

LA FISICA DE PLASMAS EN EL ESPACIO

Jorge A. Pérez-Peraza

Instituto de Geofísica, UNAM, 04510, C.U., México D.F., MEXICO

Resúmen

Se describe en que consiste la Física Espacial de Plasmas en contraste con la de los Plasmas de Laboratorio. Se discute su interdependencia con otras disciplinas científicas, la metodología de investigación, los problemas fundamentales de estudio y su incidencia en la Tierra y el medio ambiente del hombre.

1. INTRODUCCION

Actualmente la aplicación de las Ciencias Espaciales y sus Tecnologías debe desarrollarse dentro de un marco de programas coordinados y orientados. Los países y regiones individuales deben basar sus actividades espaciales de acuerdo a sus prioridades y necesidades específicas, más que involucrarse en programas de países más avanzados cuyas prioridades puedan ser de muy diferente naturaleza. También, la investigación fundamental de nuestra vecindad espacial no debe ser vista como una actividad específica de países altamente desarrollados en este campo, sino como una actividad de interés general: últimamente, mientras mejor podamos entender nuestra vecindad espacial, mejor será el control que podamos tener sobre ésta para nuestras necesidades específicas. Aquí se discute uno de los principales campos de la investigación básica espacial, llamada la Física de Plasmas Espaciales (o Física de los Plasmas del Sistema Solar). La importancia de la Física de Plasmas Espaciales puede entenderse del hecho que más del 99% de la materia del universo está en un estado altamente ionizado, el estado llamado Plasma. Excepciones a esto son la materia de los planetas y de sus interfases. De modo que toda empresa en el espacio del hombre tienen lugar en un medio ambiente de Plasma.

Los plasmas del Sistema Solar están compuestos principalmente de protones, electrones, algunas especies de iones pesados, ondas electrostáticas e hidromagnéticas. La mayoría de estas están organizadas y controladas por fuertes campos magnéticos.

La Física de Plasmas Espaciales puede ser definida como el estudio de los fenómenos de plasmas que ocurren desde el interior del Sol hasta el borde exterior de la heliósfera.

La heliósfera es la cavidad que se extiende con el medio interestelar debido al viento solar. El Viento Solar es el flujo del plasma magnetizado generado en la corona solar. El Viento Solar fluye radialmente hacia afuera del Sistema Solar hasta que es detenido por su interacción con el medio interestelar. El Viento Solar también interactúa con diferentes objetos del Sistema Solar como son: planetas, cometas, asteroides, y rayos cósmicos. Cuando un planeta tiene un campo magnético intrínseco suficientemente elevado, esta interacción produce una envoltura planetaria conocida como Magnetósfera. La interacción del Viento Solar y las Magnetósferas se refleja en las atmósferas planetarias, modulando algunos de los fenómenos que tienen ahí lugar.

Los principales objetivos de la Física de Plasmas Espaciales son principalmente, el entendimiento de la Física Solar, la Heliósfera, la Magnetosfera y las Atmósferas Planetarias, así como el estudio de los procesos interactivos de fenómenos generados en el Sol, sus efectos sobre el Viento Solar y a su vez sobre el medio ambiente terrestre, ya que tales procesos revelan mecanismos

físicos básicos que tienen efectos importantes sobre muchas áreas de la actividad humana.

Las principales razones que motivan el estudio de la Física de Plasmas Espaciales son: 1) su interés intrínseco y significado intelectual para el profundo y básico deseo humano de conocer y entender nuestro medio espacial natural; 2) su valor para otras disciplinas científicas, ya que los plasmas espaciales no sólo son parte de un contexto global astrofísico, sino que también provee una extensión de condiciones prevalentes a escala de laboratorio, jugando un papel importante para "iluminar" la física general de plasmas. La mayoría de las actividades mundiales presentes y futuras en el espacio, desde los aspectos más prácticos hasta los problemas cosmogónicos más abstractos, están influenciados, en mayor o menor grado, por la Investigación de Plasmas Espaciales; 3) el impacto presente y futuro en el hombre y su tecnología, en particular como una fuente de aplicaciones, por ejemplo: las predicciones de fenómenos solares que afectan la vecindad de la tierra y sus implicaciones en las comunicaciones terrestres, meteorología, sistemas electrónicos de las naves espaciales e incluso posibles variaciones climatológicas.

2. INTERDEPENDENCIA ENTRE LA FÍSICA DE PLASMAS ESPACIALES Y OTRAS DISCIPLINAS CIENTÍFICAS

La Física de Plasmas Espaciales puede ser considerada en cierta medida, como la interfase que une, por un lado la llamada física espacial del sistema Solar con la física de plasmas del laboratorio y por otro lado con la astrofísica. De hecho la Física Espacial del sistema solar es la fusión sinérgica de varias disciplinas: física solar, física heliosférica, física magnetosférica, aeronomía (física ionosférica, termosférica y mesosférica), y la Física Solar Terrestre. Estas disciplinas se acoplan interactivamente por varios procesos básicos que caracterizan a los plasmas magnetizados.

Cuando los anillos de radiación de Van Allen y el Viento Solar fueron descubiertos en 1958 y 60 respectivamente, quedó claro que la exploración y el futuro entendimiento de los fenómenos del Sistema Solar se desarrollarían en término de la Física de Plasmas. Los fundamentos de la Física Moderna de Plasmas Espaciales fueron establecidos. De ahí en adelante evolucionarían en dos direcciones distintas pero paralelas: la fusión termonuclear controlada buscando una fuente de energía limpia y accesible, capaz de durar indefinidamente, y la Física de Plasmas Espaciales en búsqueda del entendimiento de los procesos naturales a escala global, en reconocimiento de la profunda y sensible dependencia del hombre de su vecindad espacial. Es ahora claro que las barreras para alcanzar la fusión termonuclear controlada al inicio de la era espacial en 1957, así como al presente, no está en nuestras limitaciones en Física Nuclear sino en nuestra ignorancia de la Física de Plasmas. Actualmente, la misma disciplina, la Física de Plasmas, define un lenguaje básico utilizado en la investigación espacial y en la fusión termonuclear.

Por otro lado puesto que el Sistema Solar es presumiblemente un microcosmos del espacio interestelar, del galáctico y extragaláctico, el estudio de las condiciones extraordinariamente variadas y los diversos fenómenos de plasma prevalecientes en el Sistema Solar está siendo de carácter fundamental para profundizar nuestro conocimiento en astrofísica. 36 años de investigación de plasmas espaciales nos han demostrado que muchos de los procesos Físicos observados en el Sol, Viento Solar y Magnetósferas Planetarias son importantes fuentes de analogía para la astrofísica; ejemplo, la actual convicción de que los pulsares, radio-galaxias y fuentes estelares de rayos-X tienen magnetósferas y nuestro conocimiento de los Vientos Estelares y galácticos son una consecuencia directa de los procesos alcanzados en estudio del Viento Solar. El análisis detallado de los procesos del Sistema Solar, por medio de observaciones *in situ* y Persepción Remota han hecho posible inferir in-

formación, así como el conocer las restricciones, para el estudio de fenómenos astrofísicos más distantes. Los plasmas del Viento Solar y las Magnetósferas Planetarias tienen la importante ventaja que pueden ser observadas cercanamente en muchos casos, e incluso el ser sondeadas localmente mediante detectores *in situ*. En contraste, la información del resto del universo sólo está disponible a nosotros por vía de radiación electromagnética o corpuscular. No obstante, los procesos de plasma en el Sol han sido hasta ahora estudiados solamente por técnicas de Percepción Remota, lo que constituye una etapa de transición entre el estudio de los plasmas espaciales y los plasmas astrofísicos.

El estudio de los plasmas espaciales proporciona oportunidades para aprender acerca de ciertos rangos de parámetros de los plasmas que son inaccesibles a ciertos experimentos de laboratorio, y para investigar el comportamiento de los plasmas que están libres del efecto de dispositivos contenedores. En algunas áreas, la investigación de plasmas del Sistema Solar ha dado contribuciones claves a la física de plasmas básica. En otros procesos, la contribución dominante ha provenido de la investigación de los plasmas del laboratorio. Una interdependencia mutua ha sido establecida entre estos dos niveles, enriqueciéndose el avance de la física de plasmas fundamental.

Esta complementación se debe al hecho de que ambas disciplinas exploran diferentes regiones de los parámetros físicos del plasma. Las configuraciones de plasma en el laboratorio se construyen intencionalmente, mientras que en el espacio los plasmas asumen formas espontáneas. Los plasmas de laboratorio son más densos que los plasmas espaciales. Los últimos están libres de efectos de frontera, en contraste con los plasmas de laboratorio, los cuales muy a menudo sufren de fuerte contaminación superficial. Debido a la diferencia de escala, el sondeo de los plasmas del laboratorio los disturba, en tanto que el sondeo de los plasmas espaciales no los afecta seriamente, a menos que la perturbación sea inducida intencionalmente como en el caso de los llamados Experimentos Activos Espaciales. Los plasmas calientes del laboratorio están regidos normalmente por el equilibrio estático, en tanto que los plasmas espaciales son flujos de gran escala fuertemente dependientes del tiempo. En base a tales diferencias y similitudes, las pérdidas turbulentas de partículas confinadas en los reactores de fusión y en los anillos de radiación de Van Allen han sido estudiados en paralelo. Así también, la dispersión de radiación electromagnética por los plasmas ionosféricos y en la fusión turbulenta con láseres han sido estudiadas en paralelo. En los Tokomaks, procesos de reconexión magnética similares a la de los plasmas espaciales, determinan la estabilidad global del plasma y afectan también el transporte microscópico. Los grandes dispositivos de plasma estático, en los laboratorios están estudiando interacciones haz-plasma, cuyos resultados están proporcionando información muy útil para interpretar algunos fenómenos de plasma, particularmente en la Física de Auróras. Las ondas de choque no-colisionales fueron estudiadas y parametrizadas originalmente en los plasmas espaciales. Al presente, estructuras particulares de ondas de choque están siendo investigadas en el laboratorio. Problemas relacionados con flujos hidromagnéticos turbulentos de gran-escala, aceleración y transporte de partículas energéticas son estudiadas más intensivamente en el espacio, mientras que estudios paramétricos de los efectos de geometría y el comportamiento de los plasmas en reconexión son mejor investigados en el laboratorio.

Actualmente, la astrofísica moderna está fundada en nuestro conocimiento básico de la física de plasmas. Nuestra experiencia con los plasmas espaciales y de laboratorio que pueden ser sondeados directamente, provee suficiente información de problemas generales de la física de plasmas.

permitiendo cotejar las teorías astrofísicas con observaciones relevantes. En otras palabras, sin las restricciones impuestas por la observación directa de los plasmas, muchas teorías de fenómenos astrofísicos estarían hechas en bases mayormente especulativas. El rango de parámetros encontrados en astrofísica es diferente del de los procesos de plasma de laboratorio, y la interpretación de la fenomenología no está afectada considerablemente por la cercanía de fronteras confinadoras, como en condiciones de laboratorio. Sin embargo, el rango de parámetros y condiciones de frontera en los plasmas del Sistema Solar están mucho más cercanos a los de la astrofísica, proporcionando así un laboratorio relativamente accesible, donde muchos de los fenómenos observados en astrofísica pueden ser vistos más cercanamente.

El estudio de los plasmas espaciales ha sido focalizado en dos puntos de vista interdependientes: procesos macroscópicos (comportamiento a gran-escala) y procesos microscópicos (comportamiento de pequeña-escala). El primero es estudiado por la magnetohidrodinámica (MHD) que describe al plasma como un fluido conductor, una simplificación que hace posible una eficiente descripción de la estructura a gran-escala y de la dinámica de los fenómenos hidromagnéticos. El comportamiento microscópico de los plasmas es estudiado por la Teoría Cinética de los plasmas, que trata al plasma como una colección de partículas cargadas individuales que colisionan entre ellas mismas con muy poca frecuencia, y que interactúan con los campos magnéticos y eléctricos autoconsistentes inducidos por el movimiento de las partículas. En particular, la Física Heliosférica ha motivado una considerable cantidad de investigación MHD, convirtiéndose en un verdadero laboratorio donde los flujos hidromagnéticos y sus interacciones, así como la turbulencia no-lineal han sido estudiados directamente. También la Teoría Cinética de Plasmas ha sido aplicada, por ejemplo, en procesos de aceleración y transporte de partículas, interacción onda-partícula etc.. Un tercer punto de vista es el híbrido que utiliza ambas, la Teoría Cinética y la MHD para resolver problemas específicos.

3. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.

El método científico empleado en la Física de Plasmas Espaciales es diferente del usado en el laboratorio. En el laboratorio, los experimentos son diseñados y controlados para comparación con la teoría; esto es solamente factible ocasionalmente con los plasmas espaciales (Experimentos Activos dentro de la Geósfera). En la Física de Plasmas Espaciales, los modelos matemáticos de fenómenos físicos se desarrollan para comparar con datos observacionales. En el caso particular de mediciones *in situ*, las fases evolutivas de investigación son:

- **Fase de Reconocimiento:** la penetración inicial y examen de cierto volumen del espacio por un vehículo espacial con instrumentación. El objetivo es el de *descubrimiento*.
- **Fase de Exploración:** examen exhaustivo de un cierto volumen del espacio, con objeto de una identificación completa de los procesos físicos prevalentes y una adecuada descripción fenomenológica.
- **Fase Resolutiva-intensiva:** evaluación cuantitativa de los procesos físicos y sus intercorrelaciones entre ellos, dentro del marco de modelos dirigidos a extraer inferencias predictivas de los fenómenos.

Para la investigación basada en técnicas de Percepción Remota la metodología que se aplica es la siguiente:

- **Fase de monitoreo preliminar:** con limitaciones inherentes de resolución espacial y de integración en la dirección visual. El objetivo es el de *descubrimiento*.
- **Fase de monitoreo global:** con suficiente cobertura y resolución para identificar procesos físicos básicos.
- **Fase Resolutiva-intensiva:** para modelaje cuantitativo y predictivo. El objetivo último de la investigación espacial es el de construir modelos adecuados para describir el fenómeno observado en consideración. Los modelos acertados deben describir los principales rasgos y peculiaridades del fenómeno estudiado. De ser posible deben poder describir también los detalles secundarios del fenómeno.

Cuando la investigación se acerca a la *fase resolutiva-intensiva*, su progreso puede ser evaluado por el nivel de entendimiento cuantitativo alcanzado de un cierto fenómeno, basado en el grado de concordancia entre sus predicciones con los eventos observacionales. Sin embargo, hasta ahora el entendimiento de un cierto fenómeno es normalmente "interminablemente abierto", ya que usualmente nuevas informaciones de nuevas misiones espaciales hacen más estrecho el rango de respuestas a cuestionamientos previos, pero al mismo tiempo dan lugar a la aparición de otros nuevos cuestionamientos.

Una vez que un entendimiento fenomenológico razonable ha sido alcanzado, entonces el modelaje cuantitativo se inicia. Esto es usualmente llevado a cabo en tres etapas:

- **Modelos Preliminares:** usualmente de naturaleza empírica, cuando relaciones básicas han sido establecidas, ya sea en bases estadísticas o invocando conceptos físicos sencillos. Estos modelos pueden o no ser correctos, pero su mera formulación implica un entendimiento moderadamente cuantitativo y dan lugar a la motivación para realizar nuevas observaciones de naturaleza mayormente orientada. La investigación se convierte entonces en un problema focalizado.
- **Modelos Funcionalmente acertados:** cuando basados en nueva información observacional, una descripción adecuada de cada proceso involucrado es alcanzada, permitiendo una comparación sistemática de la teoría con datos observacionales, tal que para cada dato de entrada ("input") proporcionan una situación correcta de salida ("output"). Los modelos funcionalmente acertados pueden usualmente utilizarse parcialmente con propósitos de previsión y proyección.
- **Modelos Predictivos:** cuando el umbral de utilidad práctica ha sido alcanzado. Estos deben ser capaces no sólo de proporcionar la esencia física global del fenómeno sino que también, al aplicarse a necesidades específicas deben de poder dar la mejor descripción cuantitativa posible para cada proceso físico particular, y ser lo suficientemente convenientes para propósitos previsivos y predictivos, así como para su extrapolación a otras escalas.

Los sistemas bajo consideración en la Física de Plasmas espaciales son abiertos, no-lineales y multidimensionales y las observaciones relevantes siempre sufren de falta de información en lo relativo a los estados y a los parámetros del sistema, por ejemplo, la falta *in situ* de medidas de altas latitudes heliográficas limita considerablemente el entendimiento de muchos procesos asociados al Viento Solar. La falta de mediciones *in situ* cerca del Sol limita las interpretaciones de la información disponible a partir de las técnicas de Persepción Remota, mediciones insuficientes en la cola geomagnética interna ha impedido que se tenga un entendimiento completo de como la atmósfera superior, la ionósfera y la magnetósfera están acopladas a la baja atmósfera. Por esta razón, el desarro-

llo de un modelo debe basarse en series de observaciones a largo término de un gran número de observables físicas.

Observaciones de un sólo evento de un cierto fenómeno puede darnos una imagen viva, pero sólo de un aspecto particular; basados en tal observación los modelos pueden ser fallidos en su aplicación a un subsecuente evento del mismo fenómeno. Consecuentemente los modelos deben desarrollarse en el contexto más global, tal que modelar sistemas físicos sea un acercamiento tan similar como sea posible a los sistemas físicos naturales. Solamente de esta manera puede esperarse que la falta de datos observacionales pueda ser suplantada por las predicciones de la teoría. Además, debido a la naturaleza no-lineal de los sistemas físicos muchos problemas no pueden ser resueltos analíticamente por la MHD o la Teoría Cinética de Plasmas, excepto en casos tan idealizados en los que la comparación con los datos observacionales no tiene ningún sentido. Esto es por lo que los modelos basados en simulaciones numéricas de sistemas físicos son herramientas necesarias en la fase resolutive-intensiva de la investigación. A este nivel, cuando un cuello de botella se encuentra en el desarrollo teórico, es cuando tiene sentido emprender Experimentos Activos en las cercanías de la vecindad terrestre, para complementar la falta de datos observacionales requeridos para el completo entendimiento de un cierto mecanismo físico.

La concordancia entre la teoría y los datos observacionales requiere del vigor intelectual en la investigación: los teóricos están obligados a producir modelos acertados y detallados, con especificaciones de mecanismos concretos, rangos específicos para los parámetros, determinación espacial y temporal de eventos individuales con predicciones concretas, en fin todo aquello que ayude a los experimentales en el diseño de las misiones espaciales. Por su lado los experimentales están obligados a diseñar misiones de muy alto retorno científico, para recolectar y reducir información significativa, de tal modo que el entendimiento y la interpretación de los datos observacionales pueda hacerse dentro del marco de un cierto contexto teórico. Los datos observacionales deben ser adecuadamente documentados, en términos de cantidades físicas significativas, almacenados y diseminados en una forma accesible a la comunidad científica. La estrategia seguida para una compilación más eficiente del retorno de datos significativos es la implementación de misiones orientadas hacia objetivos científicos bien focalizados. Cuando los objetivos científicos han sido claramente establecidos y documentados, el problema reside en como tener acceso a ellos y ésto es mayormente factible, tecnológicamente y económicamente, dentro del marco de programas coordinados internacionalmente, como ha sido en el caso por ejemplo, del SMY ("Solar Maximum Year" program), el IGBP ("International Geosphere-Biosphere" program) y el STEP ("Solar-Terrestrial Energy" program), etc..

4. PROBLEMAS FUNDAMENTALES-GENERALES EN LA FISICA DE PLASMAS ESPACIALES

La mayoría de los fenómenos de los plasmas espaciales involucra efectos no-lineales que son aún pobremente entendidos. Efectos no lineales significa efectos pequeños relativos a aquellos que determinan los procesos físicos principales; sin embargo en cierta medida, ellos tienen un cierto impacto dentro del contexto de la dinámica global del fenómeno. Una gran cantidad de trabajo analítico y numérico apoyado por modernas técnicas de computo es requerido para abordar la dinámica no-lineal. Entre los problemas físicos generales que se encuentran en los Plasmas del Sistema Solar, en el laboratorio y en astrofísica que aún requieren de mayores esfuerzos observacionales y teóricos están por ejemplo:

-Reconexión de Líneas de Campo Magnético: uno de los mecanismos más fundamentales de disipación de energía y procesos de reconfiguración en el universo. Tienen lugar en una variedad de formas, impulsiva, intermitente, y en forma estacionaria o dependiente del tiempo, en escenarios tales como la Atmósfera Solar, el Viento Solar, la Magnetopausa, Magnetocola, dispositivo de fusión y diversos sitios astrofísicos.

-Aceleración de Partículas cargadas: en cualquier lugar donde la turbulencia hidromagnética se forme, en ondas de choque, en reconfiguraciones magnéticas etc., se producen partículas energéticas: como es el caso en las fulguraciones solares, subtormentas magnéticas, arcos aurorales, ondas de choque interplanetarias, la onda de choque heliopausica etc..

-Confinamiento y Transporte de Partículas cargadas: los anillos de radiación de Van Allen y su distribución geomagnética, el confinamiento coronal, el transporte azimutal coronal, la propagación interplanetaria e interestelar etc., son algunos ejemplos donde tienen lugar estos procesos.

-Ondas de Choque no Colisionales: estas se originan en eventos solares de Transientes Impulsivos, superposición del flujo del viento solar con diferente velocidad, en la interacción de diferentes plasmas magnetizados (las ondas de choque en arco, la heliopausica, etc.).

-Capas Frontera: en contraste con la gravitación que tiende a producir estructuras esféricas, las interacciones electromagnéticas de plasmas de gran-escala producen estructuras filamentosas (o capas muy delgadas), lo que da una apariencia de estructura celular a diversas instancias astrofísicas. Tales capas frontera separatrices de flujo de plasma de diferentes propiedades, son tan delgadas que en general sólo pueden ser discernidas por mediciones *in situ*. El acoplamiento de sistemas de pequeña-escala con los de gran-escala determinan la transferencia y balance de masa, momento y energía entre los diferentes flujos, como es el caso de la disipación de energía por reconexión en láminas de corriente neutras etc..

- Plasmas magnetizados turbulentos: el inicio y desarrollo de la turbulencia en fluidos no magnetizados no está aún muy bien entendido. La interacción de turbulencia de plasma con campos magnéticos es aún más compleja; difusión en remolino, vorticidad, formación de plasmoides, convección compresible, son fenómenos que encontramos en la magnetopausa, en láminas de corriente neutra, en capas frontera etc..

- Microestructuras y macroestructuras de plasmas y Campos electromagnéticos: la descripción macroscópica de sistemas electromagnéticos no es completa sin los procesos de transporte y disipación debido a sistemas microscópicos. El acoplamiento de la Teoría Cinética con la MHD permite el estudio de procesos de transporte típicos en la magnetopausa, las capas fronteras y ondas de choque. La viscosidad, la conductividad eléctrica y los coeficientes de calor insertados dentro de las ecuaciones hidromagnéticas requiere de parámetros microscópicos de partículas individuales, libres caminos medios para colisiones y de difusión, giroradios y girofrecuencias; fenómenos paradigmáticos son por ejemplo, la reconexión de campo magnético y procesos de transporte en capas frontera. Así también la propagación de rayos cósmicos de baja energía y de partículas solares, está parcialmente dominada por microestructuras del Viento Solar.

- Dinámica de los tubos de flujo magnético: lo que involucra procesos de flujos de corriente alineados, que son ingredientes esenciales para los fenómenos de transferencia en sistemas magnetosféricos-atmosféricos, arcos magnéticos de los centros de actividad solar, arcos aurorales etc..

- Calentamiento Estocástico: lo que involucra procesos de interacción onda-partícula asociados al transporte anómalo y a la disipación de energía y momento en plasmas, así como el transporte selectivo de constituyentes

individuales de las atmósferas solar y terrestre (con las subsecuentes implicaciones básicas relativas a su composición química).

- **Ondas Magnetohidrodinámicas:** estas requieren de un estudio exhaustivo en diversos fenómenos fundamentales como es el calentamiento de la corona solar, la generación del Viento Solar, la estructuración de las oscilaciones magnetosféricas, acoplamiento magnetósfera-ionósfera, aceleración de partículas cargadas (aceleración tipo Fermi), etc.. En las Tablas 1-5 se presenta el Status del Entendimiento actual de algunos problemas de la Física Espacial en función de los modelos adecuados, acorde al artículo **Space Plasma Physics**, por Pérez-Peraza, J, Memorias de la Conferencia Espacial de las Americas, Tomo 1, pags. 96-113, 1990.

5. INSIDENCIA DE LA FISICA DE PLASMAS ESPACIALES EN LA TIERRA Y EN EL MEDIO AMBIENTE HUMANO

La Física Solar-Terrestre (STP) es el estudio de los procesos de generación, transferencia, almacenamiento y disipación de energía y transferencia de masa a través del sistema acoplado solar-terrestre, de regiones que se extienden desde el núcleo del sol hasta la superficie terrestre y la biósfera. El objetivo de ésta disciplina es el de entender y modelar con propósitos predictivos la cadena de causas y efectos característica de las relaciones Sol-Tierra, donde cada componente es una parte de un sistema complejo altamente interactivo, cuyo comportamiento global difiere significativamente de la mera superposición lineal de sus partes.

Nuestra estrella y nuestro planeta forman un sistema binario de relaciones irreversibles del sol sobre la tierra, que puede ser investigado con un detalle imposible de obtener para el estudio de cualquier otro sistema binario del universo. La radiación electromagnética solar total recibida en la tierra es de 1.73×10^{14} kW (Constante Solar), que es más de mil veces la potencia del Viento Solar recibida al nivel de la Magnetopausa ($\sim 10^{10}$ kW), y alrededor de un millón de veces la potencia del Viento Solar recibida al nivel de la tierra ($< 4.3 \times 10^7$ kW). Sin embargo, en términos de pérdida de masa por el sol, las correspondientes cantidades son 4.2×10^9 kg/s y 1.35×10^9 kg/s respectivamente. La totalidad de energía y masa liberada en eventos esporádicos de la actividad solar, los llamados "Transientes Solares", dan una contribución en promedio por evento de 1.8% y 3% respectivamente del Viento Solar liberado.

Durante las esporádicas subtormentas magnéticas $\sim 10^9$ kW por evento son liberados dentro de la geósfera, en tanto que la potencia antropogénica puede alcanzar 5×10^8 kW. Tales contrastes agudos entre la energía corpuscular y la electromagnética pareciera indicar que nada más la luz solar afecta significativamente el sistema terrestre. Sin embargo, es bien sabido que a pesar de la naturaleza quasi-constante de la radiación solar sobre la tierra, nuestro geoespacio es altamente variable. Actualmente sabemos que tal variabilidad está asociada con la variabilidad de las emanaciones solares, principalmente de las variaciones del Viento Solar. Aunque el contenido energético del Viento Solar en minúsculo relativo al de la radiación solar, estas variaciones producen señales esporádicas e inclusive intermitentes, que hacen que el sistema geosférico reaccione de una manera altamente no-lineal. Esto indica que nuestro medio ambiente terrestre es un sistema tan sensible que aún efectos de segundo orden pueden disturbarlo. De hecho la atmósfera superior es una capa activamente dinámica donde flujos variables de masa y energía son procesados, y cuyos efectos se dispersan a bajas altitudes y a otras latitudes y longitudes geográficas, proveyendo a la magnetósfera con cantidades substanciales de masa y energía. Es así que fenómenos tan espectaculares como las subtormentas magnéticas y las auroras son producidas esporádicamente.

En lo relativo a la radiación electromagnética solar, es bien sabido que pequeñas variaciones en la incidencia de la radiación, ya sea en cantidad o en distribución produce variaciones en los parámetros orbitales de la tierra. Tales efectos han sido asociados con las principales edades glaciales. Además, la falta de Actividad Solar durante varias décadas en la edad media afectó la cantidad de radiación solar recibida, produciéndose la llamadas pequeñas edades glaciales. De hecho, la luminosidad solar es solamente de naturaleza casi-constante; durante el último ciclo solar una variación global de ~ 0.25 fué medida. En periodos de una máxima Actividad Solar el extremo de alta energía del espectro electromagnético se incrementó considerablemente. Sin embargo ese rango energético representa solamente el 2% del espectro, además de que es absorbido preferencialmente por la atmósfera terrestre. No obstante, estas minúsculas variaciones, aumentando y disminuyendo durante los máximos y mínimos de Actividad Solar son suficientes para provocar expansiones y contracciones de la atmósfera terrestre. Esto a su vez resulta en una amplia variedad de alteraciones como por ejemplo, las órbitas de los satélites (e.j. la del SKYLAB en 1978).

Puesto que la orientación del campo magnético interplanetario, relativa a los ejes geomagnéticos está asociada a la regulación de la tasa de transferencia de energía y momento del Viento Solar dentro de magnetósfera, se sigue de ello que todo disturbio del Viento Solar es reflejado como disturbios magnetosféricos que a su vez son transmitidos a las diferentes capas de la atmósfera, principalmente sobre las regiones polares. La variabilidad del Viento Solar aparentemente estacionario es debido a la interacción con chorros de alta velocidad del mismo Viento Solar que emanan de los hoyos coronales (de donde extraen tal cantidad de energía que esas regiones de la corona solar se hacen más frías que las áreas circundantes), así como también con otras eyecciones de los fenómenos de la Actividad Solar, en los llamados Eventos Transientes, tales como: ondas de choque, plasmoides y partículas de alta energía.

Las ondas de choque y los plasmoides disturbian directamente el campo magnético interplanetario, en tanto que los fotones y las partículas energéticas que llegan a la vecindad terrestre varios minutos después del evento solar, causan severos disturbios en el estado de ionización de las capas atmosféricas, alterando así la electrificación de los mismos. Fenómenos bien conocidos como los llamados "Disturbios Ionosféricos Repentinos" son producidos por esta radiación energética. En particular, la interacción de ondas de choque y plasmoides con el sistema terrestre es altamente sensible a la posición relativa entre el evento Transiente en el sol, la lámina de corriente neutra heliosférica y la orientación del campo magnético interplanetario al nivel de la tierra. Esta interacción actúa como un detonador de subtormentas magnéticas. Las ondas de choque y los plasmoides también están asociados a los decrecimientos de la intensidad de los rayos cósmicos galácticos (Efecto Forbush), con sus subsecuentes implicaciones en la dinámica atmosférica.

Las modulaciones durante el ciclo solar de los disturbios del Viento Solar pueden apreciarse de:

- el número de eventos Transientes y de ondas de choque, difiere por un factor de 10% en el máximo y mínimo de Actividad Solar.
- la intensidad de las partículas energéticas solares varía proporcionalmente al comportamiento de la Actividad Solar.
- la intensidad de los rayos cósmicos galácticos en la vecindad de la tierra es inversamente proporcional al comportamiento de la Actividad Solar. A pesar de estos dramáticos disturbios del Viento Solar estacionario, las desviaciones medidas con respecto a las propiedades promedio del viento solar son menores al 10%, al menos en el plano de la eclíptica.

Esto implica que el Viento Solar no tiene manera de disturbar la geósfera en forma lineal, sino únicamente en forma de un cierto tipo de efectos esporádicos de "piquetes".

Desafortunadamente no hay una correlación uno a uno entre estos efectos de "piquetes" esporádicos y las propiedades de la Actividad Solar tales como por ejemplo; las manchas solares. Las correlaciones existen solamente en bases estadísticas. En que medida estos efectos de "piquete" afectan al medio ambiente del hombre y su tecnología ? Es precisamente la STP (Física Solar Terrestre) en que los beneficios del entendimiento de los fenómenos de plasmas espaciales pueden medirse en términos humanos sociales, económicos y tecnológicos. Algunas de las implicaciones más típicas de las relaciones Sol-tierra que deben ser estudiadas con fines predictivos son:

- Cambios en las propiedades del Viento Solar (principalmente densidad, composición y velocidad) debido a disturbios solares que afectan sensiblemente el sistema global magnetosférico-atmosférico, lo que puede traducirse en alteraciones serias de instrumentación espacial y terrestre. De hecho la potencia contenida en el Viento Solar estacionario es $\sim 0.1 \text{ mW/m}^2$ en tanto que los chorros de alta velocidad del Viento Solar pueden alcanzar 3 mW/m^2 al nivel de la magnetopausa con un factor de transmisión pequeño a la magnetósfera. En contraste, la potencia de la radiación solar es de $1.37 \times 10^6 \text{ mW/m}^2$, sin embargo, los efectos de piquete del Viento Solar perturbado pueden hacerse sentir debido a dos principales factores: primero, porque la energía se concentra principalmente en una banda latitudinal muy estrecha de las áreas polares, cuyas superficies representan alrededor del 1% de la superficie total de la tierra, y segundo porque la energía es almacenada en la magnetocola por varias horas antes de ser liberada de forma repentina. En base a estos factores, la potencia transmitida a la atmósfera se amplifica por lo menos en un orden de magnitud.
- Cuando tienen lugar incrementos impulsivos de las emisiones de alta frecuencia de la radiación solar, al menos un incremento de $\sim 1 \text{ mW/m}^2$ se recibe en la tierra afectando los sistemas de comunicación de larga distancia (HF). Aunque las comunicaciones Tierra-Satélite (GHz) no están basadas en la reflexión ionosférica sin embargo son afectados por centelleos producidos en las regiones ionosféricas ecuatoriales.
- Cuando un evento de partículas solares tiene lugar, la intensidad de flujo de partículas energéticas es al menos tres veces mayor que el fondo de radiación cósmica galáctica. Las partículas solares penetran en la mesósfera y estratósfera donde por ionización modifican la composición química de estas capas, lo que puede durar semanas e incluso meses. El drástico incremento de intensidad electrónica en la baja ionósfera produce absorción de radio-ondas que son normalmente reflejadas a ese nivel. Interrupciones de las radiocomunicaciones pueden ocurrir por varios días consecutivos si la fuente de partículas solares permanece activa. La penetración de estas partículas en regiones polares produce los llamados eventos PCA (Polar Cap Absorption) aproximadamente tres horas después del evento solar, que es el tiempo promedio del vuelo Sol-Tierra de protones de $\sim 10 \text{ MeV}$.
- La tasa de ionización a muy bajas altitudes la determina la radiación secundaria de los Rayos Cósmicos Galácticos, en períodos de Efectos Forbush, el decremento del flujo incidente resulta en cambios de la conductividad eléctrica en estas capas bajas. Modificaciones de la conductividad eléctrica alteran la tasa de formación de nubes y eventualmente el albedo puede ser modificado, lo que presumiblemente pueden tener implicaciones en el clima terrestre.
- La repentina deposición localizada de energía de los chorros de alta velocidad del Viento Solar produce auroras polares alrededor de tres días

después del disturbio al nivel del Sol. Debido a la precipitación en éstas zonas de partículas cargadas, se crea un sistema de intensas corrientes ionosféricas a una altitud de ~ 100 a 150 Km, lo que es conocido como el "Electrojet Auroral" y cuya intensidad puede alcanzar millones de amperes. Estas corrientes producen disturbios magnéticos que pueden ser detectados en altas latitudes de la superficie terrestre. Por inducción en la corteza resistiva de la tierra se crean diferencias de potencial de ~ 5 v/Km. Estos pueden traer graves consecuencias en sistemas conductores de largas dimensiones, tales como gaseoductos, oleoductos, cables telefónicos etc.. También, los estudios geológicos en búsqueda de anomalías de la superficie terrestre (que son indicativos de petróleo y otros recursos naturales), pueden ser seriamente alterados por las corrientes inducidas en la tierra durante las subtormentas magnéticas. En el caso de estudios de exploración muy costosos estos deben basarse en datos de predicción de la Actividad Solar y Geomagnética.

- Flujos de partículas energéticas (de algunos KeV de energía) generados durante las subtormentas magnéticas, producen incrementos de carga eléctrica en las naves espaciales. Diferencias de resistividad eléctrica entre diferentes sitios de la nave espacial pueden conducir a diferencias de potencial hasta de ~ 20 kV, y por lo tanto producir daños severos en los sistemas electrónicos.

- Las tormentas geomagnéticas solamente producen corrientes quasi-estáticas (10-15 amperes) que son incapaces de producir corrosión en los ductos, pero pueden producir serios problemas durante su monitoreo en los controles electrónicos. Grandes Tormentas Magnéticas como la de mayo de 1969, agosto de 1972 etc., han sido responsables de los apagones temporales y daños de estaciones transformadoras. Dado que los transformadores de potencia están a nivel terrestre, grandes corrientes DC inesperadas (~ 100 amperes) pueden fluir en el blindaje, induciendo entonces saturaciones de medio ciclo en la parte interna, lo que a su vez conduce a muy grandes caídas de voltaje. El sobrecalentamiento y subsecuente destrucción de los aisladores provoca que algunos transformadores tengan que ser puestos fuera de servicio de la red de suministros.

- Durante las Subtormentas Aurorales, en que grandes campos eléctricos ionosféricos se producen a elevadas altitudes (> 100 Km), tiene lugar un desplazamiento de los iones ("Ion Drag"), de tal manera que su fricción con los átomos neutros provoca cambios en el sistema de los vientos neutros (a una altitud de ~ 200 Km), lo que parece estar al origen de los cambios drásticos en la vorticidad de la circulación atmosférica.

- En zonas aurorales a altitudes de 90 Km, la atmósfera neutra es directamente calentada por electrones energéticos en tanto que a altitudes entre 100 - 150 Km se calienta por el Efecto Joule asociado con las corrientes ionosféricas. En períodos de intensa actividad geomagnética, estos sobrecalentamientos funcionan como ondas de choque termales. A consecuencia de esto, ondas atmosféricas se propagan a otras latitudes y altitudes resultando un incremento de temperatura y densidad (entre 150 - 600 Km de altitud). Estos incrementos reducen la vida media de los satélites de baja órbita que atraviesan estas regiones, como ha sido el caso del GEO-5, el inesperado cambio de órbita del SKYLAB debido a un gran número inesperado de manchas solares en 1978. Otro efecto colateral de estas ondas generadas, es la modificación de la concentración relativa de los constituyentes menores atmosféricos.

- Dado que los sistemas electrónicos son sensibles a la dosis de radiación acumulada de partículas energéticas, y puesto que se planea que los satélites de aplicación duren largos períodos de tiempo en vuelo, es claro que el daño inducido por las partículas de las Fulguraciones Solares y por las partículas inyectadas durante Tormentas y Subtormentas geo-

magnéticas, así como su exposición a los anillos de radiación de Van Allen, ella podría constituir problemas serios en el futuro. También astronautas y pasajeros de vuelos estratosféricos a través de zonas polares pueden tener serios problemas en la planeación futura de su familia por problemas de esterilidad. Las repercusiones pueden ser mucho más peligrosas para astronautas expuestos por varios días a esta clase de radiación energética:

- Durante el evento de protones de la Fulguración de agosto de 1972, la dosis de radiación de partículas y de fotones a nivel de la magnetósfera alcanzó niveles mucho más altos que los permitidos por los estándares de salud, e incluso mayores que en algunos accidentes en reactores nucleares

- Las propiedades de arreglos de celdas solares pueden degradarse hasta en un 15%, después de cinco días de vuelo en una órbita geosincrónica a través de los anillos de Van Allen, además grandes eventos de protones durante las Fulguraciones Solares pueden ser responsables ~ 5% de pérdida en eficiencia en el curso de unos cuantos días. También, de los proyectos de grandes arreglos de celdas solares en el espacio para transmitir energía solar a la tierra, deben tomar en consideración este tipo de degradación por partículas energéticas. Además, la potencia absorbida en la atmósfera de uno de esos eventuales haces en el rango de las microondas sería al menos de 1 mW/m^2 ; esto es del mismo orden de la fracción más energética de la radiación solar (produciendo ionización y calor arriba de 100Km de altitud), lo que inexorablemente produciría efectos no deseables.

- Algunos estudios de naturaleza totalmente estadística indican que, cierta actividad ciclónica se presenta en la estratósfera un día después de que un Sector Frontera del Viento Solar atraviesa la tierra. También la precisión de los métodos de rastreo meteorológico se altera con el paso de un Sector Frontera del campo magnético interplanetario debido aparentemente a que estos métodos no consideran tales efectos de vorticidad. También un 20% de aumento en el campo eléctrico vertical en el sistema de corrientes en el aire (~ 3 Km por arriba del nivel del mar) ha sido inferido en bases estadísticas como consecuencia del pasaje de un sector Frontera-Magnético.

- Varios parámetros del viento y el clima terrestre exhiben acoplamientos con periodicidades de 11 y 22 años con fenómenos de la actividad solar. Sin embargo tales correlaciones de carácter estadístico son aún de naturaleza especulativa puesto que los mecanismos físicos básicos no han sido aún elucidados.

Además de los disturbios de los Sistemas de Plasmas del Geoespacio desde el exterior, existen también disturbios antropogénicos inducidos por la creciente industrialización, que alcanzan una potencia de ~ 110 kW, sin considerar la potencia latente del armamento nuclear.

- Con objeto de tener algún control sobre nuestra vecindad espacial, las técnicas predictivas deben ser mejoradas. Con ese objeto, una gran cantidad de trabajo teórico, modelaje y simulaciones numéricas apoyadas por observaciones *in situ* y por Percepción Remota son requeridas. Una herramienta muy útil ha sido el desarrollo de los llamados Experimentos Activos Controlados, para producir en el espacio situaciones y procesos de fenómenos que no son reproducibles hasta ahora a nivel de laboratorio, debido a las grandes diferencias de escala y del rango de parámetros. Estos estímulos controlables en regiones específicas de la magnetósfera y atmósfera consisten en general en inyecciones de protones, electrones y constituyentes más complejos, así como de ondas de muy diversa naturaleza. Sin embargo estos experimentos no pueden efectuarse de forma indiscriminada sin estudios previos de la posibilidad de producir colateralmente efectos no deseables en nuestra vecindad espacial, los que se em-

piezan a realizar dentro del marco de programas coordinados a escala internacional.

Muchos de los fenómenos descritos pueden tener una influencia apreciable sobre la vecindad inmediata del hombre, su tecnología y la sociedad en general. Su interpretación no ha sido establecida cuantitativamente de manera suficientemente confiable. Estamos ahora más concientes que nunca que los procesos físicos operativos en los plasmas de nuestra vecindad espacial, se encuentran en todo el universo y que su entendimiento puede ser usado para modelar el entendimiento de otros sitio astrofísicos.

Debe de admitirse que una consecuencia prácticamente inevitable de la evolución que está teniendo lugar en las ciencias espaciales es la necesidad de que los científicos latinoamericanos y del tercer mundo en general realicen un salto cuántico desde el estado básico para su participación en los proyectos conjuntos mundiales en investigación espacial, de lo contrario seguiremos indefinidamente como eternos compradores de tecnologías derivadas de la investigación fundamental.

Table 1.
 Understanding Status in Solar Physics

PROBLEM	A = Preliminary Models		B = Accurate-Functional Models		C = First Predictive Models	
	RECOGNITION PHASE ELEMENTARY COMPREHENSION	EXPLORATION PHASE PHENOMENOLOGICAL COMPREHENSION	QUANTITATIVE, INTENSIVE-RESOLUTIVE PHASE			
			A	B	C	
DISAGREEMENT OF OBSERVATIONAL AND THEORETICAL NEUTRINO FLUX	X	O				
NEUTRINO FLUX VARIATIONS	X					
SOLAR LUMINOSITY VARIATIONS		X				
ORIGIN OF SOLAR MAGNETIC FIELDS			X			
LARGE SCALE CIRCULATION			X			
SOLAR CONVECTION			X			
GLOBAL OSCILLATIONS (HELIOSEISMOLOGY)			X	O		
CHAIN OF PROCESSES RELATING THE SOLAR INTERIOR TO LAYERS OF THE SOLAR ATMOSPHERE	X	O				
PHOTOSPHERIC SECTORIAL STRUCTURE AND MAGNETIC FIELD BOUNDARIES			X	O		
VARIABILITY OF MAGNETIC FIELD PROPERTIES RELATED TO DISTANCE OF BOUNDARY SECTORS		X				
RELATIONSHIP OF BACKGROUND MAGNETIC FIELD TO CHROMOSPHERIC CORONAL AND INTERPLANETARY MAGNETIC STRUCTURES			X			
CORONAL HOLES STRUCTURES ANCHORED FAR FROM BOUNDARY LAYERS AT HIGH LATITUDES		X				
RELATIONSHIP BETWEEN LARGE-SCALE MAGNETIC FIELD AND CHROMOSPHERIC AND CORONAL STRUCTURES			X			
PHOTOSPHERIC GRADIENT TEMPERATURE	X					
DYNAMICS, STABILITY AND ENERGY BALANCE OF SUNSPOTS			X	O		
EVOLUTION OF ACTIVE REGIONS			X	O		
THE INHOMOGENEOUS STRUCTURE OF CHROMOSPHERE			X	O		
BASIC FLARE MECHANISM ENERGY BUILD UP, STORAGE AND DISSIPATION			X			
THERMAL EVOLUTION OF FLARE PLASMA IN CHROMOSPHERIC AND CORONAL FIELDS			X			
THE PRE-FLARE SITUATION AND TRIGGER MECHANISM		X				
DISSIPATION OF MAGNETIC ENERGY IN EFFICIENT PARTICLE ACCELERATION PROCESSES			X	O		
LOCATION OF FLARE ENERGY IN EFFICIENT PARTICLE ACCELERATION				X		
RELATIONSHIP BETWEEN FLARE MAGNETIC FIELD EVOLUTION AND PHOTON AND PARTICLE PRODUCTION			X	O		
ORIGIN OF MAGNETIC FLUX TUBES (FLUXULES)			X	O		
THE VELOCITY FIELD IN THE TRANSITION ZONE AND CORONA			X	O		
DIFFERENTIAL LOCAL ELEMENTAL AND ISOTOPIC COMPOSITION OF SOLAR ATMOSPHERE			X			
THE PROPERTIES OF PROMINENCES			X	O		
CORONAL HEAT MECHANISMS TRANSPORT AND DISSIPATION			X	O		
CORONAL MAGNETIC FIELDS: LARGE-SCALE WEAK FIELD AND SMALL-SCALE STRUCTURES			X	O		
CORONAL ROTATION			X			
INHOMOGENEOUS CORONAL STRUCTURES			X	O		
MASS EJECTIONS (CORONAL TRANSIENTS)			X			
CORONAL EXPANSION			X			
HEATING AND ACCELERATION OF SOLAR WIND			X			
SOURCES OF HIGH SPEED STREAMS OF SOLAR WIND		X	O			
STRUCTURE AND DYNAMICS OF CORONAL CONDENSATIONS			X	O		

X = main status O = some present or near-future attempts

Table 2.
Understanding Status in Heliospheric Physics

A = Preliminary Models

B = Accurate-Functional Models

C = First Predictive Models

PROBLEM	RECOGNITION PHASE	EXPLORATION PHASE	QUANTITATIVE, INTENSIVE-RESOLUTIVE PHASE		
	ELEMENTARY COMPREHENSION	PHENOMENOLOGICAL COMPREHENSION	A	B	C
GENERATION OF SOLAR-WIND			X	O	
SPATIAL AND TEMPORAL VARIATIONS OF SOLAR WIND TURBULENCE SPECTRUM			X		
EVOLUTION OF SUBSONIC TO SUPERSONIC VELOCITY OF THE SOLAR-WIND			X	O	
ANGULAR MOMENTUM OF SOLAR-WIND AND LOSS OF ANGULAR MOMENT BY THE SUN		X	O		
RELATION OF SOLAR-WIND TO CORONAL HOLES AND ACTIVE REGIONS		X	O		
INTERACTION OF HIGH SPEED STREAMS WITH STATIONARY SOLAR-WIND				X	O
HEAT CONDUCTION IN THE SOLAR-WIND			X		
INTRINSIC TURBULENT NATURE OF THE SOLAR-WIND			X	O	
HIGH-HELIOSPHERIC LATITUDE SOLAR-WIND (OUT OF THE ECLIPTIC PLANE)	O				
IN-ECLIPTIC SOLAR-WIND BEYOND 40 A.U. AND WITHIN 0.3 A.U.	O				
HIFLOWPAUSE AND SOLAR-WIND INTERACTION WITH INTERSTELLAR MEDIUM	O				
CHEMICAL COMPOSITION OF SOLAR-WIND AND ITS RELATION TO CORONA			X		O
SHORT-TERM SOLAR WIND VARIATIONS AND RELATION TO TRANSIENT EVENTS				X	
LONG-TERM SOLAR WIND VARIATIONS AND RELATION TO SOLAR ACTIVITY			X	O	
EVOLUTION OF SOLAR WIND-SECTOR STRUCTURES TANGENTIAL AND ROTATIONAL DISCONTINUITIES, NEUTRAL CURRENT SHEETS			X		
INTERPLANETARY DIFFUSIVE ACCELERATION OF ENERGETIC PARTICLES				X	
MODULATION OF HIGH ENERGY GALACTIC COSMIC RAYS				X	O
ORIGIN OF THE ANOMALOUS COMPONENT PRESENCE OF INTERSTELLAR IONIZED AND NEUTRAL ATOMS		X			
INTERACTION OF SOLAR-WIND WITH PLANETS			X	O	
INTERACTION OF SOLAR-WIND WITH COMETS			X		
RELATION OF SMALL-SCALE TO LARGE SCALE PROCESSES IN THE SOLAR-WIND		X	O		
COSMIC RAY CONDITIONS AT MIDDLE AND HIGH HELIOCENTRIC LATITUDES AND OVER SOLAR POLES	O				
MODULATION OF LOW ENERGY COSMIC RAYS		X	O		
SOLAR CONNECTION WITH TRANSIENT INTERPLANETARY PROCESSES			X	O	

X = main status O = some present or near-future attempts

Table 5.
Understanding Status of Solar-Terrestrial Physics

A = Preliminary Models

B = Accurate-Functional Models

C = First Predictive Models

PROBLEM	RECOGNITION PHASE ELEMENTARY COMPREHENSION	EXPLORATION PHASE PHENOMENOLOGICAL COMPREHENSION	QUANTITATIVE, INTENSIVE-RESOLUTIVE PHASE		
			A	B	C
LONG-TERM CLIMATIC CHANGES DUE TO CHANGES IN SOLAR CONSTANT		X			
RELATIONSHIP BETWEEN SOLAR ACTIVITY AND WEATHER AND CLIMATE	X				
UPPER AND LOWER ATMOSPHERE COUPLING EFFECTS ON WEATHER AND CLIMATE			X		
OZONE VARIATIONS WITH UV, COSMIC RAYS VARIATIONS AND GEOMAGNETIC ACTIVITY				X	
EFFECT OF OZONE CONCENTRATION ON GLOBAL CIRCULATION PATTERN				X	
INFLUENCE OF GLOBAL SOLAR, HELIOSPHERIC, MAGNETOSPHERIC AND UPPER ATMOSPHERIC VARIABILITY ON THE LOW-ATMOSPHERE, BIOSPHERE AND HUMAN TECHNOLOGY		X			
EFFECTS OF SHORT-TERM SOLAR VARIABILITY IN THE TROPOSPHERE					
ANTROPHOGENIC EFFECT ON THE LOWER ATMOSPHERE			X		

X= main status 0= some present or near-future attempts