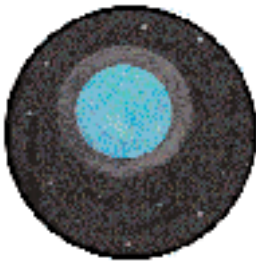


Corazas magnéticas



Algunos planetas poseen un escudo protector: su campo magnético. Es gracias a estas magnetosferas que la vida puede existir en la Tierra, pero también dan origen a interesantes fenómenos en otros planetas de nuestro Sistema Solar.

Xóchitl Blanco Cano

En el Sistema Solar todos los planetas, salvo Venus y Marte, poseen un intenso campo magnético de origen interno, y están rodeados por corazas magnéticas que los protegen de la llegada directa de partículas y radiación. Estas corazas se llaman “magnetosferas”, y han sido exploradas con sondas espaciales.

Las magnetosferas se forman debido a la interacción del plasma de “viento solar” con los campos magnéticos planetarios. Este plasma es la expansión de la corona solar que, al ser tan caliente (un millón de grados) no puede ser retenida por la gravedad solar y fluye por todo el medio interplanetario. El viento solar tiene una conductividad eléctrica muy alta, y no acepta la penetración de un campo magnético externo. Cuando el viento solar encuentra a un planeta, su campo magnético es barrido del medio interplanetario y comprimido hacia el planeta por el lado que da al Sol, el *lado día*. En el lado opuesto, el *lado noche*, las líneas de campo se estiran alejándose del Sol, formando una cola como la de los cometas (ver Figura 1). Dentro de las magnetosferas, el campo magnético planetario domina la dinámica de las partículas cargadas.

LA MAGNETOSFERA TERRESTRE

La magnetosfera de la Tierra es la que más se ha explorado, y la que mejor entendemos. Nuestra coraza magnética nos protege de la llegada directa de partículas solares, por lo que dentro de ella la mayor parte del material proviene de la ionosfera. Su frontera, llamada “magnetopausa”, separa al viento solar del campo planetario. La magnetopausa del lado día está a unos 10 radios terrestres (1 radio terrestre equivale a 6 mil 400 kilómetros), en el lugar donde la presión del dipolo magnético terrestre se equilibra con la presión dinámica del viento solar. Sin embargo, la llegada de una eyección de masa coronal (una inmensa nube de material de la corona solar que viaja a varios cientos de kilómetros por segundo) puede comprimir a la magnetosfera, acercando la magnetopausa hasta aproximadamente cinco radios terrestres.

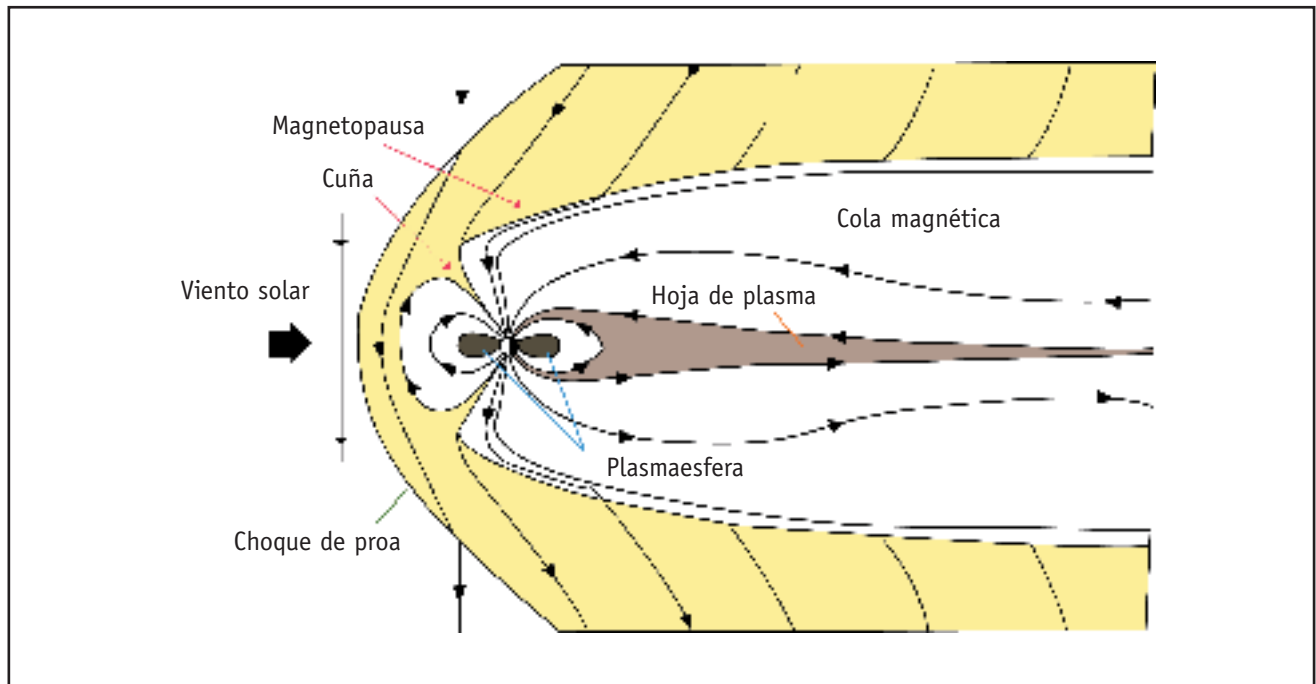


Figura 1. Esquema de la magnetosfera terrestre.

La velocidad del viento solar es tan alta (más de 300 kilómetros por segundo), que supera la velocidad de las ondas que se transmiten en él

La velocidad del viento solar es tan alta (más de 300 kilómetros por segundo), que supera la velocidad de las ondas que se transmiten en él. Esto hace que cuando el viento solar encuentra al campo magnético terrestre, se generen ondas en el plasma que tratan de propagarse en todas direcciones. Las ondas que tratan de propagarse hacia el Sol no pueden hacerlo; son arrastradas por el viento solar, generándose una región de transición conocida como “onda de choque”, en donde las propiedades del plasma cambian bruscamente (ver Figura 1). Esta onda de choque es similar al efecto de choque de proa que se observa delante de un barco, debido a que éste viaja con una velocidad mayor a la de las ondas en el agua. El plasma que atraviesa el choque es calentado, comprimido, y desacelerado, llenando una región conocida como “magnetofunda”. Entonces, el viento solar que rodea a la magnetosfera es plasma caliente de la magnetofunda.

El interior de la magnetosfera está dividido en varias regiones (ver Figura 1). La *plasmaesfera* es la porción del plasma magnetosférico que rota con la Tierra; en su interior están los *cinturones de Van Allen*. La *hoja de plasma* separa en dos partes a la cola magnetosférica; en una de estas regiones las líneas de campo magnético apuntan hacia la Tierra, mientras que en la otra se alejan de ella. La cola magnetosférica terrestre se extiende a más de mil, y posiblemente 2 mil, radios terrestres. Las partículas atrapadas en los cinturones de Van Allen tienen energías de hasta millones de veces la energía de las partículas

en la plasmaesfera. Estas partículas giran muy rápidamente alrededor de las líneas del campo, al mismo tiempo suben y bajan a lo largo de ellas, rebotando en un punto en el norte y otro en el sur llamados *puntos espejo*. Además, dan vuelta alrededor de la Tierra: los protones hacia el oeste y los electrones hacia el este. Los movimientos de los protones y electrones alrededor de la Tierra constituyen una corriente eléctrica, la *corriente anular* o *de anillo*. Esta corriente produce un campo magnético que se puede medir sobre la superficie terrestre y que apunta hacia el sur, de manera que disminuye un poco el campo en la superficie.

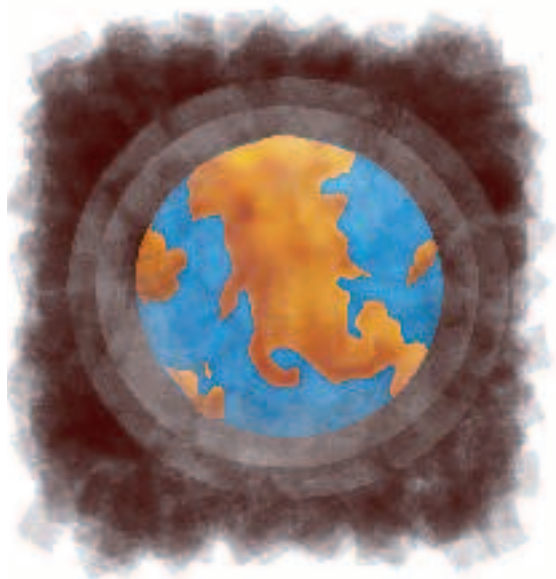
La magnetosfera es una región muy dinámica que sufre alteraciones provocadas por la actividad solar. Algunas eyecciones de masa coronal pueden perturbar fuertemente a todo el entorno geomagnético. En algunas ocasiones, el campo magnetosférico se abre al campo magnético del viento solar o de una eyección de masa coronal mediante un proceso llamado *reconexión magnética*; entonces, nuestro escudo magnético protector permite temporalmente la entrada de plasma de origen solar. Para que esto suceda, el campo magnético en el medio interplanetario debe tener una dirección adecuada para conectarse con el campo terrestre. En las regiones aurorales, las partículas se precipitan sobre la atmósfera, guiadas por las líneas de campo, dando lugar a las bellas luces conocidas como “auroras”. A latitudes más bajas, las partículas solares no pueden penetrar muy cerca de la Tierra, pues son capturadas por las líneas del campo magnético, que en estas regiones son muy horizontales. Las partículas capturadas giran alrededor de nuestro planeta, enriqueciendo la corriente de anillo, lo cual induce un campo magnético que altera considerablemente al campo ambiente en la magnetosfera y al medido en la superficie terrestre. A esta perturbación, que se precipita en algunas horas y tarda varios días en disiparse, se le llama “tormenta geomagnética”. Durante una tormenta geomagnética intensa, los aparatos de navegación y exploración que se orientan con el campo geomagnético dejan de ser de utilidad, y las variaciones del campo magnético inducen corrientes eléctricas en toda la atmósfera e incluso en el subsuelo. El calor disipado por estas corrientes puede producir daños cuantiosos en instalaciones eléctricas y estructuras metálicas.

LA MAGNETOSFERA DE MERCURIO

Observaciones hechas a bordo de naves espaciales han mostrado que existe una variedad de magnetosferas planetarias. Las características particulares de cada una están determinadas por la intensidad e inclinación del campo magnético planetario, las

condiciones del viento solar, las fuentes internas de plasma y la existencia de satélites.

Como el tamaño de las magnetosferas depende de la intensidad del campo interno del planeta y de la presión dinámica del viento solar, Mercurio posee una magnetosfera pequeñísima (su campo interno es sólo un centésimo del terrestre), que se extiende sólo a un radio delante del planeta. Como Mercurio carece de atmósfera, no tiene una ionosfera que forme un sistema de corrientes eléctricas con la magnetosfera, como en la Tierra, por lo que se generan diferencias de potencial eléctrico muy altas, del orden de millones de volts. Esto ocasiona violentas descargas eléctricas que cruzan la magnetosfera hermiana. Al parecer esta magnetosfera carece de cinturones de radiación. Mercurio está tan cerca del Sol que se espera un clima espacial muy fuerte. Aún sabemos muy poco del entorno de Mercurio, el cual sólo ha sido visitado por la sonda *Mariner 10*. Afortunadamente, la misión *Messenger* de la NASA llegará a este pequeño planeta en marzo del 2011.



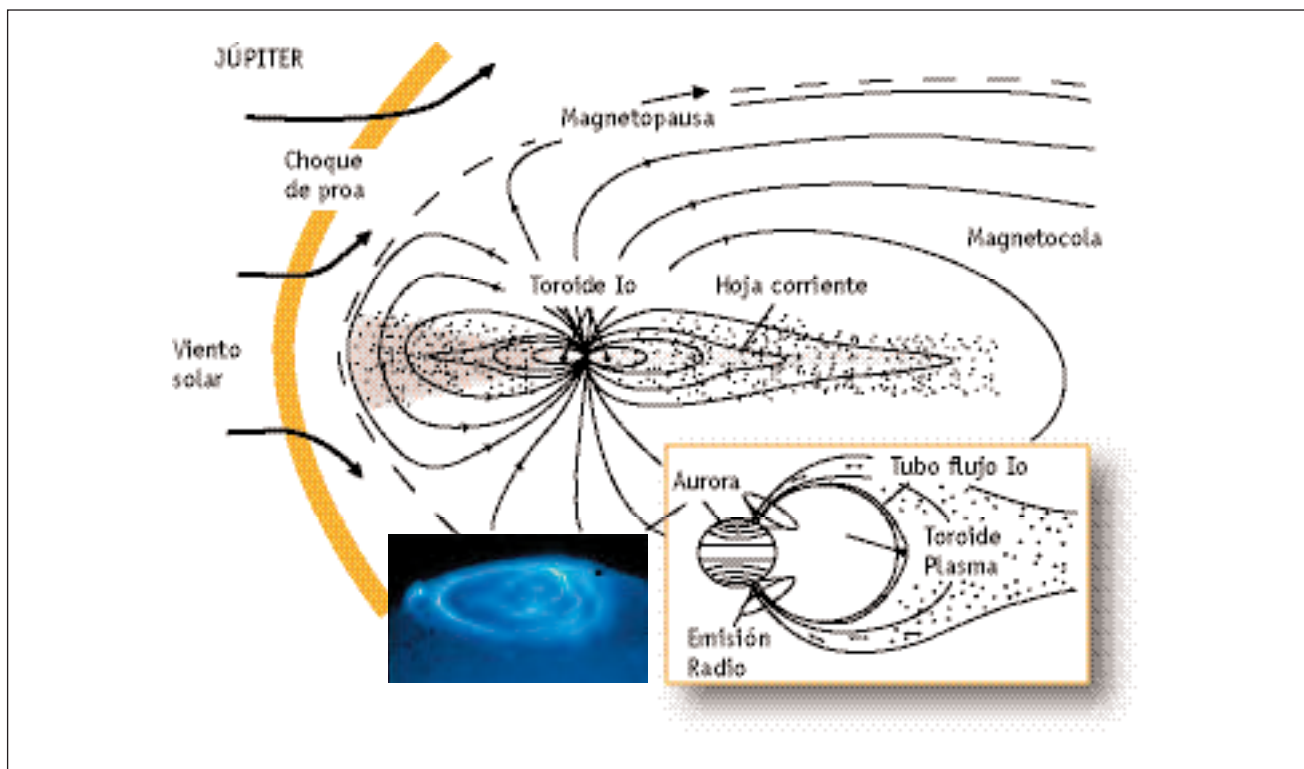
Júpiter tiene la magnetosfera más grande del Sistema Solar, pues su campo interno es diez veces el terrestre

LA MAGNETOSFERA JOVIANA

En contraste, Júpiter tiene la magnetosfera más grande del Sistema Solar, pues su campo interno es diez veces el terrestre. La magnetosfera joviana ocupa una región más grande que el Sol, midiendo entre 60 y 100 radios del lado día (un radio joviano es igual a 71 mil 373 kilómetros). Las magnetosferas de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno son en términos generales semejantes a la terrestre: poseen una “nariz” comprimida por el viento solar y una enorme cola magnetosférica del lado noche. Enfrente de cada una hay una onda de choque, y están también rodeadas por una magnetofunda. En su interior, el plasma se organiza en diversas regiones con características diferentes y fluye de manera más o menos ordenada entre algunas de ellas. Pero ya en detalle, cada magnetosfera es un ente realmente único.

A diferencia de la Tierra, los planetas gaseosos poseen numerosos satélites que pueden proveer de material a las magnetosferas. En Júpiter, el plasma de la magnetosfera proviene principalmente de los gases volcánicos que se escapan del satélite Io, y sólo en segundo término de la ionosfera. El plasma que sale de Io (una tonelada por segundo) forma un toroide (dona) alrededor del planeta (ver Figura 2), compuesto principalmente por oxígeno y azufre. Parte del material del toroide escapa

Figura 2. El entorno magnético de Júpiter.



formando una hoja de corriente capaz de deformar la magnetosfera joviana, alargando las líneas de campo (ver Figura 2) en la región comprendida entre 6 y 30 radios. La presión del plasma magnetosférico contribuye a detener al viento solar mismo (no sólo la presión del campo magnético, como en la Tierra) y es en parte por esto que la magnetosfera joviana es tan grande. La fuente más importante de momento y energía para la magnetosfera es la rápida rotación de Júpiter, cuyo periodo es de 9 horas y 55 minutos, lo que causa que el plasma rote alrededor del planeta formando un sistema de corrientes eléctricas que acoplan magnéticamente a la ionosfera con la magnetosfera.

Entre los fenómenos más extraños de la magnetosfera joviana está un inmenso tubo de flujo de plasma que conecta a Júpiter e Io y que conduce una corriente eléctrica de cerca de 5 millones de amperes (ver Figura 2). Júpiter posee cinturones de partículas energéticas atrapadas en su campo magnético, las cuales emiten señales de radio notablemente intensas; después del Sol, la magnetosfera joviana es la fuente de emisiones de radio más brillante del cielo. Esta magnetosfera es también un poderoso acelerador de partículas, algunas de las cuales llegan a tener tanta energía que escapan de ella y pueden detectarse en el medio interplanetario y en la Tierra. Como era de esperarse, se han registrado también auroras en Júpiter (ver Figura 2).

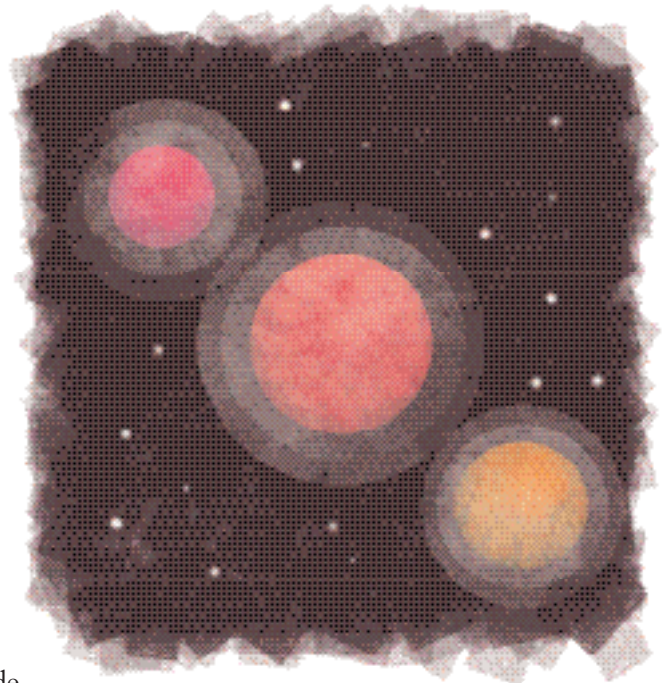
El entorno joviano ha sido visitado por las naves *Pioneer 10* y *11*, *Voyager 1* y *2*, *Ulysses*, y recientemente por la misión *Galileo*. Uno de los descubrimientos más fascinantes del *Galileo* fue el de encontrar que la luna Ganímedes posee un campo magnético propio capaz de formar una mini-magnetosfera al interactuar con el plasma magnetosférico joviano. Esto fue una gran sorpresa, pues no se esperaba que un cuerpo helado como esta luna fuera capaz de generar un campo magnético. Por otro lado, las observaciones del *Galileo* mostraron que es muy posible que en la luna Europa exista un océano de agua.

LAS MAGNETOSFERAS DE SATURNO, URANO Y NEPTUNO

Las magnetosferas de los planetas más lejanos se conocen poco. En general son más chicas y menos dinámicas que la de Júpiter. También poseen cinturones de radiación atrapada en sus campos magnéticos y emiten ondas de radio, aunque en frecuencias que no logran penetrar la ionosfera terrestre, por lo que sólo se pueden observar desde

el espacio. También se han observado en estos planetas auroras y descargas eléctricas notables.

Actualmente la misión *Cassini* se encuentra orbitando la magnetosfera de Saturno y se espera que sus observaciones nos ayuden a comprender mejor este entorno. De manera semejante a Júpiter, en la magnetosfera saturniana existen satélites y espectaculares anillos. Sin embargo, ninguno de estos satélites es capaz de dar al entorno tanto material como Io. La luna Titán, con su densa atmósfera, tiene una órbita que hace que a veces se encuentre dentro de la magnetosfera y otras quede fuera de ella. De los datos de la misión *Cassini* que se han analizado han surgido algunos descubrimientos muy interesantes, como el de que la luna Encelado posee una atmósfera considerable, la cual puede ser generada por vulcanismo o por la presencia de géiseres. También se han encontrado ondas producidas en el campo magnético a la altura del anillo E; esto sugiere que parte del material del anillo puede ser ionizado y que estos iones tienen las configuraciones adecuadas para resonar con el campo, generando ondas.



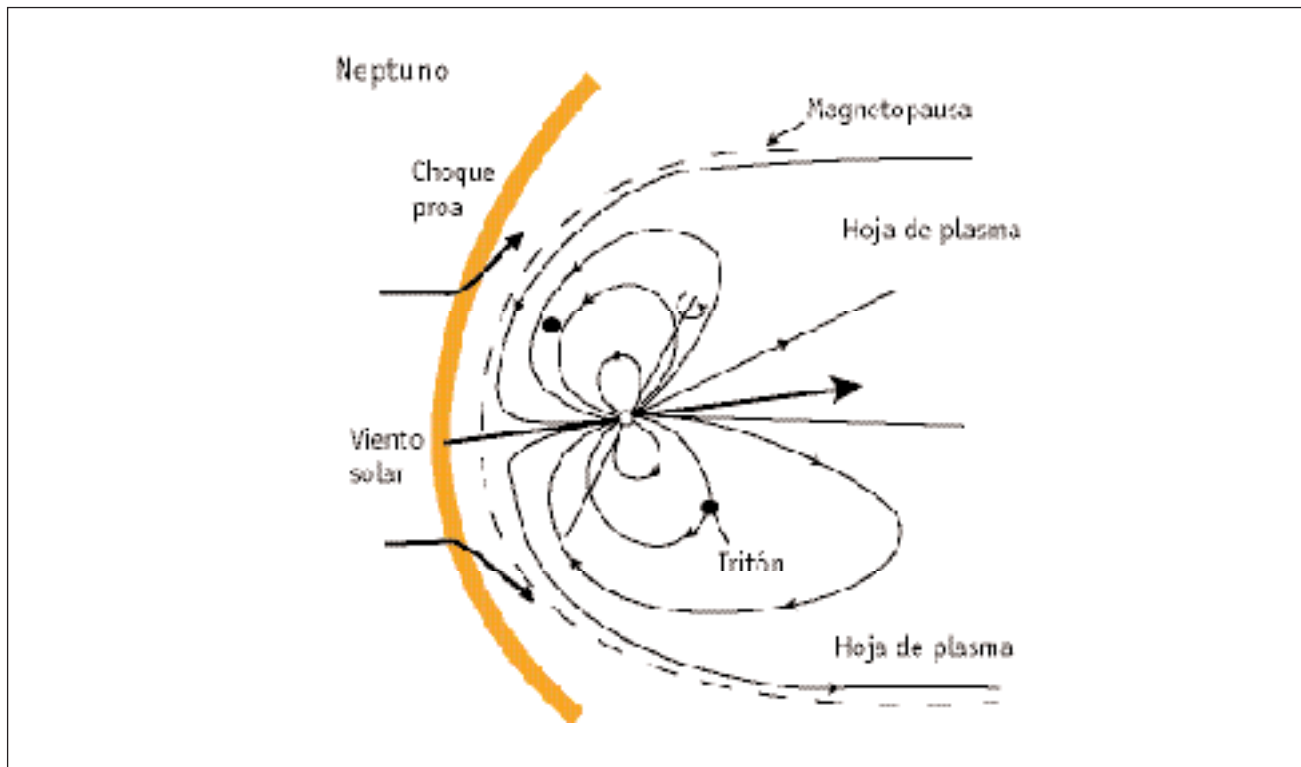


Figura 3. Magnetosfera "acostada" de Neptuno (adaptada de Bagenal, 1992).

De las magnetosferas de Urano y Neptuno se sabe muy poco. Algo peculiar de Neptuno es que su campo magnético varía mucho más rápidamente que el de otros planetas, por lo que a veces su eje apunta hacia el Sol. Esto hace que la magnetosfera esté a veces "acostada" (Figura 3). Una configuración de este tipo tiene dos hojas de corriente y permite la entrada de partículas al planeta en la región de uno de los polos magnéticos.

Nadie sabe si Plutón tiene un campo magnético capaz de soportar una magnetosfera, o si la interacción de este pequeño mundo con el viento solar será similar a la de Venus y Marte. Solamente la exploración de este lejano planeta nos dará la respuesta.

El estudio de todo este zoológico de magnetosferas presenta desafíos muy interesantes para la teoría física del plasma. Estas corazas magnéticas planetarias muestran una variedad

tan rica de situaciones inesperadas que sin duda enriquecerán notablemente nuestro conocimiento del comportamiento de los plasmas.

Xóchitl Blanco Cano es investigadora titular en el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y profesora del posgrado en Ciencias de la Tierra de la misma universidad. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores y a la Academia Mexicana de Ciencias. Se dedica al estudio de plasmas espaciales en diferentes entornos del Sistema Solar. Sus principales áreas de investigación son la física del viento solar, ondas e inestabilidades en plasmas espaciales, perturbaciones de gran escala en el viento solar, regiones de interacción del viento solar con planetas magnetizados, antechoques y asteroides.
 xbc@geofisica.unam.mx