta región solar es aproximadamente 10^7 K (escala Kelvin de temperatura), unas treinta mil veces más alta que la de un día de verano en Buenos Aires ($\sim 303 \text{ K} \cong 30 \text{ °C}$). En la escala de temperatura Kelvin el punto de fusión del hielo a presión atmosférica es de $273,1 \text{ K} (= 0 \text{ °C})$; esta escala es la más utilizada en Física debido principalmente a que las leyes de la termodinámica no permiten que se alcancen temperaturas menores que el cero ($0 \text{ K} = -273,1 \text{ °C}$).

La forma en la que el Sol produce su energía es mediante fusión nuclear. Núcleos de hidrógeno son transformados en núcleos de helio con una contribución adicional de neutrinos (partículas que interactúan muy poco con la materia ordinaria) y con un exceso de energía que se libera en forma de fotones.

La principal cadena de reacción de fusión en el núcleo solar, como así también en la mayoría de las estrellas livianas,

puede representarse con la fórmula reducida (fórmula que resume el resultado neto), $6P + 2e^- \rightarrow 2v + 6\gamma + 2P + 4He$. Aquí se ha representado a los protones con **P**, a los electrones con **e⁻**, al Helio con **He**, a los fotones con γ y a los neutrinos con **v**. Los neutrinos interactúan tan poco con la materia ordinaria que abandonan al Sol inmediatamente, mientras que los fotones retrasan su partida en tiempos que escalan con un millón de años debido a su interacción con la masa presente en la primera capa exterior al núcleo.

2.2.2 Un Fotón Perezoso y Burbujas Surgiendo por Flotación (o Las Primeras Etapas del Escape de la Energía Solar)

Si recorremos el Sol desde adentro hacia afuera, la capa que sigue al núcleo es la zona radiativa. En su camino hacia el exterior, la energía producida en el núcleo es transportada en esta región mediante procesos de radiación. Es interesante observar que desde que un fotón es producido en el núcleo hasta que llega a iluminar una playa en Mar del Plata tardará aproximadamente un millón de años. A pesar de que un fotón viaja a la velocidad de la luz, sufre un gran retraso al atravesar esta capa radiativa debido a la gran densidad de masa. Cada fotón realiza muchos rebotes⁶ con las partículas subyacentes debido a la presencia de materia muy comprimida (ver Figura 7).

La zona convectiva es una región en la cual por efecto de acumulación de calor, porciones de material magnetizado comienzan a elevarse hacia el exterior solar, debido al fenómeno de flotación.

⁶ Lo que se quiere representar con un "rebote" es un proceso por el cual un fotón es absorbido y reemitido.

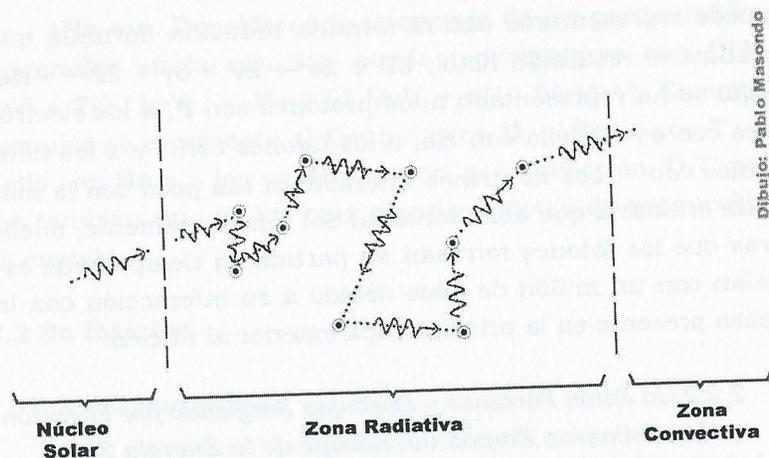


Figura 7: Esquema que muestra una simplificación de los procesos de colisión efectuados por los fotones en la región radiativa.

Un proceso similar a la flotación en el Sol ocurre sin el aporte del magnetismo en ciertas capas de aire en la atmósfera terrestre. El aire de las capas más bajas se calienta y al disminuir su densidad, sube o 'flota' como cuando se libera un corcho desde el fondo de un recipiente con agua.

Porciones magnetizadas de masa solar van transportando calor hacia la superficie durante su ascenso, siendo muy efectivo este transporte de energía. A medida que las 'burbujas' magnéticas van subiendo se expanden y se enfrían, surgiendo en la superficie solar y formando gránulos y supergránulos visibles.

2.2.3 Las Tres Capas más Externas: Fotosfera, Cromosfera y Corona (o La Atmósfera Solar)

La fotosfera es la capa cuyo contorno externo puede observarse desde la Tierra y que se distingue habitualmente

como el borde (o limbo) solar. Desde esta región se emite la mayor cantidad de luz que proviene del Sol.

La temperatura de la próxima capa (la cromosfera) es adecuada para la emisión de luz rojiza con cierta longitud de onda (λ) bien caracterizada.

Cuando cualquier molécula se somete a una determinada temperatura emite radiación electromagnética en varias longitudes de onda (λ) debido a la vibración térmica de las mismas; la intensidad emitida en cada longitud de onda depende del valor de λ . Un espectro de emisión informa cual es la intensidad radiada para cada valor de λ . Por el contrario, se denomina línea espectral de la molécula en cuestión a un determinado valor de λ en el que hay emisión muy significativa de fotones debido a decaimientos energéticos (explicados por la mecánica cuántica) de la misma. La emisión principal de fotones producida desde la cromosfera corresponde a una línea espectral del Hidrógeno conocida como H_{α} . Actualmente hay varios instrumentos que poseen filtros sensibles solo a esta clase de luz que nos permiten observar detalles característicos de esta región.

La región de transición se encuentra entre la cromosfera y la corona solar. Esta capa es muy delgada y su temperatura aumenta abruptamente, casi 100 veces, al desplazarse hacia el exterior solar. Los testigos que nos ayudan a observar las propiedades de la región de transición son algunos iones (carbono, oxígeno, y silicio) que emiten radiación ultravioleta; esta radiación sólo es observable desde afuera de la Tierra ya que es absorbida en la atmósfera terrestre. Se han desarrollado varios proyectos vinculados con sondas espaciales para poder realizar mediciones en esta longitud de onda; en estas misiones se montaron dispositivos ópticos en los satélites artificiales que fueron lanzados al espacio. Con las imágenes obtenidas se ha podido observar indirectamente a estas regiones.

La corona solar es la región más externa del Sol. Una de sus características más subrayable es su gran temperatura (mayor que un millón de grados Kelvin). Desde esta capa se emite principalmente radiación electromagnética en la región del ultravioleta lejano y en la región de rayos X. La corona no es estable; violentos movimientos de masa ya habrían sido observados en el pasado durante distintos eclipses solares.

Dado que la fotosfera radía con muy altos niveles de intensidad, sólo cuando ésta queda cubierta es posible observar las emisiones luminosas más tenues que provienen de la corona y que dan cuenta de su actividad. Actualmente para observarla no es necesario esperar un eclipse natural ya que se colocan coronógrafos que cubren el disco principal del Sol; éstos producen oscurecimientos artificiales del disco solar y especialmente son utilizados en sondas espaciales. Estos coronógrafos, junto con la sorprendente adherencia de material a las líneas del campo magnético solar (fenómeno que se denomina congelamiento magnético) permite visualizar indirectamente la orientación de las líneas de campo magnético en la base de la corona solar.

Mediante los coronógrafos fue posible estudiar dos tipos bien diferenciados de configuración magnética en la corona. Una configuración corresponde a ciertas regiones ensombrecidas, con uno de los extremos de las líneas de campo magnético anclado al Sol y el otro extremo liberado al espacio interplanetario. El otro tipo de configuración está formado con líneas magnéticas estructuradas en forma de arcos, sus dos extremos están anclados a la superficie solar y cada arco recibe el nombre de 'arco coronal'.

La estructura de estos arcos es compleja, sin embargo si consideramos ciertas simplificaciones es posible aproximar su disposición básica: sus dos pies magnéticos están anclados a la zona de convección; un manojó de líneas de campo

que parte desde uno de los pies del arco, pasará a través de la fotosfera y de la cromosfera, surgirá en la corona y finalmente se cerrará hacia abajo cuando este arco vuelva a la zona convectiva

La dinámica de un arco coronal tiene dos fases bien diferenciadas. Dado que en la base del arco (zona de convección) la presión de las partículas es mucho más grande que la presión magnética, son las leyes de los fluidos no magnetizados las que, debido al congelamiento magnético, determinan el movimiento de los pies del arco. Sin embargo en la corona ocurre lo opuesto, la materia obedece dócilmente siendo arrastrada junto con el campo magnético según el resultado de aplicar las leyes del magnetismo a los fluidos.

Las fulguraciones solares son eventos localizados y producen altos niveles de emisión de radiación y disparos de partículas energéticas eléctricamente cargadas. La primer fulguración fue observada Carrington en 1859 con un telescopio, mientras observaba la posición y la forma de las manchas solares (ver sección 1.4.4).

Cada uno de estos eventos tiene una duración acotada y, aunque su tiempo de vida es variable, desde que nacen hasta que mueren transcurren típicamente varios minutos. Su tamaño también es variable, generalmente son pequeños al principio y se van expandiendo hasta alcanzar tamaños típicos de decenas de miles de kilómetros. Su característica principal es la liberación de grandes cantidades de energía y principalmente disparan rayos X e iones de alta energía. Sin embargo estas fulguraciones emiten niveles de radiación intensos en un rango de longitudes de onda muy amplio, desde largas ondas de radio hasta ondas muy cortas que corresponden a rayos gamma. La intensidad de rayos X emitidos durante una fulguración puede alcanzar unas mil veces la intensidad monótona que tiene la emisión permanente de estos mismos rayos X que son expulsados desde la corona.

A lo largo del tiempo una gran variedad de estructuras en las diferentes capas solares ha sido identificada. Algunas han sido estudiadas desde hace más de un siglo y otras han sido descubiertas durante recientes misiones científicas. En la fotosfera: manchas, fáculas fotosféricas (palabra española que proviene del latín 'facūla' que significa 'antorcha pequeña'), gránulos y supergránulos. En la cromosfera: redes magnéticas, fáculas cromosféricas, filamentos, fulguraciones y prominencias. En la corona: 'streamers' (palabra que proviene del inglés y que en castellano se podría decir 'flujos de materia'), agujeros coronales, regiones activas, arcos y 'plumes' (palabra que proviene del Francés y que en castellano significa 'plumas').

2.3 El Sol Gira sobre Sí Mismo!

El descubrimiento de la rotación solar y un primer cálculo aproximado de su velocidad angular fueron realizados por Galileo Galilei. Realizó este descubrimiento notando que las manchas solares que él observaba iban girando en el disco solar y tardaban aproximadamente un mes en reaparecer. Sin embargo durante la década de 1860, Carrington descubrió que el Sol no rota como un cuerpo rígido, sino que la rotación en regiones ecuatoriales es más rápida que en las regiones polares.

Actualmente se ha cuantificado la dependencia de la velocidad angular de rotación con la latitud solar. Observando al Sol desde la Tierra veremos que el ecuador solar realiza casi una rotación completa cada 27 días, mientras que las regiones cercanas a los polos solares tardarán casi 28 días y medio en realizar un giro.

Debido a que la Tierra se traslada alrededor del Sol, las mediciones terrestres de estas velocidades no coinciden con las que obtendría un observador fijo a un sistema de refe-

rencia solidario a las estrellas lejanas (sistema inercial). Es por este motivo que se ha diferenciado a la velocidad angular solar medida desde Tierra (llamada sinódica) de la velocidad angular intrínseca, medida desde un sistema inercial (llamada sideral). En la actualidad se ha establecido empíricamente que la velocidad angular sinódica (ω), expresada en grados por día, depende linealmente del seno al cuadrado de la latitud heliográfica (θ) siendo $\omega = 13.22 - 0.57 \text{sen}^2(\theta)$.

2.4 El Ciclo del Sol

Es importante destacar que la imagen que brinda la corona varía radicalmente acorde con el nivel de actividad solar. El tipo de actividad que se desarrolla en el Sol incluye la emisión espontánea de materia, la frecuencia y la intensidad con que ocurren las fulguraciones, el movimiento de arcos coronales, el movimiento de las manchas solares, etcétera. Durante épocas, el vigor con que se desarrolla esta actividad ha tenido un comportamiento aproximadamente periódico, con un período típico de 22 años. La cantidad de manchas y el área solar que cubren han variado desde hace casi trescientos años según un semi-ciclo de unos 11 años (ver Figura 8). Sin embargo dado que debe tenerse en cuenta que en dos semiciclos sucesivos cambian ciertas reglas de polaridad magnética, para poder tener las mismas condiciones que hay en un momento dado habría que esperar aproximadamente 22 años.

Se han propuesto modelos basados en la física de los fluidos magnetizados para explicar como se genera campo magnético en el Sol. Estos modelos han tenido un éxito relativo y han ayudado a comprender el mecanismo del dínamo solar, sin embargo aún no se ha alcanzado suficiente conocimiento para poder predecir ni la intensidad ni la duración del próximo ciclo solar.

Las teorías de dinamo solar sostienen su explicación en la rotación no rígida del Sol (rotación diferencial) y en el retorcimiento de las líneas de campo magnético. Dado que a diferente latitud y a diferente profundidad el Sol rota con una velocidad angular distinta, se produce un enroscado de las líneas magnéticas.

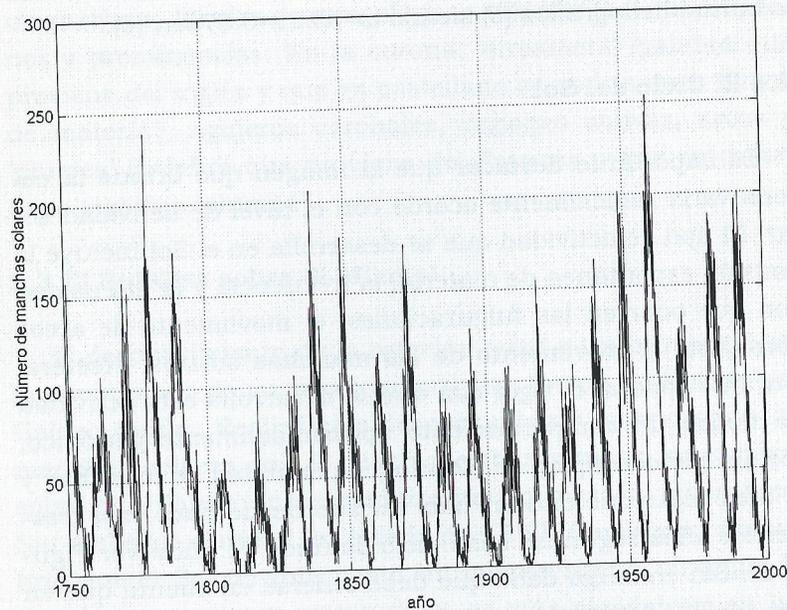


Figura 8: Promedio diario del número de manchas solares desde el año 1750 hasta el año 2000.

2.4.1 La Evolución de las Manchas Durante el Ciclo

El tamaño de las manchas solares es variable y las más grandes pueden alcanzar un diámetro similar al terrestre (aproximadamente una cincuentava parte del radio solar). El campo magnético en su interior es muy intenso y puede

alcanzar valores tres mil veces más grande que en sus alrededores. Las más duraderas pueden permanecer hasta 100 días y luego desaparecer. Durante el ciclo solar, las manchas aparecen en latitudes cercanas a los 45° (un grupo de manchas en cada hemisferio solar); la posición donde surgen las manchas va migrando hacia el ecuador durante el transcurso de los 11 años del semiciclo. Este comportamiento de la distribución de manchas en el disco solar fue por primera vez registrado por Carrington en el año 1858. Estas manchas o grupos de manchas rotan coherentemente con la superficie solar y respetan ciertas reglas de polaridad: frecuentemente aparecen de a pares y la mancha precedente tiene siempre el mismo 'signo magnético' en el hemisferio norte y signo contrario en el sur. En las manchas hay líneas de campo que penetran en el Sol; el 'signo magnético' de una mancha lo establece el sentido de estas líneas, una línea que abandona el Sol tendrá signo opuesto a otra que ingrese en él.

2.4.2 Hay Varios Indicadores de la Actividad Solar

Existen otros trazadores del ciclo solar además del número de manchas. Desde el ciclo 21 se han realizado mediciones de la intensidad con que el Sol emite luz en una determinada línea espectral de hidrógeno (H_{α}). En este indicador se ha observado un comportamiento similar al de las manchas, se registraron ciclos con máximos y mínimos concordando con los del ciclo de aquellas.

Otro indicador del nivel de actividad solar es el flujo de energía emitida en ondas electromagnéticas de radio en la longitud de onda de 11 cm., conocer los niveles de intensidad de esta emisión es muy importante ya que existe una asociación entre ésta y la intensidad de radiación ultravioleta.

ta, la cual tiene mucha influencia sobre las propiedades de la ionosfera terrestre (ver Capítulo 3.1).

A pesar de todo el conocimiento que en la actualidad se tiene sobre el Sol, aún no es posible comprender por completo los detalles del mecanismo básico involucrado en el ciclo solar; no todos los ciclos tienen el mismo nivel máximo de actividad ni exactamente la misma duración. Pese al gran interés que existe en predecir estos niveles, tanto como en conocer el momento en el que ocurrirá el máximo y el mínimo del ciclo, aún no es posible predecirlos con la exactitud deseada.

2.5 Mínimos de Maunder y de Spörer, y Gran Máximo

Una gran cantidad de mediciones muestran que el ciclo de manchas solares se ha repetido casi periódicamente durante los últimos tres siglos. Sin embargo durante el transcurso del último milenio han ocurrido dos largos lapsos de tiempo durante los que casi no hubo manchas; en estos dos periodos reinó una calma solar que no respetó la regla de periodicidad del ciclo del Sol.

Uno de estos mínimos ocurrió en el lapso 1645-1715 y actualmente se lo conoce con el nombre de 'Mínimo de Maunder'; hay indicios de otro mínimo ocurrido en el lapso 1460-1550 y se lo conoce con el nombre de 'Mínimo de Spörer'.

Los nombres de estos periodos se deben a los astrónomos G. Spörer y E. W. Maunder. Aunque el astrónomo alemán G. Spörer publicó un artículo mencionando la existencia del mínimo (1645-1715) en 1887, antes que Maunder, a este lapso de tiempo se lo conoce hoy como 'Mínimo de Maunder'. Maunder simplemente resumió los resultados de Spörer en 1890 para la 'Royal Astronomical Society' y publicó un artículo llamado 'A Prolonged Sunspot Minimum',

siete años después que Spörer publicara su primer artículo. Quizá como premio consuelo se le otorgó el nombre de 'Mínimo de Spörer' a la brecha producida desde el año 1460 al 1550. Sin embargo, la ausencia de manchas había sido informada casi cien años antes, en los tres libros de astronomía escritos en 1792 por LaLande. En el momento en que fueron realizados estos primeros informes de la desaparición de manchas no tuvieron gran repercusión, ya que fueron hechos antes de que Schwabe descubriera la existencia del ciclo.

2.5.1 Un Testigo Terrestre de la Actividad Solar

La concentración histórica de un isótopo del carbono, el carbono 14 (o ^{14}C), se puede estimar hoy en día midiendo la cantidad presente en el interior de los árboles que existían en aquel momento. Si se corta en forma transversal la corteza de un árbol, se observa una serie de anillos concéntricos. Estos anillos se crearon en forma continua durante el crecimiento del árbol y cada uno corresponde a un año diferente. De esta forma cada anillo identifica o rotula un momento determinado en el pasado. La presencia de ^{14}C en el anillo actual de un árbol, está determinada por la cantidad media de ^{14}C producida en la atmósfera terrestre en ese año.

Este isótopo es generado a altitudes entre 10-60 Km respecto del nivel del mar, como consecuencia del bombardeo de rayos cósmicos de alta energía sobre la atmósfera terrestre. A su vez la presencia de rayos cósmicos es regulada por la actividad solar. Cuanto mayor es la actividad solar, la cantidad de rayos cósmicos que bombardean la atmósfera terrestre es menor y, en consecuencia, también será menor la cantidad de ^{14}C presente en los anillos de los árboles.

Si se comparan los registros históricos de ^{14}C de los últimos años con la cantidad de manchas solares, se puede

confirmar lo que se espera: cuanto más activo está el Sol se tiene menos abundancia de ^{14}C , y viceversa. En particular, registros de este isótopo confirman la existencia del 'mínimo de Maunder'. La ausencia de manchas y el aumento de ^{14}C no son los únicos elementos que se disponen para sujetar una débil actividad solar en este período; también se han encontrado descripciones históricas informando una corona solar, observada durante los eclipses, consistente con los conocimientos actuales de la estructura coronal para períodos mínimos solares y existen algunos registros que sugieren que hubo escasez de auroras.

Del análisis histórico de carbono 14 en períodos muy antiguos, donde no se dispone de información sobre manchas solares, se ha conjeturado también la existencia de un período, desde el año 1100 hasta el año 1250, en el que el Sol tuvo una actividad más intensa que la media actual, a este período de intensa actividad solar se lo ha denominado 'Gran Máximo'.

2.5.2 Radiación Cósmica y Ciclo Solar

Parte de la radiación cósmica observada desde la Tierra es originada principalmente en las explosiones de un tipo de estrellas llamadas supernovas. Como fue mencionado en la sección anterior, el ingreso de rayos cósmicos de baja energía (menor que $\sim 10\text{MeV}$ por nucleón)⁷ al sistema solar depende del ciclo solar. Cuánto menor es la actividad solar, mayor es la cantidad de rayos cósmicos presentes en el entorno terrestre. Actualmente se cree que la razón de esta asociación se debe a un debilitamiento, que ocurre en períodos

⁷ El transporte de rayos cósmicos de muy alta energía no se ve afectado por el campo magnético interplanetario de la heliosfera, y así su intensidad no depende del ciclo solar.

de mínima actividad solar, del poder del escudo magnético que posee el sistema solar para atenuar el ingreso de estas partículas. En consecuencia, en períodos de mínima actividad solar se permite un mayor ingreso de radiación cósmica, mientras que en períodos de máxima actividad del Sol este escudo se vigoriza y logra desviar significativamente la trayectoria de una gran parte de los rayos cósmicos originados (en nuestra galaxia) fuera de nuestro sistema solar. Así, la heliosfera es una gran coraza magnética del sistema solar y late al ritmo del ciclo del Sol.

2.5.3 Temperatura Terrestre y Actividad Solar

La 'pequeña era glacial' (desde ~ 1500 hasta ~ 1850) fue un período durante el cual en el norte de América y de Europa se registraron temperaturas extremadamente bajas. Existen pinturas de la época que retratan la intensa y prolongada época invernal.

El lapso de tiempo en el que ocurrió el mínimo de Maunder coincidió aproximadamente con la etapa más fría de la pequeña era glacial. En el período 1800-1830 fueron reportadas nuevamente muy pocas manchas en el Sol. Este nuevo decaimiento en la actividad solar no fue tan significativo como el anterior; pero sin embargo, nuevamente en Europa caía la temperatura media y el año 1816 fue bautizado como el año sin verano.

Según estudios llevados a cabo en 1991, donde se investigó la relación entre el registro de temperaturas históricas en la Tierra y la duración del ciclo solar en el período (1740-1980), los ciclos solares más largos estarían asociados con un enfriamiento en la superficie terrestre, sin embargo estos resultados resultaron muy controversiales y hubo estudios que concluyeron lo contrario.

Actualmente se cree que la mayor causa del calentamiento global de la atmósfera es la generación de CO₂ por combustión, y que la actividad solar sólo podría explicar en parte el calentamiento de la Tierra en los últimos años, siendo el mecanismo de esta influencia muy indirecto y aún en discusión.

2.6 Transición desde un Mínimo Solar al Próximo

El comienzo de cada ciclo es dominado por una etapa calma de poca actividad solar (mínimo) donde la configuración magnética global es simple. Para comprender la estructura básica de las líneas de campo pensemos primero en un campo magnético producido por un imán con forma de barra, colocado en el eje solar (un campo dipolar). Sin embargo a esta configuración se le debe agregar la contribución de un arrastre de las líneas de campo hacia el exterior solar que es producido por el flujo de masa expulsado desde el Sol, debido a que en esta región la materia está adherida al campo magnético. El arrastre del campo es causado por el escape de materia desde el Sol y producirá un estiramiento de las líneas del campo dipolar; este efecto es más significativo cerca del ecuador solar.

A medida que transcurren los años va comenzando una etapa violenta (transición al máximo), comienzan a producirse bruscos movimientos de masa en la superficie solar y se modifica radicalmente la configuración de líneas magnéticas. En la atmósfera solar surgen regiones de gas magnetizado que forman arcos o lazos magnéticos, cuyas bases conforman las manchas solares; estos lazos magnéticos evolucionan y frecuentemente se retuercen produciendo que la fuerza magnética desempeñe un rol muy significativo. Durante este proceso es más frecuente la expulsión discreta en forma espontánea de grandes cantidades de masa solar y la

aparición de fulguraciones. Por ejemplo, en 1973 se pudo observar una protuberancia que cubría un 20% del disco solar. En esta etapa de violencia se produce un cambio en la polaridad magnética global del Sol, y lentamente todo vuelve a una situación de calma, el mínimo siguiente tiene polaridad opuesta al mínimo anterior.

El tiempo que el nivel de actividad solar tarda en ir desde un mínimo hasta un máximo (~ 4-5 años) es más breve que el que tarda en ir de un máximo al mínimo subsiguiente (~ 7-6 años). La comunidad de astrónomos y físicos ha convenido en numerar los ciclos comenzando con el número 1 para aquel que transcurrió entre los años 1755 y 1766, ya que desde ese momento se dispone de tablas completas con valores del número de manchas como función del tiempo.

2.7 Viento Solar I - El Viento Cerca de la Tierra

El viento solar es gas en estado de plasma que se emana desde el Sol hacia el espacio interplanetario con un permanente y continuo soplo; este gas está constituido por electrones e iones, quienes mayoritariamente son protones (ver sección 1.3).

La velocidad del viento solar varía con el tiempo y con la posición; la mayor cantidad de partículas que forman las corrientes más rápidas del viento escapan del Sol desde los 'agujeros coronales'. Estas corrientes de gran velocidad perturbarán al flujo del viento solar lento, produciendo interacciones significativas entre ambos fluidos. Las primeras identificaciones del origen solar de estas corrientes rápidas de viento solar corresponden a observaciones realizadas por la misión Helios 1 entre los años 1973 y 1975. Allí se observaron dos corrientes de viento solar rápido muy significativas y pudo deducirse que éstas fueron emanadas desde dos agu-

jeros coronales ubicados aproximadamente en la misma latitud y en lados opuestos del disco solar.

Las propiedades del viento varían radicalmente con la posición relativa al Sol. Debido a esta dependencia podríamos preguntarnos, ¿Cuál es el comportamiento que tienen los valores típicos de velocidad, densidad y temperatura de las partículas que componen el viento en las inmediaciones terrestres?. Cuando las partículas del viento se encuentran cerca de la Tierra viajan a velocidades de entre 300-500 Km/s; esta velocidad es aproximadamente unas 500 veces la de un Concorde (2400 Km/h). Estas partículas viajan a una milésima parte de la velocidad de la luz en el vacío. La densidad de protones a una distancia de 1 UA respecto del sol es muy baja, típicamente 10 protones cada un centímetro cúbico; aproximadamente 10^{18} veces más pequeña que la densidad de partículas presentes en nuestro aire. La temperatura típica de los protones a una unidad astronómica del Sol es de aproximadamente 5×10^4 °K. Esta temperatura equivale a una energía térmica media para cada protón de 4 electrónVoltios (eV) y es comparable a la mitad de la energía que típicamente libera cada átomo de carbono en el proceso de combustión (~ 10 eV).

2.8 Pérdida de Masa Solar

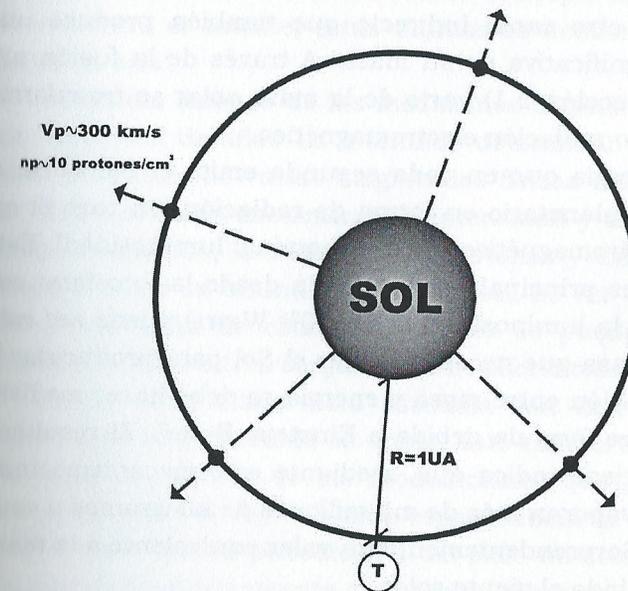
El Sol va perdiendo parte de su masa principalmente debido a dos mecanismos; uno es directo y se vincula con el viento solar; el otro es indirecto y está asociado con la radiación. Como consecuencia del viento solar, las partículas de la superficie solar se escapan hacia el espacio interplanetario. Por otro lado, debido al proceso de fusión nuclear que ocurre en la capa más interna del Sol, parte de la energía almacenada en la masa de las partículas se transforma en

radiación electromagnética que finalmente, y después de mucho tiempo, es liberada hacia el exterior.

En los próximos capítulos se estimará la cantidad de energía que escapa del Sol en cada segundo a través de su superficie, ya sea en su aspecto de masa (viento solar) o en su aspecto de radiación electromagnética.

2.8.1 Debido al Viento Solar

Mediante el viento solar se produce un desprendimiento de partículas que producen una disminución de la masa solar. Podemos cuantificar la pérdida de masa del Sol producida por el viento solar si imaginamos una esfera con su centro en el Sol y un radio $R=1$ UA que determina una superficie o cáscara de la esfera (ver Figura 9).



Dibujo: Pablo Masondo

Figura 9: Esquema (fuera de escala) que muestra una esfera de radio $R=1$ UA centrada en el Sol. En la superficie de esta esfera la velocidad típica de los protones (V_p) es 300 Km/s y hay aproximadamente 10 protones en cada centímetro cúbico.

Para efectuar una estimación de esta pérdida de masa es necesario conocer la cantidad de protones que atraviesan la cáscara de la esfera imaginaria y un poco de geometría de las esferas. El aporte de los demás iones y de los electrones es despreciable. La cantidad de protones que atraviesa esta superficie puede ser calculada conociendo su velocidad y su densidad (300 Km/s y 5 protones/cm³). Como resultado de la estimación se obtiene que el Sol pierde alrededor de mil millones de kilogramos de masa durante cada segundo!

2.8.2 Debido a la Radiación Electromagnética

La evaporación del Sol no sólo es consecuencia del viento solar, hay otro canal indirecto que también produce una pérdida significativa de su masa. A través de la fusión nuclear (ver sección 2.1) parte de la masa solar se transforma en fotones o radiación electromagnética.

A la energía que en cada segundo emite el Sol hacia el medio interplanetario en forma de radiación, en todo el espectro electromagnético, se la denomina 'luminosidad'. Esta radiación es principalmente emitida desde la fotosfera; con el valor de la luminosidad (3.86×10^{26} Watts) puede ser estimada la masa que necesitó gastar el Sol para producirla; la transformación entre masa y energía se debe hacer mediante la célebre fórmula debida a Einstein $E=mc^2$. El resultado que se obtiene indica que, mediante este mecanismo indirecto, se evaporan más de mil millones de kilogramos a cada segundo. Sorprendentemente un valor equivalente a la masa perdida debido al viento solar.

2.9 Viento Solar II - Un Viento no tan Ordenado

Los equipos de científicos que se dedican a estudiar el Sol y el espacio interplanetario disponen desde hace décadas de grandes cantidades de datos que son enviados persistentemente por sondas espaciales y son recibidos en la Tierra para su posterior estudio. Estas observaciones se realizan mediante instrumentos de medición especialmente diseñados que son montados en los satélites. Estas mediciones pueden clasificarse en dos según sea el tipo de dato observado. En una clase se hallan las que observan la radiación emitida desde determinadas regiones solares, denominadas 'remotas'. El otro tipo mide propiedades del viento solar, mediante observaciones realizadas en el propio lugar en que se encuentra el satélite; estas últimas se denominan mediciones 'in situ'.

Un estudio extenso de las mediciones obtenidas durante gran cantidad de años ha intentado determinar el comportamiento básico de varias magnitudes físicas del viento solar. Entre éstas se encuentran la intensidad y dirección del campo magnético, la densidad de protones y electrones, la temperatura y la abundancia de iones. Se ha encontrado que la variación de estas magnitudes se puede clasificar principalmente en tres conjuntos bien diferenciados.

Una de estas clases está asociada con una escala de tiempo muy larga (medida en años). Este comportamiento es consecuencia directa de las modulaciones que produce el ciclo solar sobre el viento. Como consecuencia de este resultado se sabe que la periodicidad del ciclo no solo es observada mirando directamente al Sol, sino que también es percibida al observar ciertas propiedades del viento. El viento solar está compuesto por protones, electrones, átomos de Helio doblemente ionizados (típicamente con una abundancia relativa a los protones del 4%) y una gran variedad de

iones minoritarios. Sin embargo la abundancia de estos últimos es muy baja; en ninguna de estas especies la abundancia de iones alcanza siquiera una milésima parte de la cantidad de protones presentes en el viento. Sin embargo la abundancia media de partículas minoritarias varía con la fase del ciclo solar. Durante aproximadamente los 11 años que duró el ciclo 21, desde su comienzo en el mínimo de 1974 y hasta el siguiente mínimo en 1985, la abundancia de partículas alfa respecto a la de protones ha sido medida por las misiones Helios 1 y 2. Como resultado se ha obtenido un valor promedio de un 3% en los mínimos y un 5 % en el máximo. Esto significa que la cantidad media de partículas expulsadas por el Sol depende del nivel de actividad solar.

Otro tipo de comportamiento se vincula con importantes variaciones en los valores usuales de temperatura y configuración magnética. Estas variaciones tienen duraciones en escalas temporales intermedias (horas o días). Esta perturbación en las condiciones habituales del viento solar es provocada principalmente por eventos transitorios que ocurren en el Sol, las eyecciones de masa solar. En ciertas ocasiones, una porción de material frío es mantenida en equilibrio en regiones coronales durante períodos de tiempo que pueden alcanzar varios días. Como consecuencia de una desestabilización de la estructura magnética que sostiene a este material, esta masa es expulsada violentamente desde el Sol hacia el espacio. Estos objetos lanzados al espacio se expanden mientras se alejan del Sol. A una distancia de 1 UA del Sol, estas nubes de gas ocasionalmente pueden viajar a velocidades mayores a los 1000 Km/s y su tamaño está típicamente comprendido entre los 10 y los 50 millones de kilómetros (esto es entre una quinceava y una tercera parte de la distancia Tierra-Sol). Dependiendo de la dirección en la que viaja este gas y de su tamaño, podrá modificar ciertas condiciones del entorno terrestre. Los protones que forman

esta nube de plasma están mucho más fríos que los del resto del viento solar. En ciertas ocasiones el material expulsado adquiere una estructura muy ordenada con un campo magnético muy intenso y recibe el nombre de 'nube magnética'.

La tercera clase está formada por perturbaciones viajeras que van produciendo fluctuaciones de corta escala alrededor de los valores medios de algunas magnitudes físicas en el viento solar. Son ondas que viajan a través del medio interplanetario como las olas que viajan a través de la superficie del mar, sumado a fluctuaciones turbulentas, similares a un comportamiento ruidoso, que responden a una evolución dinámica complicada que aún no ha sido comprendida en detalle.

3

Nuestro Hogar

El sistema solar comenzó a formarse unos 15 mil millones de años después de la formación del Universo conocido, según la teoría del Big-Bang. La Tierra es el tercer planeta desde el Sol y posee una atmósfera con una densidad intermedia entre la de Venus (más densa) y la de Marte (menos densa). Nuestro planeta es el único que tiene el privilegio de poseer grandes océanos de agua líquida, elemento principal para el desarrollo y la supervivencia de la vida, tal como la conocemos hoy.

A pesar de que el comportamiento global del clima terrestre posee una gran complejidad, actualmente se conocen muchos detalles del mismo ya que es investigado con gran interés, debido a que está directamente vinculado con la interacción entre la atmósfera y los océanos. Los científicos describen y predicen estos fenómenos a través de modelos matemáticos que contienen ecuaciones tales que para conocer su solución, los datos de entrada deben ser conocidos con gran precisión. Se requiere que los valores numéricos de estas magnitudes tengan suficiente exactitud ya que de otro modo podrán obtenerse resultados muy diferentes de los correctos. Las leyes físicas involucradas en la predicción del clima son un referente de los fenómenos no lineales y una frase repetida frecuentemente para exagerar este concepto es 'El aleteo de una mariposa en Tailandia podría desencadenar una gran tormenta en Buenos Aires'. Fenómenos meteorológicos, como por ejemplo "El niño", no pueden ser previstos con gran anticipación y aún son muchas las incógnitas que quedan por contestar en esta área de conocimiento.

3.1 La Atmósfera Terrestre y sus Capas

La atmósfera terrestre está compuesta por varias capas de diferentes gases que envuelven a la Tierra. Estos gases, principalmente nitrógeno (78%) y oxígeno (21%), son sostenidos por la fuerza de gravedad terrestre.

La troposfera es la primer capa y se extiende hasta una altitud media de aproximadamente 10 Km. Esta altura no es la misma para todo el globo terrestre y depende de la latitud. En esta región se halla la mayor cantidad de nubes.

La estratosfera se encuentra desde los 10 Km de altura hasta los 50 Km. En esta región se halla la mayor abundancia de ozono. El ozono es un isótopo del oxígeno y cumple la función de escudo contra los excesos de radiación ultravioleta recibidos del espacio exterior. Recibir altos niveles de esta radiación⁸ es nocivo para la vida; puede producir cáncer de piel, reducir las funciones de sistema inmunitario, afectar el normal desarrollo de fotosíntesis y disminuir la cantidad de fitoplancton en los océanos. En el año 1985 los científicos descubrieron que durante cierta época del año, en una región esparcida sobre la Antártida se producía un importante adelgazamiento en la capa de ozono⁹. Este fenómeno se denominó posteriormente 'Agujero de Ozono' y en la actualidad hay equipos de investigación que se encargan de informar los índices que caracterizan cuál es la situación del agujero en este escudo. Muchos países han comenzado a disminuir la fabricación de clorofluorcarbonos (CFC) ya que se ha descubierto que el CFC en la atmósfera reacciona químicamen-

⁸ En internet, <http://www.conae.gov.ar/iuv/iuv.html>, puede hallarse más información sobre los niveles de radiación ultravioleta que recibidos en la Tierra.

⁹ En internet, <http://borges.conae.gov.ar/cgi-bin/testo3.pl>, pueden observarse mapas históricos de la distribución de ozono en varias ciudades.

te disminuyendo la presencia de ozono. El CFC es utilizado en ciertos productos fabricados por grandes industrias, principalmente algunos aerosoles, disolventes de limpieza, aires acondicionados, etc.

La mesosfera se extiende desde los 50 Km y hasta los 80 Km. En esta región y a medida que subimos se produce un importante descenso en la temperatura. Ésta puede alcanzar en su punto más alto los 80°C bajo cero.

Por encima de los 80 Km y hasta los 1000 Km se encuentra una capa llamada ionosfera. Este nombre es debido a que en esta zona los átomos se encuentran ionizados (han perdido alguno o todos sus electrones). Si subimos en esta región observaremos que la temperatura comienza a incrementarse hasta valores de temperatura de más de 1000°C.

Por último, la capa más externa es llamada exosfera. En ciertas latitudes esta zona se extiende hasta varios miles de kilómetros, longitud similar a algunos radios terrestres. El extremo de esta región es considerado el borde de la atmósfera.

3.2 Hay Magnetismo en el Entorno Terrestre

Las propiedades magnéticas del entorno terrestre se asemejan a las de un gran imán. La Tierra, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno son planetas con una gran magnetización.

La configuración del magnetismo terrestre actual se asemeja a la producida por un gran imán colocado en el centro de la Tierra, de forma tal que uno de sus polos magnéticos se ubique aproximadamente al polo norte geográfico terrestre y el otro al sur. Líneas de campo magnético parten desde regiones cercanas al polo sur geográfico hacia el espacio, reingresando por el hemisferio norte. Sin embargo esta estructura magnética, la magnetosfera terrestre, posee cierta

asimetría y su configuración diurna es significativamente diferente que su estructura nocturna.

La configuración geomagnética es deformada por el soplo del viento solar. Se comprime ligeramente el frente (día) y se estira largamente la región nocturna hacia el exterior del sistema solar.

Los polos magnéticos no coinciden con los geográficos ya que existe una inclinación ($\sim 11^\circ$) entre la dirección principal de este imán imaginario y la dirección del eje de rotación que une a los polos geográficos, pero los polos magnéticos no están fijos y van desplazándose lentamente a través de los siglos. Actualmente uno de los polos magnéticos se halla sobre territorio canadiense, a 1300 Km. al noroeste de la Bahía de Hudson.

El campo geomagnético propio es causado por movimientos convectivos de material conductor fundido, en el núcleo de la Tierra. El tiempo en que ocurren variaciones importantes en esta configuración magnética es aproximadamente de unos diez mil años.

Se ha comprobado que la polaridad del campo magnético terrestre sufrió varias inversiones, esta inversión ocurre cuando los polos magnéticos migran y finalmente uno de los polos magnéticos queda ubicado en el lugar que previamente ocupaba el polo opuesto, es decir que intercambian su ubicación geográfica. Las inversiones han ocurrido en forma muy irregular, típicamente cada cientos de miles de años y las observaciones históricas de la polaridad de este campo pueden realizarse estudiando óxido de oro dentro de rocas y sedimentos volcánicos. Durante ciertas erupciones volcánicas, aquella parte de las sustancias presentes en la lava que es susceptible al magnetismo es orientada según el sentido y dirección del campo magnético terrestre. Al solidificarse este material deja testimonio de la polaridad existente en el momento de la erupción.

3.2.1 La Estructura Magnética

(o Estructura de la Magnetosfera)

En la frontera de la magnetosfera terrestre orientada hacia el Sol se genera una capa muy delgada, esta capa es el límite entre el viento solar interplanetario y la primera región vinculada directamente con la Tierra. Esta delgada capa recibe el nombre de 'choque en proa'¹⁰ y a través de ella la velocidad de las partículas cambia radicalmente; se produce una discontinuidad en el campo de velocidades. El nombre de esta región se debe a que se denomina 'choque' a la discontinuidad de una magnitud física donde se cumplan ciertas reglas de conservación.

Si vamos ingresando desde el medio interplanetario hacia la Tierra por la frontera diurna, la región que le sigue al choque de proa es la magnetovaina o vaina magnética. Esta región está más caliente que el viento solar y tiene un campo magnético más intenso, y como su nombre lo indica es una delgada capa (o vaina) que recubre a la magnetosfera.

La próxima región es la propia magnetosfera, la cavidad generada por el campo magnético terrestre. La magnetosfera está dividida en varias zonas, en una de las cuales se halla el cinturón de radiación, que es una región en donde existen altos niveles de radiación y contiene también partículas cargadas de alta energía.

La región de este cinturón se ubica entre 2 y 6 radios terrestres¹¹ de altitud y contiene partículas cargadas de alta energía que oscilan entre ambos hemisferios desplazándose a través de las líneas de campo magnético y rotando coherentemente con la Tierra. Las líneas magnéticas son guías aproximadas de sus trayectorias.

¹⁰ En inglés 'Bow Shock'.

¹¹ un radio terrestre corresponde a la distancia $R_T = 6371$ Km.

En latitudes cercanas a los polos, parte de los electrones puede descender hasta alturas ionosféricas, encendiendo luces polares o auroras. Esta luz es producida como consecuencia de la caída de los electrones, ya que durante su descenso interactúan con material neutro, ionizando las partículas presentes en la atmósfera. Como consecuencia de estas interacciones, son emitidos los fotones que serán finalmente observados cuando se admiran las vistosas auroras.

El origen de las perturbaciones al campo magnético terrestre está asociado principalmente con la presencia de corrientes eléctricas en la magnetosfera. Existen diferentes sistemas de corrientes localizados en distintas zonas de esta cavidad magnética. El sistema de corrientes llamado 'corriente anular' es uno de los más importantes; este sistema de corriente se genera por el movimiento de las partículas cargadas que están en el cinturón de radiación mencionado anteriormente, y tiene una forma similar a la de un anillo.

3.2.2 *¿Cómo es la Descripción Matemática del plasma en la Magnetosfera Terrestre?*

Para realizar descripciones matemáticas de la evolución del sistema magnético terrestre usualmente se utilizan ecuaciones similares a las utilizadas para describir gases en toberas, las ecuaciones de los fluidos. Estas son ecuaciones que expresan las leyes de la dinámica aplicadas a medios continuos, es decir que no se aplican a cada partícula sino a grupos numerosos de éstas. Sin embargo, y dado que este gas está eléctricamente cargado, en la magnetosfera deben tenerse en cuenta también las leyes del electromagnetismo. Así, se tiene en cuenta no solo a la materia (partículas neutras y eléctricamente cargadas) sino también a las corrientes eléctricas y a los campos electromagnéticos, y a su interacción mutua. A la rama de la Física que estudia plasmas y

fluidos conductores combinando el electromagnetismo con el aspecto continuo de la materia, se la denomina 'magnetohidrodinámica' (MHD).

Sin embargo, en ciertas ocasiones, la descripción con fluidos no es suficiente y es necesario recurrir a otra descripción que utilice ecuaciones más sofisticadas, basadas en leyes estadísticas, una rama de la física llamada 'Teoría Cinética'. Este nivel de descripción permite considerar la interacción entre las partículas eléctricamente cargadas y el campo magnético con mayor exactitud, permitiendo describir detalladamente la transferencia de energía entre el campo electromagnético y las partículas del plasma.

3.3 **Su TV, su teléfono y las Sondas Espaciales en el Entorno Terrestre**

Desde hace más de 40 años el hombre está enviando satélites artificiales no tripulados al espacio. Algunos de ellos han caído y otros, debido a desperfectos, continúan en órbita pero sin ningún tipo de contacto con la Tierra. Sin embargo una gran cantidad de estas sondas espaciales está hoy en plena actividad.

Aunque originalmente los satélites fueron enviados al espacio exclusivamente con fines científicos y por organizaciones de origen gubernamental, actualmente son cada vez más los de origen privado con objetivos comerciales. La mayoría de las sondas que hoy están activas desarrollan sus órbitas en el entorno terrestre cumpliendo una gran variedad de objetivos. Principalmente desarrollan actividades de carácter científico, comercial o militar. Los satélites de tipo comercial están generalmente dedicados a administrar diversas tareas de comunicación (telefonía, TV satelital, localización de naves marítimas y aéreas, etc.).

Un interesante proyecto vinculado a la industria automotriz es aprovechar estos satélites para desarrollar autolocalización de vehículos automotores particulares. Este proyecto integra el uso de computadoras a bordo de los vehículos con la comunicación a una red de satélites. El satélite le brindará a la computadora las coordenadas geográficas en que se encuentra el vehículo con mucha exactitud. También le informará otros datos como por ejemplo, densidad del tráfico, corte de rutas, etc. La computadora a bordo dispondrá de mapas muy completos y al recibir la información del satélite podrá asesorar al conductor en la toma de decisiones.

Otro grupo de satélites está inmerso en la heliosfera, pero fuera de la estructura magnética terrestre. Algunos en la heliosfera interna (cavidad comprendida entre el Sol y la Tierra) y el resto describe trayectorias en el espacio interplanetario externo (más allá de la Tierra). Estos dos últimos tipos de satélites desarrollan tareas solo vinculadas con la ciencia.

3.4 No Todas las Órbitas son Iguales

Las órbitas más usuales que recorren las sondas alrededor de la Tierra están clasificadas por sus características principales.

Durante una órbita polar el movimiento del satélite es realizado de norte a sur, mientras que la Tierra desarrolla su rotación de oeste a este. Un tipo especial dentro de esta clase de órbitas es la heliosincrónica, que corresponde a la sonda realizando una vuelta completa y pasando encima del mismo punto terrestre en cada vuelta; el período de esta órbita es de un día. Utilizando órbitas polares es posible visualizar la totalidad de la Tierra al cabo de varias rotaciones si se regula correctamente la velocidad angular del satélite. Este tipo de trayectoria es utilizado principalmente para

realizar reconocimientos de recursos terrestres y tareas de predicciones meteorológicas.

Las órbitas excéntricas describen trayectorias elípticas estiradas (no circulares) y no son necesariamente polares.

La órbita geoestacionaria se desarrolla sobre el ecuador terrestre y a una altura de aproximadamente 36000 Km. La fuerza de gravedad que la Tierra le hace al satélite en esta altura, implica que la órbita tenga un período de 24 horas. Esto quiere decir que el satélite podrá observar siempre el mismo punto terrestre. En la actualidad hay cientos de sondas en esta situación. La mayoría de los satélites dedicados a administrar las comunicaciones comerciales (principalmente telefonía y TV) están en órbita geoestacionaria.

Poner a una nave en una órbita circunferencial baja tiene el menor costo económico. Se requiere menos energía ya que en estas órbitas, los satélites están más cerca de la superficie terrestre. En consecuencia son utilizadas para mantener en órbita a los objetos más masivos, por ejemplo la estación espacial soviética MIR desarrolla su órbita con estas características. Ésta se halla a 300-400 Km de altura y gira aproximadamente 15 veces por día alrededor de la Tierra.

En ciertas ocasiones es necesario pasar por varias etapas antes de alcanzar el estado final de la órbita de un satélite. A las trayectorias temporales intermedias se las denomina órbitas de transferencia. En muchas oportunidades a los satélites de comunicaciones se los coloca primero en órbita circunferencial y de allí se lo expulsa a una excéntrica para luego colocarlo en su estado final, una órbita geoestacionaria.

3.5 El Otro Rol de los Satélites del Entorno Terrestre

Los satélites con fines meteorológicos están encargados de medir magnitudes atmosféricas. Estas mediciones se utilizan como datos de entrada para realizar simulaciones numéricas que permitirán predecir el comportamiento futuro del clima.

Ciertos satélites son enviados al espacio para desarrollar tareas de reconocimiento de recursos terrestres, éstos vigilan las condiciones del medio ambiente del planeta. En general están en órbita casi polar y en consecuencia pueden observar el planeta entero periódicamente. Sus principales tareas son proporcionar datos para proyectos cartográficos, geológicos, petrolíferos y de actividades mineras. Estos satélites permiten detectar zonas en las cuales las cosechas están amenazadas por una plaga o informar acerca de diversos desastres medioambientales, por ejemplo incendios forestales o vertidos de crudo.

Los satélites militares desarrollan tareas de espionaje y de soporte de armamentos de moderna tecnología, pero por supuesto que no se conocen detalles de sus objetivos ni de sus contenidos, ya que generalmente operan en misiones secretas.

La mayoría de los satélites dedicados a administrar tareas de comunicación se encuentran en órbita geoestacionaria. Estaciones en Tierra emiten señales que son recibidas por las sondas y retransmitidas a su vez a otras estaciones terrenas o, en secuencias más complejas, a otros satélites. En la Tierra se emite y recibe información mediante grandes antenas parabólicas.

4

Las Nuevas Carabelas. Instrumentos y Sondas Científicas

Los intereses para lanzar una sonda científica son muy variados y cada misión tiene una lista de objetivos bien determinados, generalmente motivados por los intereses científicos (las preguntas interesantes que quieren responderse los investigadores) en el momento del diseño de la sonda y de sus instrumentos. Los datos obtenidos por estas sondas aportan información importante para el avance en el conocimiento de diferentes áreas de la ciencia, tales como la Física Solar, la Cosmología, la física estelar y de galaxias, etc.

Además del interés científico mencionado, también existe un interés comercial sobre las sondas espaciales que desempeñan el rol de centinelas de las condiciones del Sol y del viento solar antes de arribar al entorno de la Tierra. Éste interés lo tienen las compañías que fabrican y administran satélites comerciales (por ejemplo aquellos destinados a administrar comunicaciones) los cuales pueden ser dañados como consecuencia de ciertos eventos en el Sol, como veremos mas adelante en el capítulo 5.

4.1 Una Misión para Aprender acerca del Máximo Solar

El 14 de febrero de 1980, coincidiendo con un período de máxima actividad solar, fue lanzado el SMM (Solar Maximum Mission); su objetivo era obtener información acerca de las propiedades del Sol en esta fase del ciclo solar. En noviembre de ese mismo año, una falla provocó una pausa en sus operaciones que duró hasta abril de 1984, cuando fue reparada por la tripulación del lanzador espacial Space

Shuttle. Finalmente, el 2 de diciembre de 1989, el SMM concluyó con sus tareas para siempre cuando cayó sobre el océano Índico; los resultados de este proyecto aportaron un gran caudal de información que ha sido muy útil para comprender los mecanismos físicos relevantes que ocurren en la atmósfera solar.

4.2 Cooperación Científica internacional, el ISTP

Desde 1980, la agencia espacial europea (ESA¹²), la administración nacional del espacio y la aeronáutica de los Estados Unidos de América (NASA¹³), y el instituto de ciencia del espacio y astronáutica de Japón (ISAS¹⁴) han colaborado en la creación de la iniciativa internacional de Física Solar-Terrestre (ISTP-SI¹⁵). Esta colaboración intercontinental tiene como objetivo avanzar en la comprensión de los procesos involucrados en la interacción Sol-Tierra y ha conducido a la puesta en marcha de varias misiones espaciales. En este marco se han lanzado muchos satélites, por ejemplo GeoTail, Wind, Polar, SOHO y Cluster.

4.3 Una Misión para Aprender más acerca del Viento Solar: La Sonda "Wind"

La nave espacial Wind fue lanzada al espacio el primer día de noviembre de 1994. Tiene forma cilíndrica con un diámetro aproximado de 3 metros, una altura aproximada de 1 metro y con una cantidad de masa de 1250 kg. Una vez en órbita no luce como un cilindro perfecto ya que varias

¹² European Space Agency.

¹³ National Aeronautics and Space Administration.

¹⁴ Institute of Space and Astronautical Science.

¹⁵ International Solar-Terrestrial Physics Science Initiative.

antenas son desplegadas quedando fuera de su estructura principal. Gira con una velocidad angular de unas 20 vueltas por minuto.

La órbita que recorrió y recorrerá esta sonda comprende varias etapas, la más importante fue cuando estuvo en los alrededores de un lugar especial del espacio interplanetario, el punto Lagrangiano 1 (L1)¹⁶. Este punto está ubicado a un centésimo de Unidad Astronómica (1.5×10^9 m) desde la Tierra en la dirección Tierra-Sol, y su propiedad principal es que en este punto se cancela la fuerza gravitatoria ejercida sobre cualquier masa ya que la atracción gravitatoria de la Tierra compite con la del Sol, anulando la fuerza neta. Un cuerpo que se coloque en el punto L1 no sentirá gravedad puesto que aunque el Sol "quiere" atraerlo hacia sí mismo, la Tierra también realiza su contribución con igual intensidad pero en contra y entonces ambos efectos (opuestos) se cancelan.

Los instrumentos que lleva Wind son nueve. Uno de ellos es llamado SWE¹⁷ y su objetivo es medir cuántos iones y electrones viajan en el viento solar con una determinada velocidad. Utilizando las mediciones que se obtienen con este instrumento pueden calcularse (para protones y electrones): la velocidad, la temperatura, la densidad de partículas, etc.

4.4 Mediciones Simultáneas. El Proyecto Cluster

Después que en mediados de 1995, las cuatro primeras sondas espaciales del proyecto Cluster se destruyeron acci-

¹⁶ Para conocer más acerca de las propiedades de los puntos Lagrangianos puede ver en internet:

<http://www-spof.gsfc.nasa.gov/Education/wlagran.html>

¹⁷ En inglés 'Solar Wind Experiment'.

dentalmente medio minuto después del despegue, se reiniciaron las tareas de re-construcción para llevar a cabo este proyecto. Las sondas del nuevo Cluster fueron lanzadas el 16 de julio y el 9 de agosto de 2000 y su objetivo principal es realizar observaciones simultáneas de las propiedades del plasma en varios puntos cercanos, observa principalmente la magnetosfera terrestre. Esta misión está actualmente investigando estructuras de pequeña escala (tridimensionales) en el plasma del entorno terrestre, imposibles de observar con una única sonda. En particular investiga aquel plasma involucrado en la interacción entre el viento solar y la magnetosfera.

4.5 Propiedades del Viento solar en Altas Latitudes. La Sonda Ulysses

Retrasada por el desastre ocurrido durante el lanzamiento del Challenger, la sonda Ulysses comenzó su travesía en octubre de 1990. En la primer parte de su viaje tuvo como meta principal adquirir datos del viento solar en regiones que corresponden a latitudes polares del Sol; ninguna sonda espacial había explorado estas latitudes antes.

A bordo de esta sonda hay sensores que miden el campo magnético, radiación electromagnética y ciertas propiedades de las partículas presentes en el medio interplanetario.

4.6 ACE, un Centinela. TRACE y el Aumento de la Temperatura Coronal

El 25 de agosto de 1997 fue lanzado el satélite ACE¹⁸. Desde finales de 1998 se encuentra en la línea que une la Tierra con el Sol, en el punto L1. Uno de sus principales

objetivos allí es monitorear el paso de material eyectado por el Sol y poder predecir su impacto con la Tierra. Esta información es útil para predecir la repercusión que tendrá el plasma interplanetario sobre la cavidad magnética terrestre.

La sonda TRACE¹⁹ fue lanzada el primero de abril de 1998 y su objetivo principal es observar la región solar en la cual se produce el brusco incremento de temperatura, la región de transición que se encuentra entre la cromosfera y la corona. La novedad mas importante que introdujo esta misión ha sido observar estructuras magnéticas detalladas a través de imágenes de alta resolución espacial y temporal.

4.7 Argentina y su Proyecto Espacial

Desde 1994, la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)²⁰ desarrolla y administra tecnología satelital en la República Argentina. En colaboración con los Estados Unidos de Norte América, Italia y Brasil, la CONAE desarrolló un proyecto para la puesta en órbita de tres satélites (SAC-A, SAC-B y SAC-C)²¹. Los principales objetivos de este proyecto contienen la toma de fotografías de la Argentina tomadas desde grandes altitudes, las que pueden ayudar considerablemente al desarrollo socio-económico nacional. Las sondas brindan datos que son de gran utilidad para el desarrollo de la agricultura, ganadería, climatología, cartografía, prevención de catástrofes, etcétera.

SAC-B fue el primer satélite lanzado, y su lanzamiento se efectuó desde la base de la NASA en las Islas Wallops el 4 de

¹⁸ En inglés 'Advanced Composition Explorer'.

¹⁹ En inglés 'Transition Region and Coronal Explorer'.

²⁰ En internet <http://www.conae.gov.ar/caratula.html> puede encontrarse información de las actividades que lleva a cabo este organismo.

²¹ La sigla SAC significa 'Satélite de Aplicaciones Científicas'.

noviembre de 1996. El lanzador (Pegasus) que lo debía poner en órbita, inyectándolo hacia la órbita elegida, tuvo una falla en el sistema eléctrico durante la etapa en la que se debían disparar los pirotecnos para efectuar la separación del satélite, y el SAC-B quedó orbitando con una incorrecta orientación hacia el Sol que no le permitió restituir su energía, lo cual implicó la pérdida de contacto con la base en Tierra. A pesar de los grandes esfuerzos de la CONAE destinados al reestablecimiento de contacto con el satélite, no pudieron obtenerse resultados positivos.

El SAC-A fue lanzado el 3 de diciembre de 1998 y su misión permitió el entrenamiento de un grupo humano importante tanto para la preparación de los centros de control (hardware y software) como para el control de los satélites.

El SAC-C fue lanzado exitosamente el 21 de noviembre de 2000. Actualmente se reciben y analizan gran cantidad de sus datos. Esta sonda tiene a bordo varios instrumentos, por ejemplo una cámara para adquirir imágenes satelitales y un magnetómetro de gran precisión para medir el campo geomagnético. Este satélite forma parte de la denominada 'Constelación Matutina', la cual es una constelación internacional dedicada a la observación de la Tierra. Esta constelación está compuesta por tres satélites de los Estados Unidos de América y el SAC-C de la Argentina. La Constelación permite a los instrumentos a bordo de los distintos satélites obtener imágenes en forma casi simultánea y efectuar experiencias con la constelación de satélites del sistema de posicionamiento global (quizá más conocido por su sigla en inglés: Global Positioning System, GPS) para estudios atmosféricos de importancia, navegación, control de actitud y determinación de órbita. En caso de desastres naturales, tales como incendios, inundaciones, etc., ambas agencias programan los satélites para la adquisición de imágenes con la mayor eficiencia posible.

4.8 Las investigaciones e instrumentos en Argentina

La Argentina participa activamente en las investigaciones de la Física del Sol, del viento solar y de su interacción con la Tierra. En particular tanto en el Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, <http://www.iafe.uba.ar/>), perteneciente al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), como en las Facultades de Ciencias Exactas y Naturales (FCEN) y de Ingeniería (FI), de la Universidad de Buenos Aires (UBA), trabajan investigadores que se dedican a llevar a cabo análisis de datos, desarrollos teóricos y simulaciones numéricas de procesos vinculados con las áreas de la física solar, el medio interplanetario y la física de la magnetosfera.

El telescopio solar en H_{α} para Argentina (H_Alpha Solar Telescope for Argentina, HASTA) y el coronógrafo espejo para Argentina (Mirror Coronagraph for Argentina, MICA)²² se encuentran en el Observatorio Astronómico Félix Aguilar (OFA), en la provincia de San Juan, Argentina. El HASTA observa radiación emitida desde todo el disco solar, pero únicamente en la longitud de onda que corresponde a H_{α} . El MICA permite observar al limbo solar (solo observa el contorno del Sol y no el disco solar) entre 1.05 y 2 radios solares, medidos desde el centro del Sol. Las observaciones son realizadas en varias longitudes de onda y el instrumento dispone de una gran resolución temporal. Su nombre 'espejo' se debe a que este instrumento es el gemelo de un coronógrafo colocado en la sonda espacial SOHO. Las observaciones del MICA permiten hacer estudios de la evolución de

²² Más detalles de este instrumento pueden ser consultados en 'Observaciones de la Corona Solar, Ciencia Hoy, 14(81), 20-29, 2004', y también en internet: http://star.mpae.gwdg.de/mica/mica_home.htm.

diferentes estructuras localizadas en esta región tan cercana al disco solar, en particular observaciones de la expulsión de eyecciones de masa coronal. Ambos instrumentos son el producto de una colaboración entre Argentina y Alemania.

El telescopio submilimétrico solar (Solar Submillimeter Telescope, SST) es un instrumento ubicado muy cerca al MICA y al HASTA. Está en el 'Complejo Astronómico el LEoncito' (CASLEO), San Juan. El SST permite observar radiación solar en longitudes de onda largas, que corresponden a ondas de radio y es consecuencia de colaboraciones con Brasil.

En el CASLEO también opera un espectrómetro diseñado por el grupo de Aeronomía del IAFE en 1984. Este instrumento mide emisiones nocturnas de luz generadas en la alta atmósfera terrestre (airglow). El airglow es debido a reacciones fotoquímicas que conducen a moléculas excitadas, las cuales luego decaen emitiendo luz. El instrumento mide el espectro en el infrarrojo cercano, capturando parte la emisión producida desde dos capas a alturas de 87 y 95 km, respectivamente. Estas capas corresponden a la zona más fría de nuestra atmósfera (región de la mesopausa). A partir de la interpretación de los datos observados se determinan las temperaturas en cada una de las dos capas de emisión. Uno de los temas que se investiga con estas observaciones es la influencia de la actividad solar en estas alturas.

5

La Influencia del Sol sobre las Actividades Humanas

Como hemos expresado en la sección 1.4.4, algunos fenómenos ocurridos en el Sol pueden afectar la actividad geomagnética aquí en la Tierra. Debido a la configuración magnética del entorno terrestre, las regiones geográficas más afectadas del globo son aquellas que están cerca de los polos.

Uno de los principales objetivos actuales de la Física Espacial es comprender mejor estos fenómenos solares y los mecanismos físicos involucrados en la cadena de procesos: Sol - medio interplanetario - magnetosfera. Este conocimiento ayudará a mejorar los pronósticos de las condiciones físicas que rigen en el espacio cercano a la Tierra, y realizar predicciones confiables del denominado 'clima espacial'.

5.1 Algunos Hechos Negativos

El 13 de marzo de 1989 dejó de funcionar una de las líneas principales de distribución de energía eléctrica de Canadá y casi diez millones de casas dejaron de recibirla en Quebec. Esta línea de transmisión recibió una sobrecarga eléctrica debido a una modificación significativa del campo geomagnético, consecuencia del choque contra la Tierra de una gran nube de plasma disparada desde el Sol. El incidente podría haber sido evitado o atenuado disminuyendo la corriente de la línea si las condiciones geomagnéticas se hubieran podido predecir con la debida anticipación.

Dos satélites de comunicaciones cuyas tareas involucraban la administración del control aéreo y la transmisión de

imágenes de TV sufrieron daños en el año 1994, estos daños pudieron ser reparados. Uno de ellos retornó a sus operaciones habituales en el transcurso de unas horas, sin embargo el otro lo hizo recién después de algunos meses. Esto fue causado también por el impacto contra nuestro planeta de una nube de gas en estado de plasma arrojada por el Sol.

El satélite de comunicaciones Telestar 401 (AT&T), que fue lanzado en el año 1993 quedó inoperante durante la mañana del 11 de enero de 1997²³. Parte de los servicios que administraba este satélite fueron derivados hacia otros, pero no todos dispusieron de un canal alternativo y algunos fueron suspendidos. Cinco días antes había sido observada en la corona solar una gran eyección de masa por el instrumento LASCO del satélite científico SOHO. Estas estructuras de plasma que expulsa el Sol tardan típicamente entre 3 y 5 días desde que son expulsado hasta que alcanzan distancias similares a la distancia Tierra-Sol. Investigaciones posteriores mostraron que, debido a la expulsión de masa ocurrida en el Sol, antes del desastre se había producido una gran perturbación en el magnetismo terrestre a lo largo de todo el globo, un fenómeno llamado tormenta geomagnética.

5.2 ¿Qué es una Tormenta Geomagnética?

Las tormentas magnéticas terrestres (o tormentas geomagnéticas) son observadas desde hace mucho tiempo mediante magnetogramas, o mapas del comportamiento del campo magnético, situados en regiones cercanas al ecuador.

Estas tormentas se caracterizan por producir depresiones en la componente horizontal del campo geomagnético en

²³ Para mas detalles puede consultar en internet http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/cloud_jan97/att.html.

regiones ecuatoriales (ver Figura 10) y están asociadas con la observación de brillantes auroras que a menudo se extienden más allá de las zonas polares.

Ocurren generalmente cuando más partículas que las usuales se inyectan desde un sistema de corriente en la magnetosfera llamado 'corriente posterior'²⁴ hacia otro llamado 'corriente anular'.

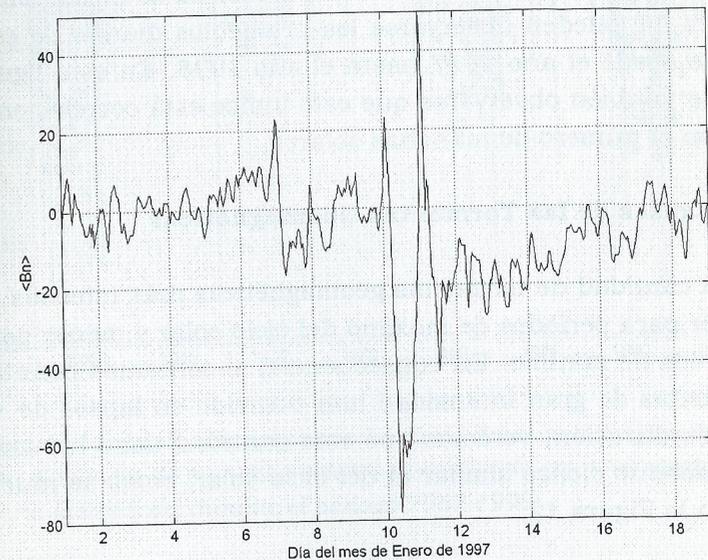


Figura 10: Gráfico que muestra la perturbación media de la componente horizontal del campo geomagnético (nombrada $\langle B_n \rangle$) en regiones ecuatoriales (de baja latitud terrestre). Puede observarse como $\langle B_n \rangle$ es fuertemente perturbado en las primeras horas del 10 de enero de 1997, durante la tormenta magnética que provocó daños a un satélite de comunicaciones.

En el comienzo de una tormenta magnética se produce un descenso global de la componente horizontal del campo

²⁴ En inglés 'Tail current'.

geomagnético, que puede durar entre 12 y 24 horas. Luego se produce una lenta recuperación de las condiciones normales que puede durar hasta 4 días.

Se ha definido un índice, Dst^{25} , que da una medida de la intensidad de la perturbación del campo magnético en el ecuador terrestre. El índice Dst se calcula desde el año 1957 promediando mediciones de varios magnetómetros colocados en bajas latitudes sobre la superficie de la Tierra. En la Figura 11 pueden observarse los promedios diarios de este índice desde el año 1957 hasta el año 1998. En esta figura puede también observarse que este índice está correlacionado con el número de manchas solares.

5.3 Causas de las Tormentas Geomagnéticas

La cantidad de tormentas geomagnéticas más intensas es mayor para períodos de máximo del ciclo solar y menor para períodos de mínimo. En consecuencia, si contamos cuántas tormentas de gran intensidad han ocurrido en lapsos de ~1 año de duración, veremos que esta cantidad tiene un comportamiento cíclico similar al del ciclo solar, como se muestra en la Figura 12.

²⁵ Aunque frecuentemente el nombre de este índice se escribe con s y t minúsculas, su origen es la sigla DST que proviene de las palabras en inglés 'Disturbance Storm Time' que puede ser traducido como 'Duración del Disturbio Magnético'.

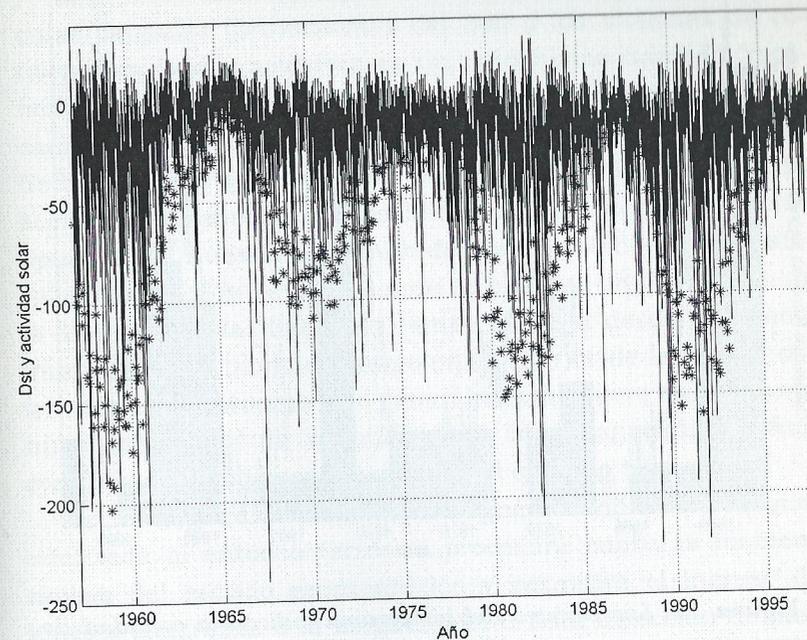


Figura 11: Evolución del promedio diario del índice Dst (línea) junto con el número de manchas solares normalizado con una escala arbitraria (asteriscos) durante el período 1957-1998.

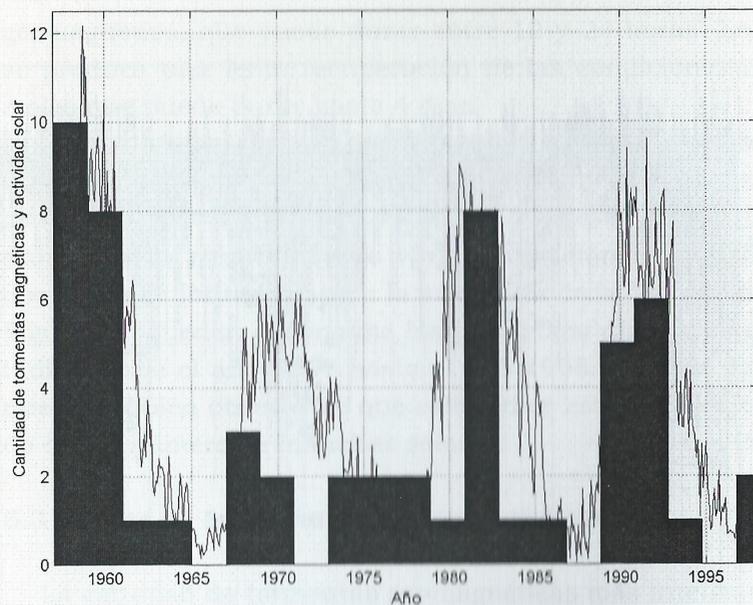


Figura 12: Los bloques del histograma indican la cantidad de tormentas geomagnéticas intensas ocurridas desde el año 1957 hasta el año 1998. La línea continua muestra el número de manchas solares en una escala arbitraria que permite observar su gran correlación con el número de tormentas geomagnéticas intensas.

Es importante notar que no todas las eyecciones de masa coronal producirán consecuencias significativas en la campo magnético de la Tierra. Por ejemplo en abril de 1997 fue observada una gran eyección solar que impactó contra la Tierra como una nube magnética, sin producir ningún efecto apreciable. Así son sólo algunas las eyecciones de masa solar que funcionan como disparadores solares de tormentas magnéticas terrestres.

El proceso físico que permite el ingreso directo de partículas cargadas (provenientes del Sol) a los sistemas de corriente en la magnetosfera es un mecanismo llamado 'reconexión magnética'. La reconexión magnética ocurre cuando cambia la conectividad de las líneas de campo magnético. Este fenómeno generalmente ocurre como consecuencia del acercamiento mutuo de dos líneas de campo con dirección opuesta. En nuestro escenario de 'viento solar - magnetosfera', la reconexión ocurre cuando se observa una inversión de la dirección de las líneas de campo al pasar desde el espacio interplanetario hasta el campo en el interior de la magnetosfera terrestre, proceso que generalmente ocurre cuando una nube magnética (la manifestación interplanetaria de una eyección de masa coronal) alcanza el entorno terrestre.

Así, la llegada de una nube magnética con la orientación adecuada al entorno terrestre producirá rupturas momentáneas del escudo geomagnético y permitirá el ingreso de iones y electrones a la magnetosfera. Esta inyección de partículas energéticas con carga eléctrica producirá un aumento en la intensidad de los sistemas de corriente existentes y, a su vez, desencadenará grandes fluctuaciones en los niveles del campo magnético terrestre.

Dado que sólo habrá reconexión significativa cuando el campo magnético de la nube magnética que se precipita contra la Tierra y la del campo magnético terrestre tengan direcciones aproximadamente opuestas, para optimizar un servicio de pronóstico del clima espacial, que anticipe las tormentas geomagnéticas, será crucial poder predecir esta orientación relativa.

5.4 Comentarios Finales

En períodos que corresponden al máximo del ciclo solar se observa una gran cantidad de violentas explosiones de

masa y campo magnético desde el Sol. Durante estas explosiones se emite una gran cantidad de nubes de plasma que, cuando alcanzan el entorno terrestre, pueden influir sobre actividades tecnológicas que lleva a cabo actualmente el hombre aquí en la Tierra. En particular pueden ocasionar grandes perjuicios sociales y económicos a nuestra sociedad moderna.

En particular algunas consecuencias de la llegada de estas nubes magnéticas al entorno terrestre son: daños en los dispositivos electrónicos de sondas espaciales, cortes en líneas de transmisión eléctrica en países ubicados en altas latitudes (ceranos a los polos), aumentos en las cantidades de partículas cargadas recibidas por los astronautas y pasajeros de aviones polares que viajan a gran altitud, modificaciones en las trayectorias de satélites que orbitan en el entorno terrestre, desorientación en sistemas de navegación basados en sistemas de posicionamiento global (GPS), retraso y problemas con las actividades desarrolladas en estaciones espaciales como la estación espacial Shuttle, interferencia en comunicaciones de radio y de telefonía con líneas de larga transmisión, inducción de corrientes eléctricas parásitas en largos caños de transporte de petróleo y gas que perjudiquen la operación con las mismas, etc.

En los últimos trescientos años el Sol se ha comportado cíclicamente, sin embargo hay mucha evidencia de que esto no ocurrió así durante todo el último milenio. Ocurrieron tres grandes períodos de comportamiento anómalo, dos de ellos con actividad solar muy débil y otra con una gran ferocidad: el Mínimo de Munder, el Mínimo de Spörer, y el Gran Máximo.

Debido a que el comportamiento del entorno terrestre depende de este ciclo podríamos preguntarnos: ¿Cuándo ocurrirá el próximo gran descanso solar?, o ¿Qué efectos producirá este descanso sobre la humanidad?, o aún más ¿Qué

sucedirá con nuestra tecnología cuando el Sol se agite y eventualmente ingrese en una etapa de violencia como la del Gran Máximo? ¿Tendremos que modificar en ese caso nuestra base tecnológica?

Por otro lado, una tarea aún no resuelta es la identificación temprana de los eventos solares geoefectivos. Los perjuicios ocasionados por estos eventos podrían minimizarse si fuera posible predecirlos y anunciar el próximo cataclismo magnético con la mayor anticipación posible. Actualmente se están dando los primeros pasos y existen sitios Web (por ejemplo <http://www.spaceweather.com/>) en donde puede encontrarse información sobre las condiciones actuales y el pronóstico del clima espacial. Sin embargo las predicciones de este sistema no son aún suficientes y deben progresar, basadas en el conocimiento de las futuras generaciones.

Quizá en un futuro cercano alguna sonda científica, apuntando con su instrumental hacia el Sol, pueda identificar un evento geoefectivo, calcular su velocidad y anticipar en que momento y con que intensidad afectará las actividades que desarrolla el hombre en la Tierra. De esta forma, la humanidad podrá tomar medidas para prevenirse de los efectos indeseados que el Sol puede ocasionarle. Así, conociendo más acerca del Sol, de su entorno, del viento solar, y de la magnetosfera, la humanidad podrá aumentar el control y el nivel de seguridad que tiene sobre su tecnología.

Bibliografía Básica Sugerida para Ampliar los Temas Tratados

- Beardsley T., *The way to go in space*, Scientific American, **280**, 60 (1999).
- Boido G., *Noticias del planeta Tierra. Galileo Galilei y la revolución científica*, A-Z editora, Argentina (1998).
- Dasso S., *Tormentas geomagnéticas de origen solar*, Ciencia Hoy, **12**, 67, 28 (2002).
- Eddy J.A., *The Maunder Minimum*, Science, **192**, 4245, 1189 (1976).
- Freeman J.W., *Tormentas en el espacio*, Cambridge University Press, New York (2002).
- Gulich J.M., Hernández A.M. y Machado M.E., *Intranquilidad en el Sol*, Ciencia Hoy, **11**, 6, 8 (1990).
- Hundhausen A.J., *The solar wind*, in 'Introduction to Space Physics', eds. Kivelson M.G., Russell C.T., Cambridge University Press, USA, 91 (1995).
- Parker, E.N., *The Physics of the Sun and the Gateway to the Stars*, Physics Today, **53**, 6, 26 (2000).
- Rodríguez L. y Stenborg G.A., *El clima espacial: ¿satélites y astronautas en peligro?*, Ciencia Hoy, **13**, 74, 10 (2003).

Romero G.E. y Combi J.A., *Los rayos cósmicos galácticos*, Ciencia Hoy, **8**, 48, 22 (1998).

Russell C.T., *A brief history of solar-terrestrial physics*, in 'Introduction to Space Physics', eds. Kivelson M.G., Russell C.T., Cambridge University Press, USA, 1 (1995).

Stenborg G.A., Rovira M.G. y Schwenn R., *Desde los Andes en la Argentina, Observaciones de la corona solar*, Ciencia Hoy, **14**, 81, 20 (2004).

Sitios de Internet para Ampliar los Temas Tratados

En el sitio <http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar> puede encontrarse una descripción muy detallada de las diferentes regiones solares; hay mucha información general acerca del Sol y de algunas misiones de la NASA que tienen como objetivo investigarlo.

En el sitio:

<http://www.spo.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html> puede encontrar una descripción de la investigación espacial del entorno terrestre. También hay aquí un índice muy interesante con muchos vínculos a otros sitios.

En: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space> se puede consultar un listado de proyectos asociados con el lanzamiento de sondas espaciales. Para cada proyecto hay vínculo a sitios que contienen información muy detallada de los mismos.

En:

<http://www oulu.fi/~spaceweb/textbook/content.html> puede encontrarse un libro de texto electrónico, referido principalmente al sistema solar, la magnetosfera terrestre, y a la actividad geomagnética. Contiene un capítulo dedicado a la Física del Plasma.

En: <http://space.rice.edu/ISTP/> hay una lista con vínculos a páginas relacionadas con el clima espacial y temas afines. Incluye una lista de vínculos a sitios educativos.

Magnitudes Importantes del Sistema Solar

Unidad Astronómica (UA, distancia Sol-Tierra)= 1.496×10^{11} m

Masa solar= 2×10^{30} Kg

Radio del Sol= 7×10^8 m

Masa de la Tierra= 6×10^{24} Kg

Radio de la Tierra= 6.4×10^6 m

Distancia Sol-Mercurio=0.4AU

El Sol ha sido venerado y estudiado desde la antigüedad. Es la estrella mas cercana a la Tierra y conocer su comportamiento es la puerta para entender el funcionamiento del resto de las estrellas de nuestro universo. A pesar de los grandes esfuerzos realizados para conocer sus misterios, aún permanecen muchas preguntas sin responder. El descubrimiento de un viento solar, permanentemente expulsado desde el Sol, solo data desde hace unos 50 años. Mas reciente aún es el descubrimiento de nubes magnéticas expulsadas desde el Sol, las cuales pueden desencadenar violentas tormentas geomagnéticas y dañar sistemas de comunicación, modificar el curso de sondas espaciales, incrementar los niveles de radiación recibidos por astronautas, etc. El motivo de estos efectos devastadores sobre las modernas tecnologías se debe a que estas nubes espaciales son capaces de abrir el escudo magnético de la Tierra, permitiendo un ingreso masivo de partículas energéticas al entorno terrestre. Este libro intenta divulgar, para un lector no especializado, el conocimiento del Sol, del viento solar y de su interacción con la Tierra, tanto a través de un recorrido histórico como de una puesta del día de ese conocimiento.

Sergio Dasso es Doctor en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires. Actualmente es investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y docente del departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Ha realizado un post-doctorado en el centro espacial Goddard (Maryland, USA) de la NASA y se ha especializado en astrofísica del medio interplanetario y Física Solar-Terrestre.

ISBN 987-1076-90-8



Cód. 179

