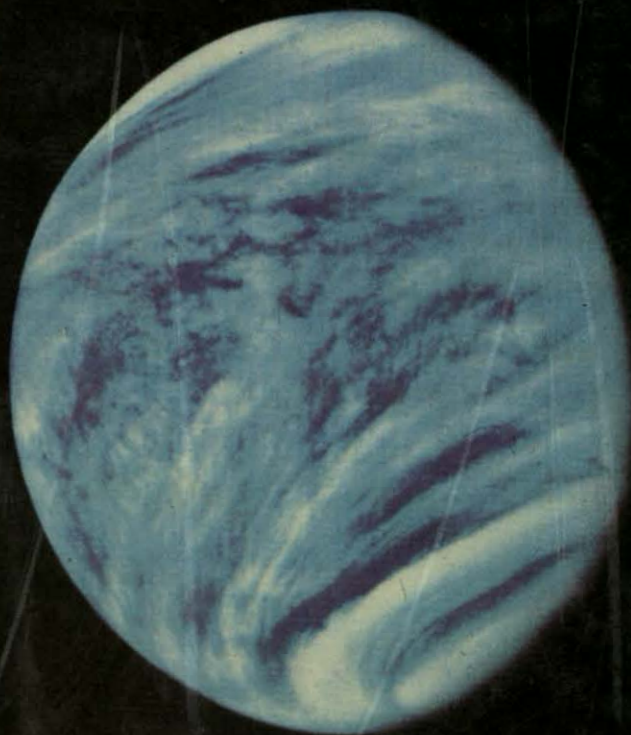


MONOGRAFIAS DEL INSTITUTO DE GEOFISICA / 4

INTERACCION DEL VIENTO SOLAR CON EL PLANETA VENUS

H. PEREZ DE TEJADA



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



Universidad Nacional Autónoma de México

CON *Instituto de Geofísica*

México, D.F., 1981

II Fines de Trabajo

4

Universidad Nacional Autónoma de México

Monografías del Instituto de Geofísica

INTERACCION DEL VIENTO SOLAR CON EL PLANETA VENUS

H. Pérez de Tejada

4

Esta Monografía se imprimió en los talleres de
Editorial Gubani, S.A., Astrónomos 23,
Col. Escandón, México 18, D.F.
México.

Se imprimieron 1000 ejemplares mas sobrantes
para reposición.

Agosto de 1981.

INTERACCION DEL VIENTO SOLAR
CON EL PLANETA VENUS

M. Pérez de Tejada

La Fotografía de la portada fué obtenida de la publicación
1060-145 de la NASA (7/80)

PREFACIO DEL EDITOR

Con este volumen reiniciamos la publicación de las Monografías del Instituto de Geofísica, UNAM, serie que fue interrumpida hace casi dos décadas por causas que no conocemos. Se cumple con esta publicación, que esperamos recomience la serie, una larga aspiración de esta editorial, la monografía.

La monografía científica representa un doble esfuerzo: por una parte, la producción individual o de equipo supone un trabajo de gran aliento que culmina una etapa en el proceso de la investigación y en el conocimiento y, de este modo, refleja adecuadamente la actividad científica institucional; por otro lado, representa un nuevo esfuerzo editorial, el libro, etapa que aún no habíamos alcanzado en nuestra estructura editorial. Representa también otra cara del progreso porque sirve de aliciente y estímulo para la investigación nacional sistematizada y particularmente para los investigadores académicos jóvenes en ciencias geofísicas, a los que desde ya ofrecemos nuestras páginas en la medida que su trabajo individual o colectivo alcance nuestros objetivos.

Es un hecho notorio, en las publicaciones de la UNAM, la desproporción enorme entre la literatura sobre humanidades y letras (historia, sociología, antropología, literatura, etc.) y la producción científica propiamente dicha. Esta desproporción no es producto de la circunstancia ni fruto de la casualidad: es el reflejo intelectual del viejo problema de "las dos culturas", tan traído y llevado, pero ciertamente actual y concreto. Debemos meditar sobre esto. El continuo crecimiento de la literatura histórica, antropológica, sociológica o psicológica nacional es un hecho real y positivo que marca el progreso en la educación humanística mexicana. El lento, laborioso, y obstaculizado crecimiento de la literatura propiamente científica, está señalando una cultura "dependiente" en ciencia, en técnica, en investigación y una cultura "dependiente" es siempre, de un modo u otro, la persistencia de una colonización científica. Sigue siendo el libro extranjero el que alimenta en teoría y tecnología a nuestros estudiosos. La contribución de la revista científica, del folleto técnico, de las ponencias individuales en las reuniones científicas es escasa, secundaria y muchas veces subestimada.

Estas cadenas intelectuales, este quietismo científico, este dejar

estar las cosas como están, mantiene el conocimiento científico en el círculo vicioso de la dependencia y a la ciencia nacional en una encrucijada sin salida. Esto no significa ni remotamente una filosofía ultra-nacionalista, una especie de "chauvinismo" científico. La ciencia que no se comunica es una ciencia inválida, una ciencia paralizada, porque la ciencia es siempre comunicable, siempre universal. El esfuerzo por romper una situación cristalizada es, desde luego, un gigantesco esfuerzo colectivo en todas las áreas del saber científico para alcanzar una soberanía intelectual. Esta es nuestra modesta aspiración actual: aportar, en el libro, un grano de arena a ese esfuerzo del saber nacional.

Las monografías del Instituto tendrán una orientación múltiple y diversa, de acuerdo a las diversas disciplinas específicas del trabajo académico del Instituto. En principio, proyectamos publicar trabajos de investigación original en áreas "nuevas" del conocimiento y el presente volumen resume los conocimientos actuales en un problema tan actual como el estudio de los cuerpos planetarios del sistema solar. También proyectamos trabajos de actualización teórica y técnica sobre problemas ya tradicionales de la geofísica. Incluiremos programáticamente, estudios de equipos técnicos en áreas geográficas poco conocidas o estudiadas, etcétera.

Las Monografías no serán propiamente literatura de divulgación, sino literatura científica propiamente dicha. Están destinadas al estudioso geofísico desde el nivel licenciatura hasta la alta especialidad. Pero trataremos de poner énfasis sobre el lector en formación académica y en los aspectos didácticos, ilustrativos y educativos de nuestras Monografías. El pasante en ciencias físicas y el investigador académico joven serán nuestros objetivos prioritarios, pero no exclusivos y esperamos mantener un nivel de información y conocimiento que haga útiles estos trabajos a todos los estudiosos en la física de la Tierra y el cosmos.

Nuestro agradecimiento al doctor Héctor Pérez de Tejada, joven y ya prestigioso investigador en los sistemas planetarios, que nos ofrece —para reiniciar esta colección— un trabajo de genuina actualidad científica, expuesto con la claridad, la precisión y la sobriedad que definen una auténtica contribución al conocimiento y que traducen ejemplificadas nuestras aspiraciones editoras científicas.

El Editor

CONTENIDO

INTERACCIÓN DEL VIENTO SOLAR CON EL PLANETA VENUS

Introducción

El Viento Solar como Medio Continuo

El Flujo del Viento Solar Alrededor de la
Ionosfera del Planeta Venus

A – Flujo Alrededor de la Ionosfera Diurna

B – Flujo en el Terminador Planetario

C – Flujo en la Umbra Planetaria

Conclusiones

Referencias

INTERACCION DEL VIENTO SOLAR CON EL PLANETA VENUS¹

H. Pérez de Tejada*

INTRODUCCION

El estudio experimental de los cuerpos planetarios del sistema solar por medio de sondas espaciales ha permitido la adopción de una nueva clasificación planetaria con base en la magnetización observada en su vecindad. Esta magnetización puede ser intrínseca al interior planetario o inducida en la ionosfera por procesos asociados con la interacción del viento solar. En la actualidad se conocen con certeza las características magnéticas de los planetas citados en la tabla 1. El orden utilizado en esta relación indica la intensidad magnética observada en estos planetas y va desde el campo magnético más intenso hasta el más débil. Los valores del momento magnético indicados en la columna central se refieren a los de un dipolo magnético equivalente que produciría, fuera del planeta, intensidades magnéticas comparables a las observadas. Finalmente, los valores de intensidad magnética mostrados a la derecha se refieren a los esperados en el ecuador de las superficies planetarias correspondientes.

* Instituto de Geofísica,
Universidad Nacional Autónoma de México,
México 20, D.F.

¹ Conferencia presentada en la Universidad Politécnica de Madrid (junio de 1980).

La distribución de campos magnéticos planetarios, según se conoce ahora, ha revolucionado conceptos fundamentales del origen del magnetismo conforme a las teorías de dínamo hasta ahora aceptadas. Durante muchos años se ha supuesto que la magnetización de los cuerpos del sistema planetario está directamente correlacionada con su momento angular (período de rotación). A la magnetización calculada a partir de los valores medidos para la Tierra, el Sol y Júpiter (indicada por la línea punteada de la figura 1) se le conoce como Ley de Bode magnética. Esta ha sido objeto de intensos estudios teóricos de circulación convectiva en interiores planetarios y utilizada para predecir la magnetización existente en otros cuerpos planetarios. El hecho de que los campos magnéticos de Saturno, Marte y Venus no se ajusten adecuadamente a los valores esperados ha cuestionado seriamente la validez de los modelos de dínamo existentes. Igualmente conflictiva ha sido la reciente observación de la orientación del eje dipolar magnético en Saturno el cual coincide muy aproximadamente con el de su rotación. Esta circunstancia se aparta radicalmente de las observadas en otros planetas en los que un ángulo de precesión de 10° - 20° parecía tener validez universal.

El amplio rango de magnetización planetaria existente en el sistema solar permite una gran variedad de configuraciones, resultantes de la interacción del viento solar con los cuerpos planetarios. El carácter electromagnético del viento solar (producto de la expansión de la corona solar que llena el medio interplanetario y arrastra consigo el campo magnético fotosférico) da lugar a una notable interacción con los campos magnéticos planetarios inmersos en él. Aun cuando esta interacción es más dramática conforme mayor sea el momento magnético del objeto planetario, la presencia de plasmas locales (ionosféricos) puede modular en alto grado el proceso de acoplamiento entre el viento solar y el campo magnético local. Así, ocurre que en planetas con magnetización comparable como son Marte y Mercurio la existencia de una atmósfera apreciable en el primero da lugar a una ionosfera que afecta fuertemente el carácter de la interacción con el viento solar. Venus representa, por otra parte, el caso extremo de un cuerpo planetario no magnético en el que la ionosfera es totalmente responsable de la interacción con el viento solar. Según se verá más adelante, ésto da lugar a una configuración radicalmente dife-

rente de las observadas en otros planetas. Finalmente, es necesario mencionar que un tercer modo de interacción se presenta en cuerpos de baja magnetización y desprovistos de una atmósfera apreciable. Tal es el caso de la Luna en la cual el momento magnético de su interior ($M \leq 10^{19}$ Gauss cm^3) es incapaz de impedir que las partículas del viento solar incidan directamente sobre su superficie y sean ahí neutralizadas. Sin embargo, esta situación se perturba ocasionalmente cuando concentraciones locales de material magnetizado (magcons) son expuestos al viento solar en la región cercana al terminador, esto es, a la región divisoria entre el día y la noche (en estos casos se genera una interacción similar a las producidas por campos magnéticos planetarios).

EL VIENTO SOLAR COMO MEDIO CONTINUO

Durante más de 20 años se ha estudiado en forma ininterrumpida la interacción del viento solar con el campo magnético de la Tierra. Esta interacción está caracterizada por la deformación y confinamiento del campo magnético terrestre hacia el lado noche como se indica esquemáticamente en la figura 2. La distorsión que sufren las líneas del campo geomagnético y la exclusión del viento solar dentro de los confines de dominio de éste, se entienden como resultado de un balance de presiones sostenido en la frontera del campo geomagnético (llamada magnetopausa). La presión del campo geomagnético comprimido corresponde a la presión cinética de las partículas del viento solar que actúan como si fueran parte de un medio continuo. Esta afirmación es importante porque, desde el punto de vista estadístico convencional, la densidad del viento solar en el medio interplanetario es tan baja ($n \sim 10 \text{ cm}^{-3}$) que las partículas que lo forman prácticamente jamás sufren colisiones coulombianas (interacciones eléctricas de partícula a partícula). El camino libre medio de tales colisiones es, de hecho, comparable al de las dimensiones de la distancia Sol-Tierra y por tanto no es, en principio, factible que las partículas (iones y electrones) actúen en forma coordinada contra el objeto magnético terrestre. La observación de tal comportamiento ha obligado, por lo tanto, a la consideración de otro tipo de interacciones que operen en forma efectiva a través de distancias pequeñas en comparación con las dimensiones de la magnetosfera terrestre.

Durante mucho tiempo se ha sugerido que fenómenos asociados con el movimiento helicoidal de las partículas (eléctricamente cargadas) del viento solar alrededor de las líneas de campo magnético puede producir como resultado la transferencia de información de partícula a partícula aun cuando éstas no lleguen a interactuar directamente. Se piensa, por ejemplo, que perturbaciones magnéticas inducidas en tales movimientos (acelerados) puedan afectar el movimiento de otras partículas y así ser transmitidos a otras regiones del espacio. Una estadística basada en este esquema fue preparada, hace más de 20 años, por Chow Golderberg y Low (aproximación CGL) y ha sido aplicada con éxito en ciertos plasmas que reúnen características especiales (alto valor del cociente de densidad de energía magnética a energía térmica). Aun cuando las condiciones existentes en el viento solar no satisfacen en muchas ocasiones estas características, es factible que este tipo de procesos operen y den lugar al comportamiento fluido observado.

Existe, sin embargo, una opción más viable y que muy probablemente es complementaria del origen de este comportamiento, particularmente en conexión con las condiciones presentes en la interacción del viento solar con cuerpos planetarios de baja magnetización. Debido al intenso campo de fluctuaciones eléctricas y magnéticas existentes en el medio interplanetario, se ha sugerido que interacciones de tipo onda-partícula (paquetes magnetohidrodinámicos de alta dispersión) son en realidad los responsables de la transferencia de información a través de distancias aun menores que el radio de giro alrededor de las líneas de campo magnético (como se requiere en la aproximación CGL). En esta interpretación, las partículas efectúan un movimiento azaroso similar al de las partículas de un gas dominado por colisiones y dan lugar a un transporte efectivo de propiedades estadísticas.

Independientemente de cuál sea el mecanismo responsable de estos procesos, es claro que las observaciones apoyan plenamente el empleo de la mecánica de medios continuos para describir la dinámica de la interacción del viento solar con los cuerpos planetarios. Así, las características supersónicas del viento solar explican claramente la presencia de un frente de choque situado delante de la magnetosfera terrestre de manera muy similar a la que se observa al frente de

un avión en vuelo supersónico. La compresión y desaceleración que sufre el viento solar al pasar por el frente de choque se ajusta, además, de manera muy aproximada a la que predicen las ecuaciones de Rankine-Hugoniot para fluidos convencionales. Asimismo, la desviación y expansión posterior que exhibe el viento solar conforme fluye alrededor de la magnetosfera puede formularse utilizando descripciones hidrodinámicas de un fluido supersónico alrededor de un cuerpo romo.

Una configuración similar ocurre en otros cuerpos planetarios con magnetización apreciable como son Júpiter, Saturno y Mercurio. En todos estos planetas existe una cavidad magnetosférica como la representada en la figura 2 pero con dimensiones acordes a la magnitud del momento dipolar correspondiente. Mientras que la posición subsolar de la magnetopausa (sobre el eje planeta-sol) es apenas de $\sim 3\,000$ km del centro planetario en Mercurio, llega a tener $\sim 60\,000$ km en la Tierra, $\sim 10^6$ km en Saturno y $\sim 7 \times 10^6$ km en Júpiter. Además, las colas magnetosféricas correspondientes que se extienden por el lado noche se estima pueden llegar a medir cientos de millones de km.

Existen, sin embargo, ciertas diferencias importantes en la estructura de la magnetosfera de estos planetas y que hay que hacer notar. La más notable es, sin duda alguna, la existencia de una protuberancia ecuatorial en la magnetosfera del planeta Júpiter que le da el aspecto de una cavidad inflada a bajas latitudes. Esta deformación, que se presenta a todo lo ancho del hemisferio día, se debe a la contribución de campos magnéticos inducidos por fuertes corrientes eléctricas que circulan radialmente de las regiones cercanas al planeta hacia la frontera exterior de la cavidad. Aun cuando las características y consecuencias electrodinámicas de tales corrientes han sido investigadas solamente en los últimos años, es posible señalar que dan lugar a una dinámica apreciablemente diferente de la existente en las magnetosferas de otros objetos planetarios.

A diferencia de los casos anteriores, la geometría resultante de la interacción del viento solar con cuerpos planetarios de baja magnetización como son Marte y Venus ha demostrado ser radicalmente diferente y ha forzado, en consecuencia, la adopción de conceptos

nuevos característicos de otro tipo de procesos. De hecho, no ha sido sino hasta hace unos 5 años cuando se inició el reconocimiento sistemático de nuestros planetas vecinos y se reconoció la posibilidad de que el viento solar exhibiera condiciones completamente diferentes de las observadas cerca de la Tierra. En estas circunstancias no es extraño que el conocimiento de las configuraciones magnéticas y de las distribuciones del plasma solar en esos planetas se encuentra en un nivel aún más preliminar que el que se tiene sobre Júpiter y Saturno (a pesar de que la observación *in situ* en estos últimos es tan reciente como la de aquéllos). Así, el físico teórico se ve obligado a adaptar convenientemente las formulaciones matemáticas existentes o más frecuentemente a iniciar, con nuevas herramientas, el estudio de procesos que no se consideraban antes viables (al menos bajo las condiciones que muestra el viento solar en la vecindad del campo geomagnético).

El concepto más importante asociado a la interacción del viento solar con cuerpos planetarios de baja magnetización es el hecho de que, en ausencia de un campo magnético apreciable, el viento solar incide directamente sobre las capas superiores de la ionosfera del planeta. El efecto principal de este contacto es una interacción plasma-plasma que da lugar a fenómenos diferentes de los que ocurren en interacciones de tipo plasma-campo magnético. En lugar de un obstáculo magnetosférico se observa que la ionosfera local es contenida, comprimida y deformada por el viento solar, el cual inclusive la erosiona continuamente y da lugar a una cauda de plasma de características diferentes a las colas magnetosféricas de los planetas magnéticos.

Desde las primeras observaciones hechas en la vecindad de Marte y Venus fue evidente que las dimensiones de los obstáculos responsables de la interacción con el viento solar son bastante menores que las de la magnetosfera de la Tierra. Por ejemplo, fluctuaciones magnéticas identificadas como debidas a un frente de choque asociado a estos planetas fueron detectadas aproximadamente a unos 5 000 km del planeta, mientras que en la Tierra esta frontera se encuentra a $\sim 80\,000$ km. Esta diferencia implica un obstáculo efectivo producido por un campo magnético muy pequeño o indirectamente por la ionosfera planetaria.

En el caso de Marte, observaciones recientes han permitido establecer un límite superior del momento dipolar magnético equivalente a 2×10^{22} Gauss cm^3 , aun cuando es posible que una interacción de tipo estrictamente ionosférico produzca los mismos resultados. En Venus, se sabe con certeza que el viento solar incide directamente sobre la ionosfera planetaria y que el escaso campo magnético planetario juega un papel secundario. En general, el efecto que un campo magnético débil puede producir en estos planetas es el de atenuar o reducir el contacto viento solar-ionosfera. Tal parece ser el caso en Marte en el cual las observaciones realizadas con las sondas soviéticas Marte 2, 3 y 5 sugieren una configuración menos drástica que la de Venus.

EL FLUJO DEL VIENTO SOLAR ALREDEDOR DE LA IONOSFERA DEL PLANETA VENUS

Debido principalmente a las características tan especiales de su atmósfera (altas densidades y temperaturas), Venus ha sido objeto de una atención especial en los programas espaciales soviético y estadounidense. Como resultado de esta atención ha habido oportunidad de realizar investigaciones detalladas de su ionosfera y de la región de interacción con el viento solar. Hasta la fecha, se cuenta con los datos obtenidos por 7 vehículos que pasaron cerca del planeta (Marineros 2, 5 y 10) o descendieron en él (Venera 4, 6, 11, 12) y por 3 satélites artificiales (Veneras 9 y 10 y el Pionero Venus). Los resultados de los experimentos realizados principalmente con estos 3 últimos vehículos han permitido discernir una imagen bastante aproximada del flujo del viento solar alrededor de su ionosfera. Con el objeto de presentar un resumen completo de los principales aspectos de este fenómeno es conveniente considerar independientemente las siguientes 3 regiones resultantes del proceso de interacción:

A - Flujo alrededor de la ionosfera diurna

B - Región cercana al terminador planetario

C - Umbra planetaria y flujo en la cauda de plasma

La descripción de la geometría de la ionosfera y de la configura-

ción del flujo del viento solar en cada una de estas regiones está basada en la recopilación de datos experimentales existentes y en las interpretaciones teóricas que más se ajustan a estos datos.

A - Flujo alrededor de la ionosfera diurna

Evidencia dramática de la presencia de la ionosfera como objeto planetario efectivo al paso del viento solar es proporcionada por los perfiles ionosféricos obtenidos con técnicas de radio ocultamiento de las sondas espaciales. Por medio de estos experimentos es posible inferir el contenido electrónico de la ionosfera a partir del análisis de los cambios en la intensidad y fase de las señales de radio transmitidas por el vehículo espacial a la Tierra. Un ejemplo de estos perfiles se muestra en la figura 3 correspondiente a los resultados obtenidos con el *Marinero 5* cuya trayectoria permitió el rastreo de la ionosfera cercana a la región subsolar. Aparte de la bien definida presencia de una capa ionosférica ubicada a una altura de $h = 144$ km y con densidad máxima de $n \approx 10^6$ cm⁻³, es notable el drástico descenso ionosférico a los 500 km. Este corte repentino sugiere la existencia de una frontera superior de la ionosfera, la cual es comprimida y limitada por la acción del viento solar que incide sobre ella. La existencia de esta frontera a la que se llama ionopausa ha sido confirmada en múltiples observaciones realizadas posteriormente por medio de los satélites *Venera 9* y *10* y por el *Pionero Venus*. Hoy en día, se da por aceptado el concepto de que es la ionopausa la que define al obstáculo que desvía y fuerza al viento solar a fluir alrededor del planeta.

La posición promedio de la ionopausa como función del ángulo solar χ se muestra en la figura 4. Su altura es mínima en la región subsolar y aumenta gradualmente conforme disminuye la componente del momento cinético del viento solar dirigido hacia la ionosfera. El decrecimiento observado cerca del terminador planetario es debido a otro tipo de fenómenos y será tratado posteriormente.

En virtud de su origen, la posición de la ionopausa está definida por un balance entre la presión cinética ejercida por el viento solar y

la presión térmica del material ionosférico. Observaciones recientes han demostrado, sin embargo, que el viento solar no actúa directamente sobre el plasma ionosférico sino que su presión es transmitida al campo magnético del viento solar, el cual se acumula alrededor de la ionopausa. Un diagrama esquemático de la manera como se deforman las líneas del campo interplanetario al encontrar el obstáculo ionosférico se muestra en la figura 5. Esta acumulación del flujo magnético solar obedece a que la alta conductividad eléctrica del plasma ionosférico inhibe la difusión magnética a través de la ionopausa y da lugar a la formación de una barrera magnética de gran intensidad entre el plasma solar y el material ionosférico. Un ejemplo de los perfiles magnéticos de esta región, obtenidos por el Pionero Venus, se muestra en la figura 6 (junto con la sección correspondiente de su trayectoria orbital). El salto inicial en la intensidad magnética con respecto a los valores típicos del viento solar ($B = 10 \gamma$) se debe a la presencia del frente de choque situado a 1000 - 3000 km del planeta. Atrás de este frente el campo magnético aumenta gradualmente hasta alcanzar valores máximos en la vecindad de la ionopausa. Tan pronto como el vehículo cruza esta frontera el campo magnético decrece violentamente al no existir una magnetización promedio apreciable dentro de la ionosfera. Cambios similares son registrados por el satélite conforme éste atraviesa de salida la ionopausa y el frente de choque, dándole apariencia de simetría al perfil.

Conforme con los modelos actuales de interacción, la acumulación que sufren las líneas de campo magnético del viento solar alrededor de la ionopausa procede hasta el punto en que el campo magnético reemplaza al plasma solar en su acción de confinamiento de la ionosfera. Un ejemplo de este comportamiento se muestra en la figura 7 en la que se presentan los perfiles de presión térmica (interna) y magnética (externa) obtenidos con el Pionero Venus como función de la altura sobre el planeta. El hecho de que ambas presiones coincidan muy aproximadamente en la ionopausa indica claramente que son los flujos magnéticos generados en el proceso de interacción los que confinan al plasma ionosférico.

El comportamiento del viento solar conforme fluye alrededor del obstáculo ionosférico fue entendido inicialmente en términos de un

flujo invíscido que no interacciona dinámicamente con el plasma ionosférico y sólo se desliza por fuera del obstáculo. En esta interpretación la posición de la ionopausa está determinada por el balance de presiones existente entre la energía cinética incidente del viento solar y la energía térmica de la ionosfera (tomando en cuenta únicamente la componente del vector velocidad del viento solar que es perpendicular a la ionopausa en cada punto). Los resultados de este modelo, dados en función del parámetro H/r_0 (en donde 'H' indica la escala de altura de la ionosfera y ' r_0 ' la distancia del centro del planeta a la posición subsolar), predicen la posición de la ionopausa y la del frente de choque para diferentes condiciones termodinámicas de la ionosfera y del viento solar. Un diagrama esquemático bidimensional de estas curvas se muestra en la figura 8 incluyendo aquellas que se obtienen al comparar la posición del frente de choque observado experimentalmente. De esta comparación es posible concluir valores para H/r del orden de $0.01 < H/r < 0.10$ y temperaturas ionosféricas (proporcionales a H) del orden de 10^4 K. Aun cuando en esta descripción no se toman en cuenta procesos de acumulación del campo magnético alrededor de la ionopausa, se obtiene una interpretación del comportamiento del viento solar que se ajusta en mucho a las observaciones experimentales y que permite entender los aspectos más generales del proceso de interacción.

Fenómenos relacionados con el acoplamiento del viento solar y la ionosfera planetaria requieren, por otra parte, de modelos más precisos en los que se tome en cuenta las propiedades de pequeña y menor escala de la estructura ionosférica. De particular importancia ha sido la observación de señales magnéticas de gran intensidad y corta duración detectadas dentro de la ionosfera. Un ejemplo de los registros magnéticos característicos de esta región se muestra en la figura 9a. Independientemente del bajo nivel general de magnetización, las observaciones realizadas con el Pionero Venus muestran que el campo magnético puede aumentar considerablemente dentro de estructuras muy bien definidas. Del análisis de la orientación del campo magnético dentro de estas estructuras se ha podido determinar la geometría predominante, la cual se ajusta en mucho al modelo presentado en la figura 9b. Se trata, aparentemente, de filamentos o cuerdas magnéticas de geometría helicoidal en las que el ángulo formado

por el vector magnético y el eje (axial) de simetría decrece con la distancia del mismo. Aun cuando hasta la fecha no se han identificado plenamente los fenómenos que dan lugar a tales filamentos, se piensa que deben estar directamente conectados con el proceso de interacción en la ionopausa y que es posible que existan, de manera conjunta, estructuras similares en la distribución del plasma ionosférico.

B – Flujo en el Terminador Planetario

Desde que se realizaron las primeras observaciones de la configuración de la ionosfera del planeta Venus se encontraron evidencias de que al pasar cerca del terminador el viento solar presenta un comportamiento diferente del que se observa en otros cuerpos planetarios. Además de la baja magnetización detectada en esta región, fue notable el hecho de que no se encontrara ninguna frontera o superficie de discontinuidad en el lado noche a lo largo de la extensión de la posición de la ionopausa diurna (como se predice, por ejemplo, en el modelo presentado en la figura 8). En vez de tal discontinuidad las observaciones mostraron un decrecimiento gradual de la velocidad del viento solar a manera de un perfil de velocidades transversal a la dirección del flujo. En la figura 10 se presenta un resumen de las mediciones hechas durante el vuelo del *Marinero 5*, en las que aparece claramente este comportamiento en las propiedades del plasma (la trayectoria del vehículo ha sido proyectada en un solo plano que supone condiciones de simetría axial). Aparte de las posiciones 1 y 5 que identifican los cruces del frente de choque, es notable cómo la velocidad del plasma inicia un descenso gradual a partir de la posición 2 en donde $V = 550$ km/sec hasta llegar a un mínimo de 300 km/sec en la posición 3 y recuperarse después cerca de la posición 4. Asimismo, las observaciones muestran que, a lo largo de la trayectoria, no se encuentra evidencia de la extensión de la ionopausa diurna que, de acuerdo con el rango de valores del parámetro H/r_0 antes indicado, debería haber sido cruzada entre las posiciones 2 y 3.

La ausencia de una transición repentina en la magnitud de la velocidad es importante porque pone de manifiesto la acción de procesos en la región de interacción cercana al terminador, diferentes

de los que toman lugar en el hemisferio día. Así, se advierte que la existencia de valores reducidos de la velocidad del viento solar, en una amplia región cercana al planeta, implica una fuerte pérdida del momento cinético total del flujo incidente. Puede, por lo tanto, inferirse que en la región cercana al terminador el viento solar logra transferir parte de su momento cinético al plasma ionosférico el cual es, en consecuencia, arrastrado hacia el lado noche. Esta circunstancia, que difiere fundamentalmente de la que existe en todo el hemisferio día, sugiere la acción de procesos de carácter viscoso en la interacción entre ambos plasmas. De hecho, es bien sabido que este tipo de procesos dan lugar, en flujos convencionales, a perfiles de velocidad similares al observado cerca de Venus. Esta interpretación ha sido posteriormente apoyada en múltiples observaciones realizadas con los vehículos Venera y Pionero Venus, tanto cerca del terminador como en regiones de la estela de plasma muy alejadas del planeta. Un ejemplo más claro del perfil de velocidades se presenta en la figura 11 en la que se incluye además mediciones de temperatura hechas con el Venera 9. La presencia de altas temperaturas asociadas al perfil de velocidades es asimismo consistente con la interpretación de una interacción viscosa de carácter disipativo.

Es importante hacer notar que la adopción de este comportamiento supone que el contacto entre el viento solar y el plasma ionosférico se realiza bajo condiciones estrictamente propias de un medio continuo. Como se apuntó antes, es muy probable que este carácter se establezca gracias a pseudo colisiones de tipo onda partícula que permiten una transferencia efectiva del momento cinético del viento solar al material ionosférico. Las consecuencias que este tipo de interacción produce en la configuración de la ionopausa cerca del terminador se pueden inferir del diagrama presentado en la figura 12. La geometría usada aquí ejemplifica una situación general en la que un fluido en movimiento (el viento solar) entra en contacto con otro inicialmente en reposo (el plasma ionosférico). Conforme esto ocurre el perfil de velocidad inicial se deforma al transferir el fluido en movimiento, momento cinético al material estacionario. El efecto colateral más importante de este proceso es el hecho de que el flujo desacelerado debe desviarse lateralmente en la dirección del plasma ionos-

férico y ocupar una mayor sección transversal a fin de asegurar su libre tránsito. Esta condición, que impone el concepto de conservación de flujo de masa, podría evitarse si el fluido desacelerado sufriera una compresión conmensurable con la reducción de su velocidad. Resulta, sin embargo, que debido a la disipación producida por la misma interacción viscosa la temperatura y por ende la presión local tenderán a aumentar dentro de la región de interacción. En estas circunstancias el plasma es forzado a expandirse y a desviar aun más el material ionosférico.

La predicción de este desplazamiento lateral del viento solar y del plasma ionosférico tiene profundas implicaciones: no sólo en relación con la geometría de la región de interacción, sino también con la formación de la ionosfera nocturna del planeta, así como la de una larga cauda de plasma que se extiende detrás de él. Esto se pone de manifiesto al hacer notar que la geometría propuesta en la figura 12 implica una entrada continua de partículas al interior de la umbra planetaria. Evidencia experimental en favor de este comportamiento aparece en el perfil de la altura 'h' de la ionopausa con el ángulo solar χ presentado en la figura 4. El hecho de que el aumento de 'h' con ' χ ' observado en el hemisferio día se invierta cerca del terminador se ajusta muy adecuadamente a la configuración ilustrada en la figura 12.

Mediciones recientes efectuadas con el Pionero Venus revelan que la desviación de la ionopausa es tan efectiva que el plasma solar sigue prácticamente la curvatura del planeta y llega a las regiones más internas del hemisferio noche. Estas mediciones han revelado inclusive el desplazamiento general de las partículas ionosféricas en la dirección de la superficie del planeta. Un ejemplo de este desplazamiento se muestra en la figura 13 por medio de vectores cuya longitud indica la magnitud de la velocidad local medida al paso del satélite. Todas estas observaciones confirman que el contacto entre el viento solar y el plasma ionosférico es mucho más efectivo en la región cercana al terminador que en el hemisferio día y que, como resultado de este contacto, la región de interacción es desviada lateralmente hacia el hemisferio nocturno del planeta.

C – Flujo en la Umbra Planetaria

Aun cuando es claro que la población de partículas ionosféricas en el hemisferio noche está afectada por los procesos que tienen lugar en el terminador planetario, no ha sido sino hasta muy recientemente cuando se identificaron las condiciones en que esto se lleva a cabo.

Debido a la baja magnetización planetaria detectada en la vecindad de Venus se pensó durante muchos años que el flujo del viento solar alrededor del planeta se realiza bajo condiciones de simetría axial (con respecto al eje Sol-Venus). Esta configuración ha resultado tener cierta validez en el hemisferio día pero es claramente inadecuada para describir la geometría de la distribución de plasma en el hemisferio noche. El elemento responsable de la pérdida de simetría en esta región es la dirección del vector magnético del viento solar el cual establece, junto con el eje Sol-Venus, un plano preferente en el espacio. La acumulación de las líneas de campo magnético alrededor de la ionopausa diurna muestra esta orientación y de hecho ocurre preferentemente en ese plano. Debido a la frecuente orientación del vector magnético del viento solar en el plano de la eclíptica es posible afirmar que el proceso de acumulación es más efectivo a bajas latitudes y nulo en las regiones polares del planeta en las que las líneas de campo magnético pasan rasantes a la ionopausa (el eje de rotación de Venus es muy aproximadamente perpendicular al plano de su órbita y por consecuencia al de la eclíptica).

Una implicación importante de esta distribución es el hecho de que el contacto entre el viento solar y el plasma ionosférico en la región del terminador planetario no es el mismo a bajas y altas latitudes. La presencia de flujos magnéticos intensificados a bajas latitudes crea condiciones como las mostradas en la figura 7 en que la presión magnética local substituye a la acción del viento solar en el proceso de confinamiento de la ionosfera. Por otra parte, la acumulación de las líneas de campo magnético es mucho menor a altas latitudes y por consiguiente el viento solar puede actuar directamente sobre el material ionosférico. Esto quiere decir que una interacción de tipo viscoso como la representada en la figura 12 ocurrirá preferentemente cerca de las regiones polares y que la consiguiente entrada de par-

tículas del viento solar hacia el interior de la umbra planetaria no podrá tener simetría axial. A bajas latitudes, el movimiento del viento solar es, de hecho, controlado en gran parte por el campo magnético interplanetario acumulado alrededor de la ionopausa diurna y dirigido, cerca del terminador, en direcciones paralelas a la superficie del planeta.

Esta configuración general de la región de interacción en el terminador explica de manera consistente las condiciones de asimetría exhibidas por la distribución de plasma ionosférico en el hemisferio noche, según observaciones realizadas con el Pionero-Venus. Uno de los resultados más notables dados a conocer a raíz de esa investigación fue la identificación de la geometría de la ionopausa nocturna del planeta. Aun cuando la presencia de tal superficie de discontinuidad en el lado noche puede entenderse con base en la penetración del flujo del viento solar por la región del terminador, no es posible predecir, dentro del contexto de ese concepto, su extensión y geometría dentro de la umbra planetaria. Un diagrama esquemático de estas propiedades se presenta en la figura 14, la cual contiene la superposición de todos los cruces de la ionopausa detectados en el hemisferio noche durante las primeras 120 órbitas del Pionero-Venus. Esta distribución de cruces de la ionopausa se obtiene conforme el planeta gira alrededor de su eje de rotación y el satélite atraviesa (a lo largo de la sección de su trayectoria mostrada en la figura 6) diferentes regiones, una a la entrada y otra a la salida de la ionosfera.

El aspecto más notable de estas observaciones es el hecho de que revelan la presencia de una región (centrada a un ángulo solar de $\chi = 110^\circ$ en los cruces de entrada —alta latitud— y de $\chi = 135^\circ$ en los cruces de salida —baja latitud—) en la que la ionopausa alcanza una altura máxima antes de descender cerca del planeta en las regiones más internas de la umbra planetaria. El aspecto que tal prominencia presenta en el espacio se muestra en la figura 15 en la que las líneas verticales a las curvas de latitud constante indican la altura de la ionopausa como función del ángulo solar. La configuración de las trazas que envuelven a tales líneas deja ver claramente una deformación cuyas dimensiones parecen ser más acentuadas a bajas latitudes.

La asimetría impuesta por la acumulación preferente de las líneas de campo interplanetario a bajas latitudes permite una explicación sencilla de la formación y geometría de esta distorsión a la que se le conoce como prominencia ionosférica nocturna. Tal explicación puede fundamentarse en la entrada selectiva del flujo del viento solar al interior de la umbra planetaria por las regiones polares según se indicó anteriormente. Un diagrama de la manera en que esto ocurre se presenta en la figura 16. Los vectores trazados desde el polo representan las direcciones de movimiento de partículas que al penetrar al interior de la umbra planetaria se distribuyen en forma de abanico. Esta distribución obedece a la tendencia del viento solar a llenar el espacio vacío formado por la exclusión del mismo viento solar a bajas latitudes (en donde el movimiento es a lo largo de las líneas del campo magnético interplanetario acumuladas alrededor de la ionosfera diurna).

Según se sugirió en la figura 12, que describe el proceso de interacción en el terminador, la entrada del viento solar al interior de la umbra planetaria debe ir acompañada del plasma ionosférico arrastrado por él. Por consiguiente, es importante el entender que el diagrama de vectores trazados desde la región polar en la figura 16 debe también representar al movimiento de partículas ionosféricas forzadas a desplazarse, a menores alturas y con menor velocidad, en las mismas direcciones. De la figura 16 se puede asimismo apreciar que tal movimiento debe extenderse por todo el interior de la umbra y llegar hasta la superficie cilíndrica formada por las líneas de campo magnético interplanetario que envuelven a la ionosfera diurna.

Puesto que en esa frontera las partículas ionosféricas son bruscamente aceleradas por el impulso recibido del viento solar que fluye por fuera, deberá haber en esa región un cambio repentino en la densidad ionosférica. Esto implica que para cada dirección trazada desde el polo (como se muestra en la figura 16), la intersección de los flujos ionosféricos internos (en la umbra) con los externos del viento solar (que se mueven a lo largo de las líneas del campo magnético interplanetario) debe demarcar la posición de la máxima extensión de la ionopausa nocturna. De estas consideraciones se puede inferir que la altura de la ionopausa sobre el hemisferio noche del

planeta no es uniforme sino que debe presentar, a lo largo de curvas de latitud constante (como en los diagramas de las figuras 14 y 15) una elongación dominante. Esta corresponde a la región en donde los flujos ionosféricos son llevados desde los polos hasta la superficie cilíndrica representada en la figura 16. Asimismo podemos advertir que tal elongación será mayor a menores latitudes conforme crece la distancia marcada desde los polos.

La comparación de las estimaciones teóricas de dichas alturas máximas como función de la latitud con las observadas experimentalmente se muestra en la figura 17. La curva teórica se calcula con base en valores del ángulo de desviación β (medido hacia el interior de la umbra) que hacen compatibles la latitud y el ángulo solar local de la distorsión ionosférica observada. El hecho de que el rango de alturas experimentales se ajuste adecuadamente a las predicciones teóricas permite predecir con bastante precisión que la elongación ionosférica deberá alcanzar una altura máxima de unos 6 000 km en la región ecuatorial.

Aun cuando no existan observaciones *in situ* de la dirección de penetración de los flujos del viento solar al interior de la umbra, ha sido posible verificar, por medio de otro tipo de estudios colaterales, la validez de la geometría indicada en la figura 16. Estos se refieren a la configuración magnética presente en el interior de la umbra y en particular a la detección de la frontera magnética formada por las líneas de campo interplanetario que envuelven a la ionosfera diurna. Esta parece conservar su identidad aun a distancias equivalentes a varios radios planetarios mientras que, como se apuntó arriba, la ionopausa nocturna no debe llegar más allá de los 6 000 km.

El arrastre de partículas ionosféricas a través del terminador ha permitido asimismo entender la inesperada presencia de fuertes concentraciones ionosféricas en el hemisferio noche, detectadas desde que se inició el reconocimiento experimental de Venus hace más de 10 años. Observaciones realizadas por medio de técnicas de radioocultamiento del vehículo Mariner 5 revelaron que la concentración de partículas ionosféricas, que es máxima a unos 140 km sobre la superficie del lado día, se encuentra también en el hemisferio no-

che (pero con una intensidad máxima de un orden de magnitud menor). Ejemplos del perfil ionosférico característico del hemisferio noche se muestran en la figura 18. Estos fueron obtenidos durante diferentes órbitas de los vehículos Venera y revelan una gran variabilidad en la concentración y altura de la región de máxima ionización (que hace, inclusive, que se manifiesten ocasionalmente dos regiones separadas). Debido a la lenta rotación —retrógrada— del planeta (con un período equivalente a 243 días terrestres) no es posible explicar la presencia de tales concentraciones ionosféricas como resultado de procesos de fotoionización de la atmósfera diurna. De hecho, la rapidez de los procesos de recombinación que tienen lugar en las largas noches planetarias reduciría casi totalmente la ionización generada en el hemisferio día. Al permitir una entrada continua y acelerada de partículas ionosféricas por el terminador polar, se le da un carácter local a las fuentes de ionización nocturna y se explican las fuertes concentraciones ionosféricas observadas.

Conclusiones

La descripción aquí expuesta del flujo del viento solar conforme fluye alrededor del hemisferio día, pasa por el terminador planetario y entra a la umbra por las regiones polares, se refiere a un comportamiento de primer orden que solo proporciona los aspectos más generales del proceso de interacción con la ionosfera del planeta. A pesar de que esta descripción permite una interpretación consistente de las varias observaciones experimentales realizadas hasta la fecha, es claro que muchos de los conceptos introducidos tienen aún un carácter preliminar.

Estudios detallados de diferentes aspectos del proceso de interacción se llevan actualmente a cabo a fin de conocer las condiciones bajo las que la descripción arriba presentada es válida. De mayor importancia son los efectos que fluctuaciones temporales en la presión cinética del viento solar producen a la ionosfera. Evidencia experimental de tales efectos es la observación de nubes de plasma ionosférico que se detectan, en algunas órbitas, afuera de la ionopausa. Estas parecen resultar de procesos de socavamiento intermitente de la ionosfera durante períodos en los que aumenta

el confinamiento producido por el viento solar y pueden estar relacionados con la formación de las cuerdas magnéticas representadas en la figura 9. La manera y el grado en el que deformaciones locales de la ionopausa modifican su geometría general es algo que aún no se ha determinado ni se ha podido evaluar de las escasas observaciones experimentales hasta ahora analizadas. Sin embargo, la información disponible indica que, a pesar de que tales deformaciones pueden afectar de manera continua la configuración de la región de interacción, la ionosfera tiende a responder de manera global a las perturbaciones que le causa el viento solar. Estudios detallados de tal respuesta permitirán conocer la coherencia del material ionosférico y su capacidad para actuar como obstáculo deformable inmerso en el viento solar.

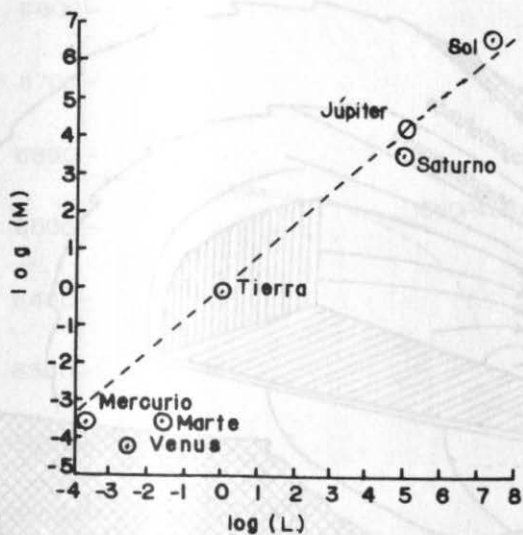
Por otro lado, se requiere también de observaciones más precisas de la magnitud y dirección de movimiento del flujo del viento solar dentro de la umbra planetaria. Poco se conoce, por ejemplo, de las condiciones existentes en las regiones inmediatas al eje Sol-Venus, a grandes distancias detrás del planeta. Como se indicó antes, se espera que la ionopausa nocturna se extienda a unos 6 000 km por encima de la región ecuatorial. Sin embargo, otros efectos asociados a la interacción combinada de los flujos del viento solar que convergen desde ambos polos podrían modificar y extender aún más la posición de la ionopausa nocturna en esa región.

Asimismo es importante el hecho de que observaciones preliminares de la estructura de la ionosfera nocturna revelan regiones en donde la densidad electrónica local decrece violentamente a valores comparables a los del viento solar. Tales "agujeros" ionosféricos parecen estar localizados preferentemente cerca del meridiano de la medianoche y pueden ser producto del proceso de interacción que tiene lugar en la ionopausa. Estas y otras cuestiones son actualmente motivo de intenso estudio en los datos experimentales de los vehículos Venera y Pionero Venus y serán examinadas con mayor detalle durante el próximo experimento Franco Soviético 'Misión Venus' que se realizará en 1983.

Tabla 1

Júpiter	1.5×10^{30} Gauss cm^3	400 000 γ
Saturno	2.2×10^{29} Gauss cm^3	20 000 γ
Tierra	8.2×10^{25} Gauss cm^3	30 000 γ
Mercurio	2.4×10^{22} Gauss cm^3	160 γ
Marte	$< 2.0 \times 10^{22}$ Gauss cm^3	60 γ
Venus	$< 10^{21}$ Gauss cm^3	4 γ

$$1\gamma = 10^5 \text{ Gauss}$$



L = Momento angular normalizado con respecto al de la Tierra
M = Momento magnético normalizado con respecto al de la Tierra

Fig. 1. Diagrama de la Ley de Bode magnética. (Russell, 1978).

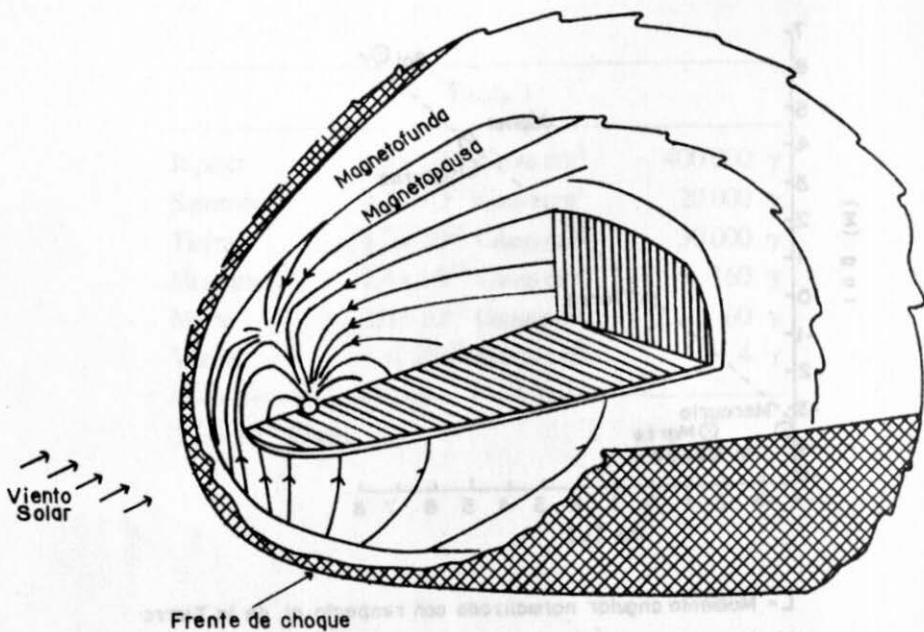


Fig. 2. Geometría del campo geomagnético deformado por el viento solar el cual atraviesa primero el frente de choque y fluye por fuera de la magnetopausa en la región conocida como magnetofunda. (Johnson, 1978).

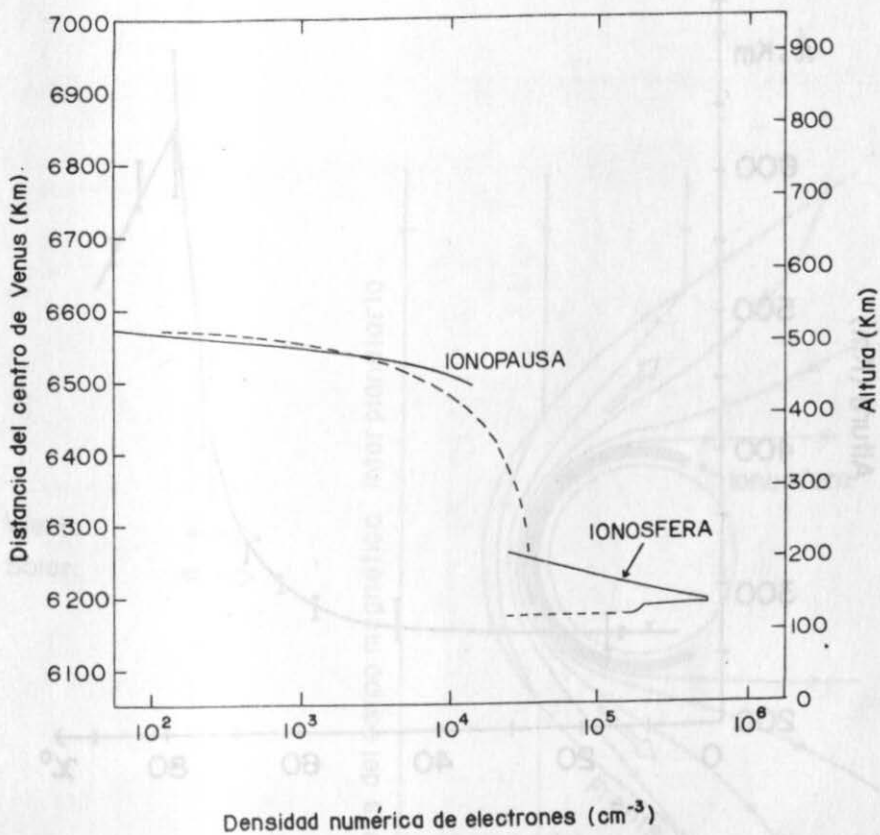


Fig. 3. Perfil ionosférico sobre el hemisferio día del planeta Venus. La ionopausa está definida como la región en donde la densidad electrónica decrece rápidamente a valores característicos del viento solar. (Fieldbo y Eshleman, 1969).

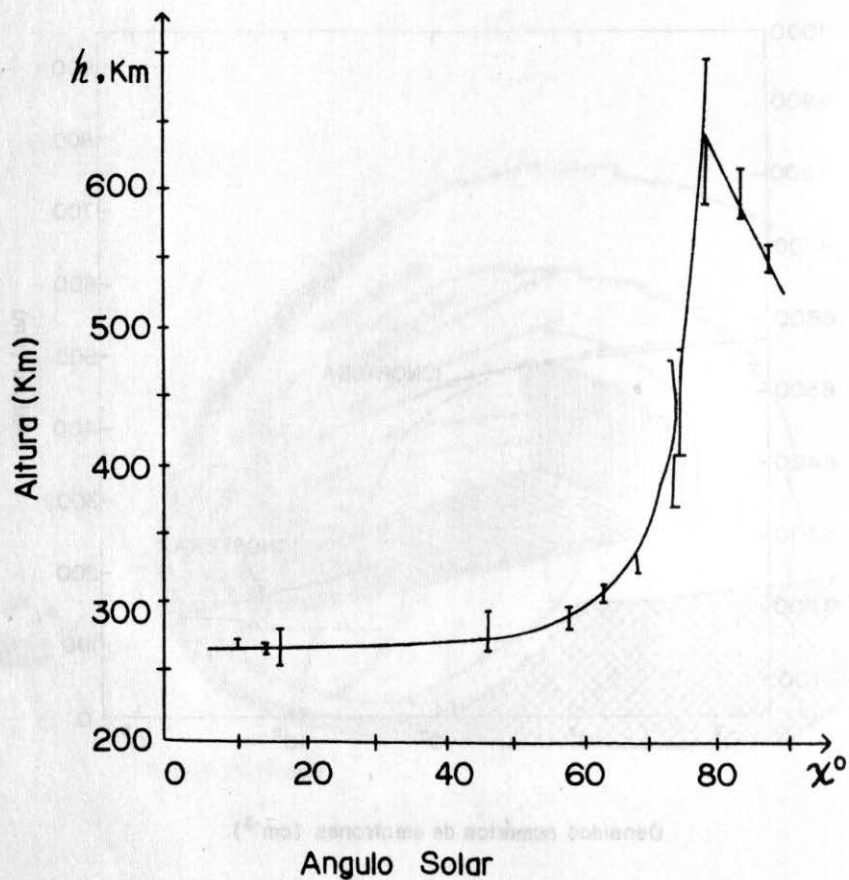


Fig. 4. Altura promedio de la ionopausa como función del ángulo solar, χ . Las barras verticales indican el rango de variabilidad de la altura. (Breus, 1979).

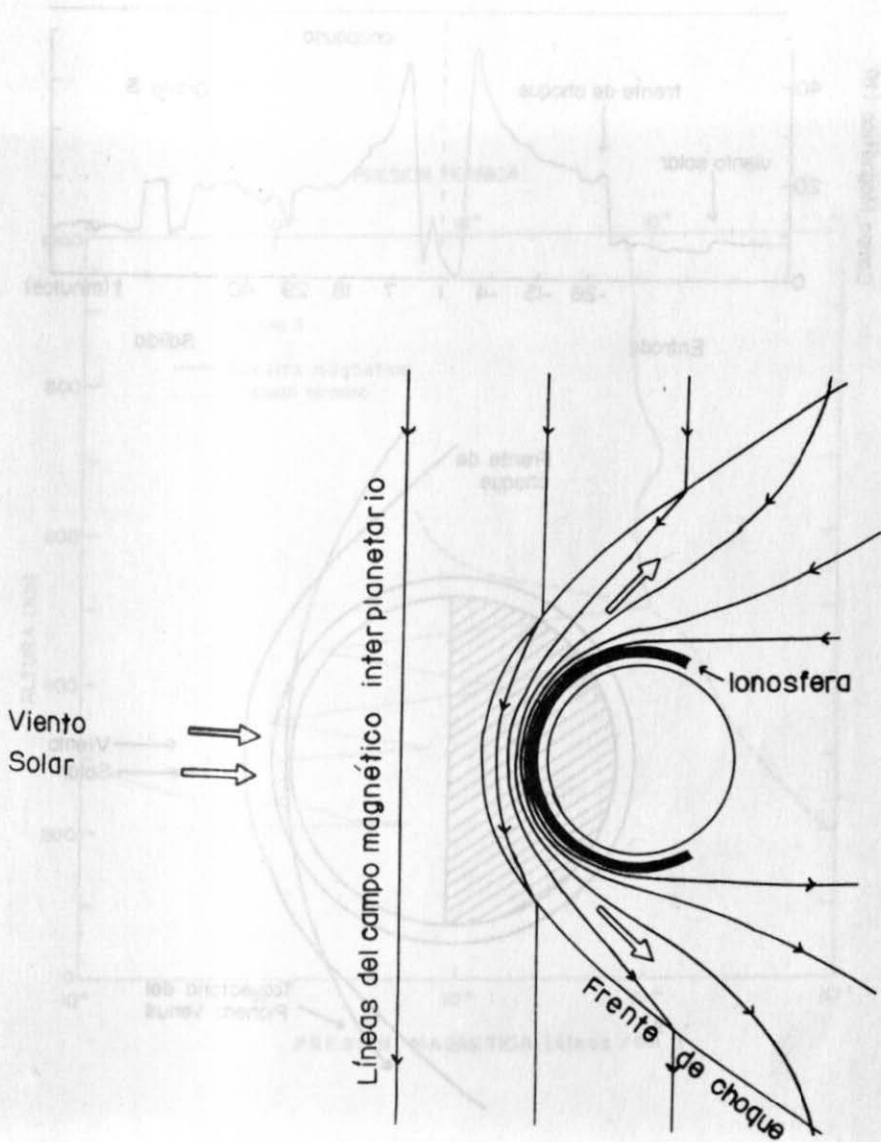


Fig. 5. Diagrama de la deformación y acumulación de las líneas del campo magnético interplanetario alrededor del obstáculo ionosférico. Las líneas de campo descansan usualmente sobre el plano de la eclíptica y pueden suponerse perpendiculares a la dirección de movimiento del viento solar. (Johnson y Hanson, 1979).

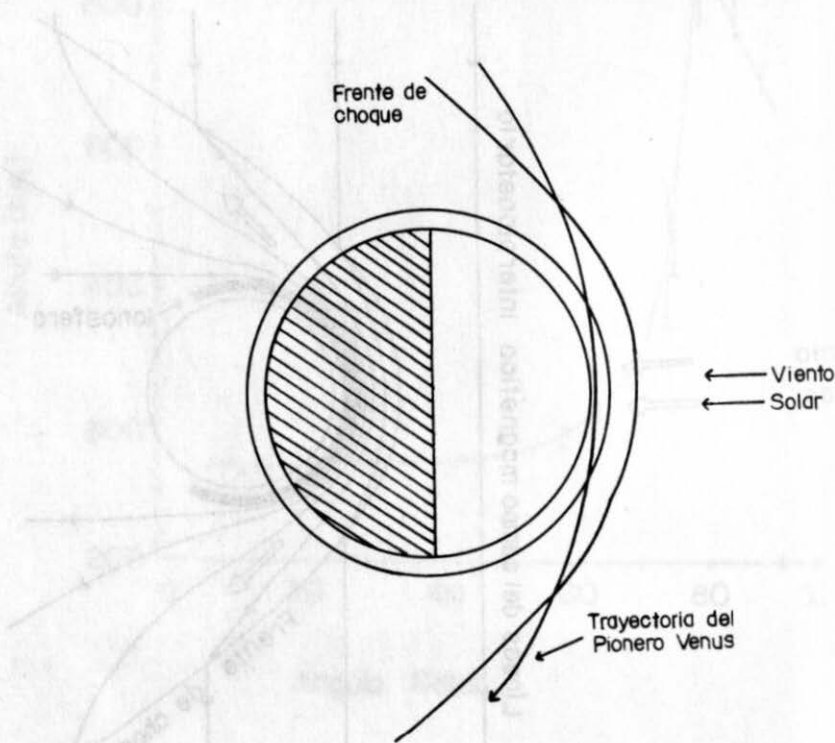
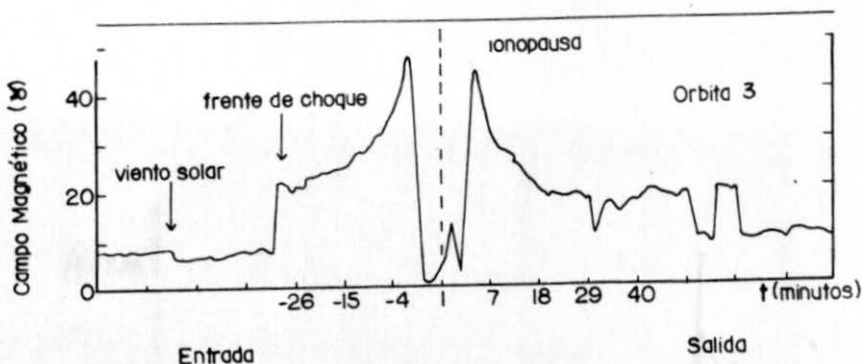


Fig. 6. Registro magnético a lo largo de la Trayectoria del Pionero Venus. Las discontinuidades observadas para $t < -26$ min y $t > 40$ min corresponden al cruce del satélite por el frente de choque. Movimientos repentinos de éste, debidos a cambios en la velocidad del viento solar, pueden dar lugar a cruces múltiples como ocurrió para $t > 40$ min en la órbita mostrada. El diagrama inferior muestra la trayectoria proyectada sobre el plano perpendicular a la eclíptica. (Russell *et al.*, 1979).

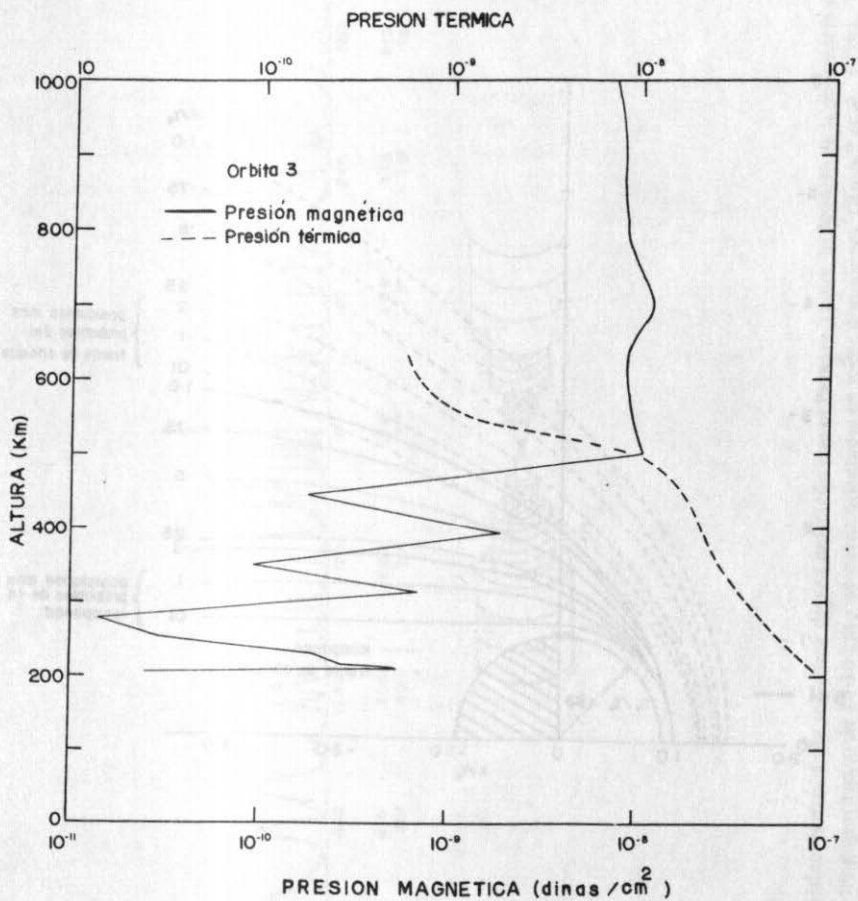


Fig. 7. Perfil del balance de la presión magnética del viento solar y la presión térmica del material ionosférico. La ionopausa está definida como la región en donde la presión térmica cae repentinamente. (Russell *et al.*, 1979).

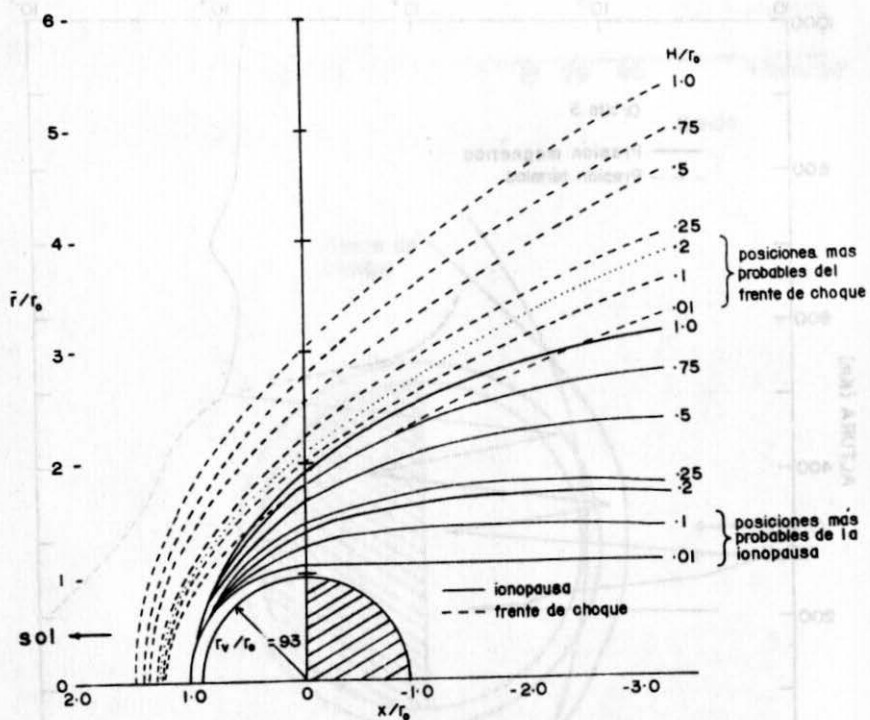


Fig. 8. Diagrama de ionopausas y frentes de choque alrededor de Venus según el modelo de flujo invíscido. (Spreiter *et al.*, 1970).

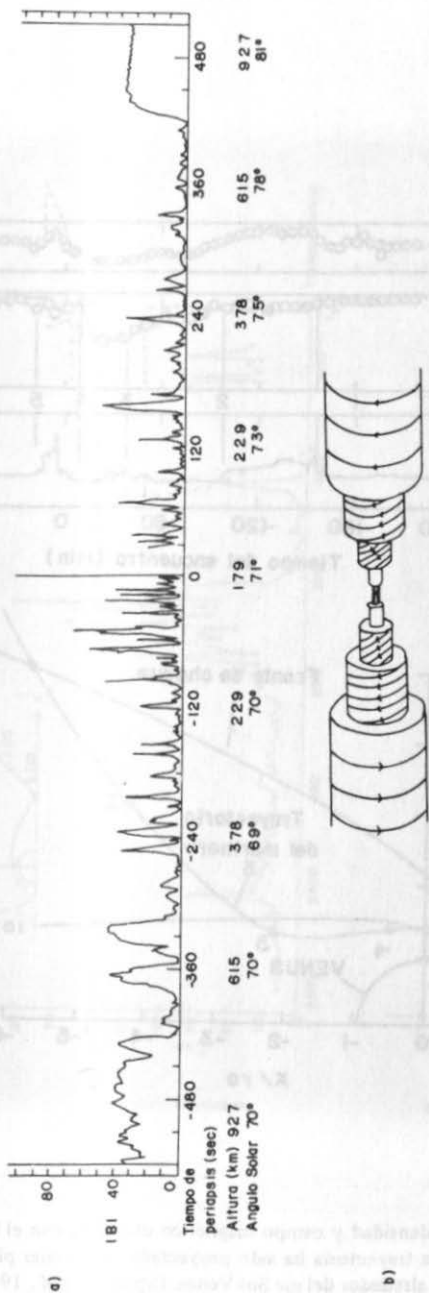


Fig. 9. a) Registro magnético dentro de T_a ionosfera diurna detectado con el Pionero Venus. b) Modelo de la geometría de las cuerdas magnéticas. Estas tienen un grosor típico de 10-30 km y aparecen orientadas en todas direcciones. (Russell *et al.*, 1979).

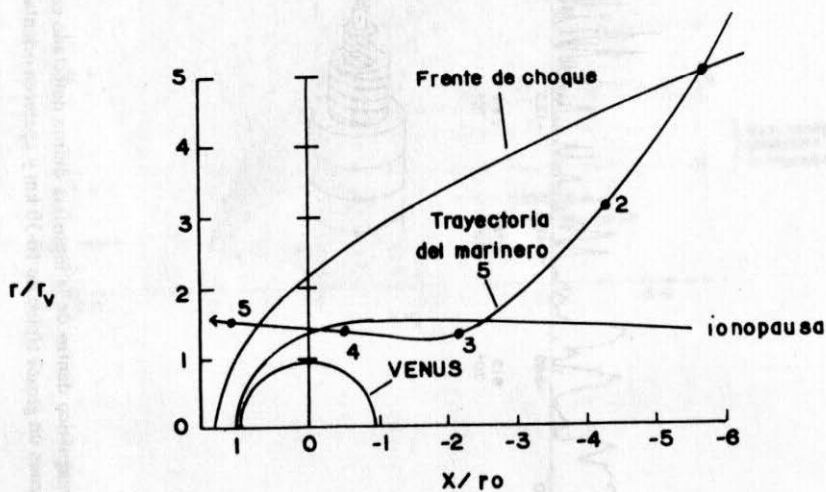
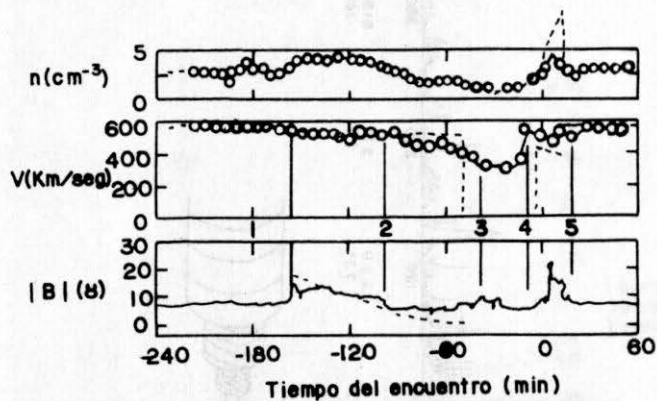


Fig. 10. Perfil de velocidad, densidad y campo magnético obtenido con el Mariner 5 atrás del terminador planetario. La trayectoria ha sido proyectada en un solo plano suponiendo condiciones de simetría axial alrededor del eje Sol-Venus. (Spreiter *et al.*, 1970).

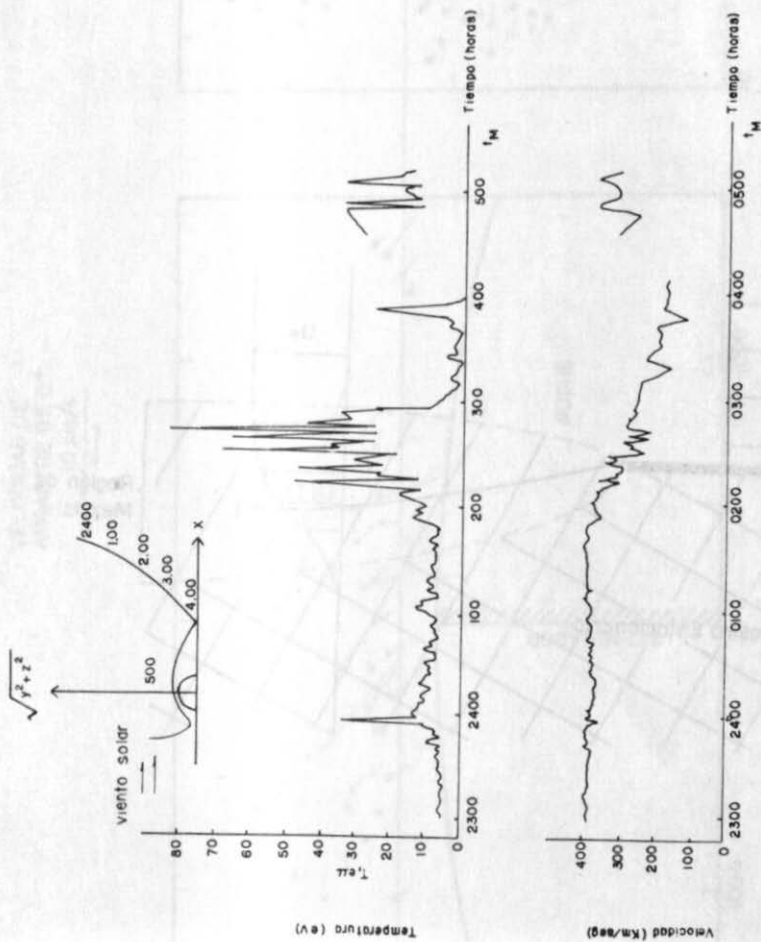


Fig. 11. Comportamiento de la velocidad y temperatura del plasma según observaciones realizadas en la estela del planeta con el vehículo Venera 9 (Romanov *et al.*, 1979).

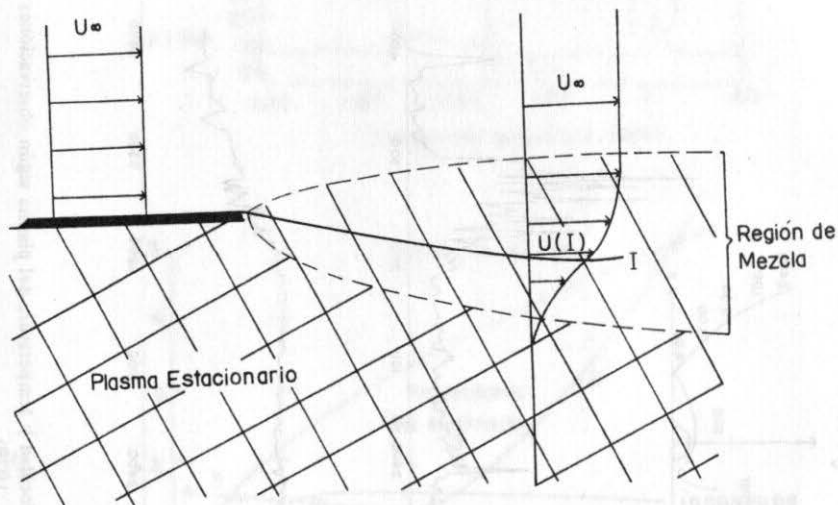


Fig. 12. Modelo en dos dimensiones de interacción viscosa entre el viento solar y el plasma ionosférico cerca del terminador planetario. El contacto inicial ocurre detrás de una placa plana que separa los dos medios y la cual representa la región de campo magnético acumulado alrededor de la ionosfera diurna. $U(I)$ indica la velocidad presente a lo largo de la interfase I. (Pérez de Tejada y Dryer, 1976).

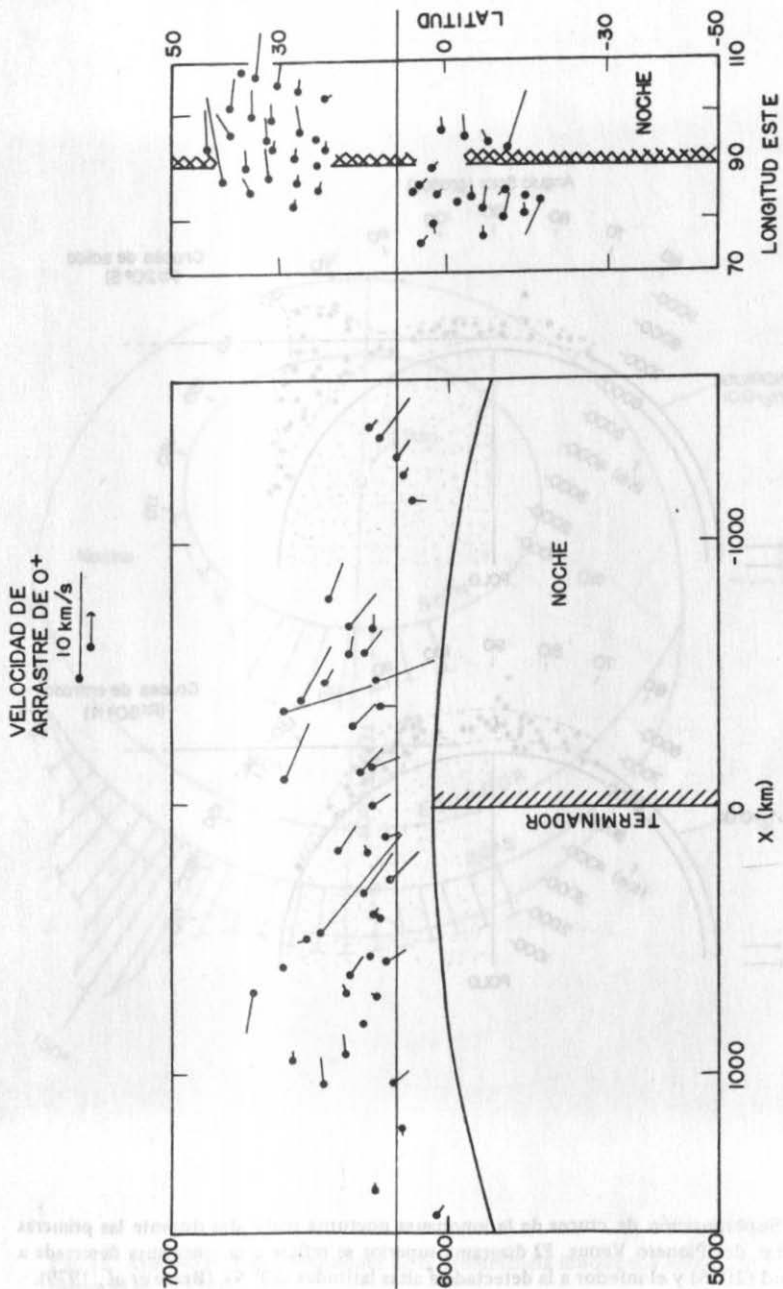


Fig. 13. Dirección de movimiento de partículas ionosféricas cerca del terminador según observaciones realizadas con el Pionero Venus. Los vectores velocidad están trazados a partir de las posiciones de medición. (Knudsen *et al.*, 1980).

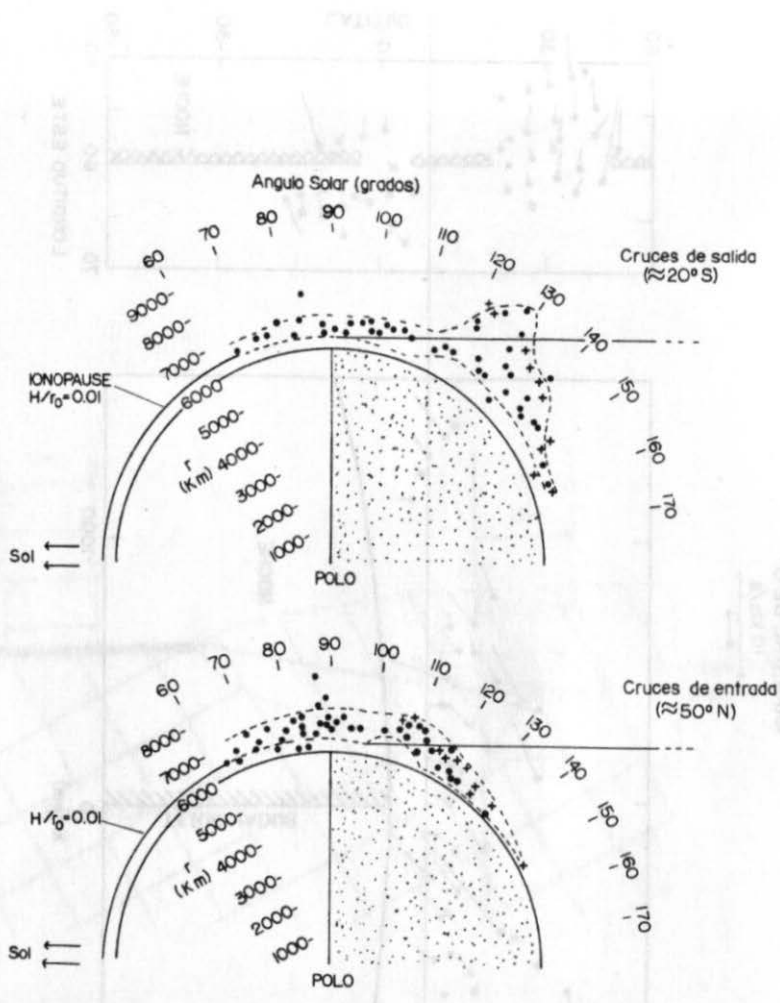


Fig. 14. Superposición de cruces de la ionopausa nocturna realizadas durante las primeras 120 órbitas del Pionero Venus. El diagrama superior se refiere a la ionopausa detectada a baja latitud (20°S) y el inferior a la detectada a altas latitudes (50°N). (Brace *et al.*, 1979).

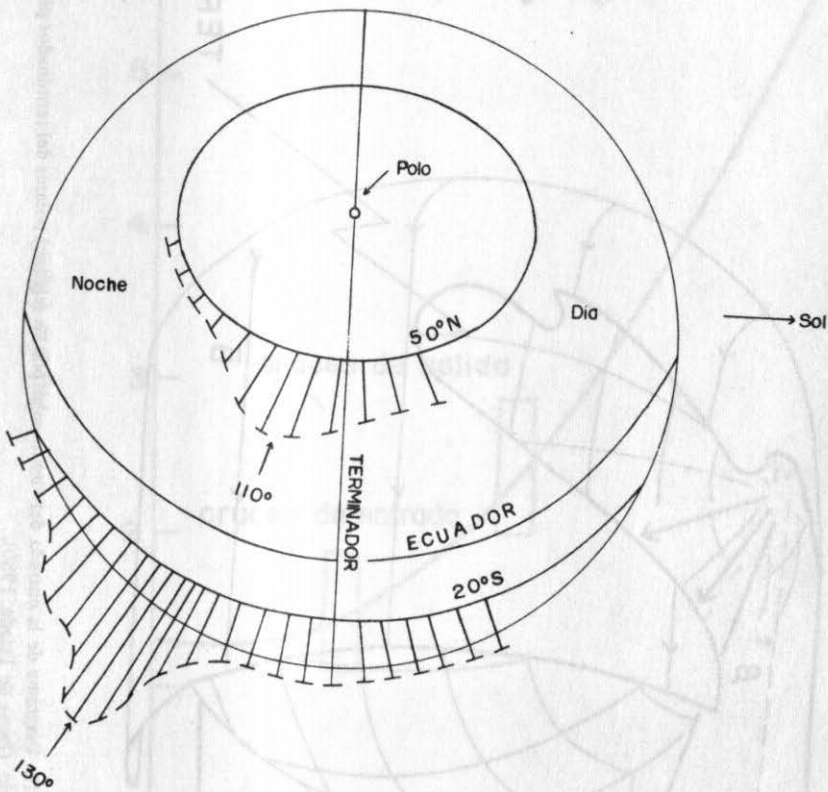


Fig. 15. Aspecto en tres dimensiones de la prominencia ionosférica nocturna. (Brace *et al.*, 1979).

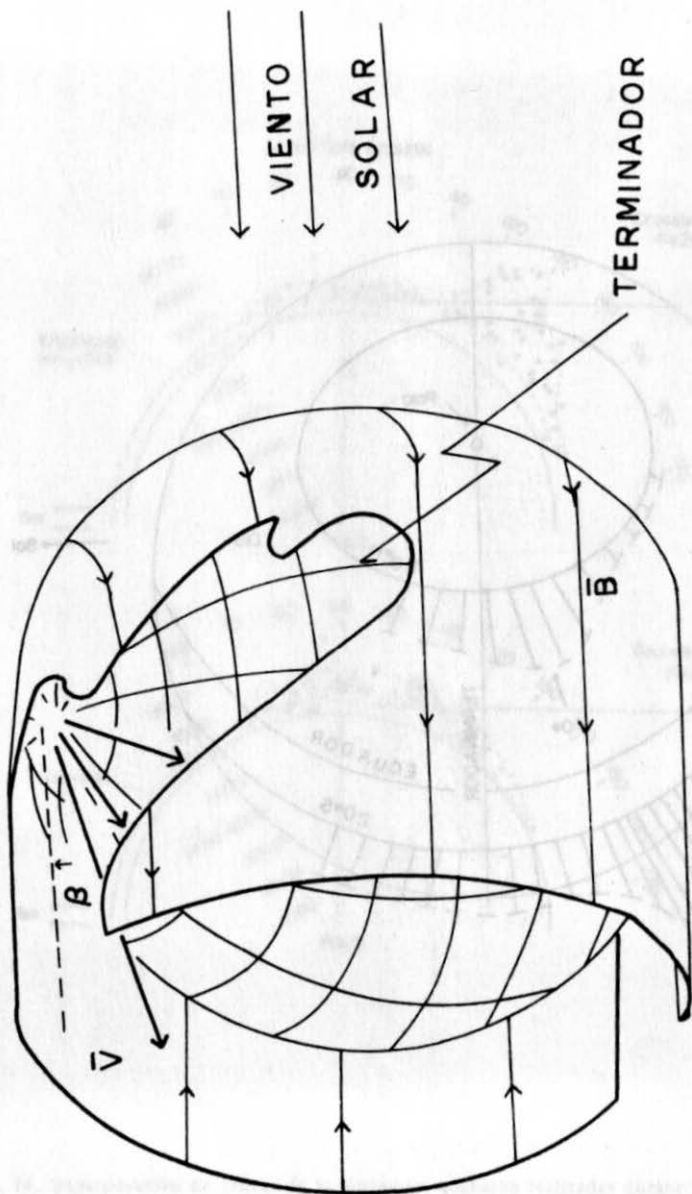


Fig. 16. Diagrama de la entrada del viento solar por las regiones polares del terminador planetario. (Pérez de Tejada, 1980).

$\times 10^3$

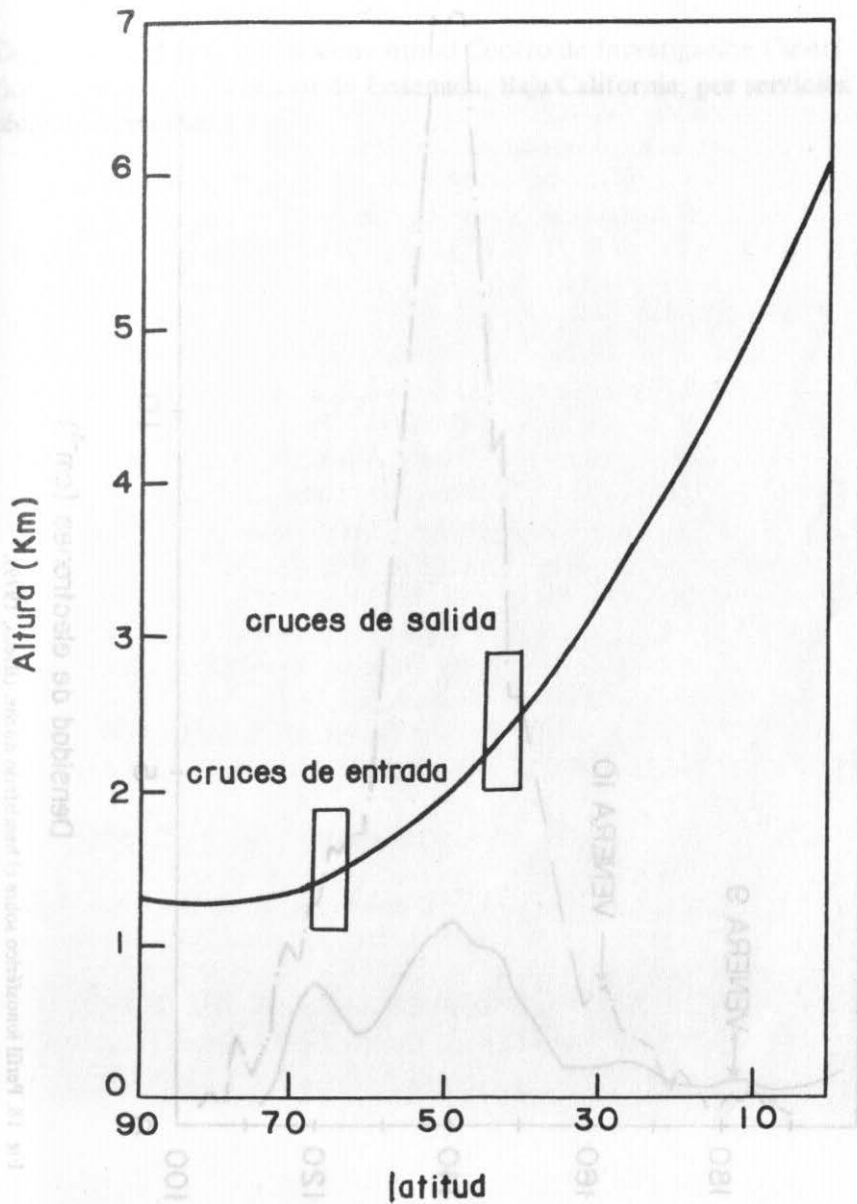


Fig. 17. Comparación de la altura de la ionopausa nocturna observada, con la predicción del modelo de entrada polar. (Pérez de Tejada, 1980).

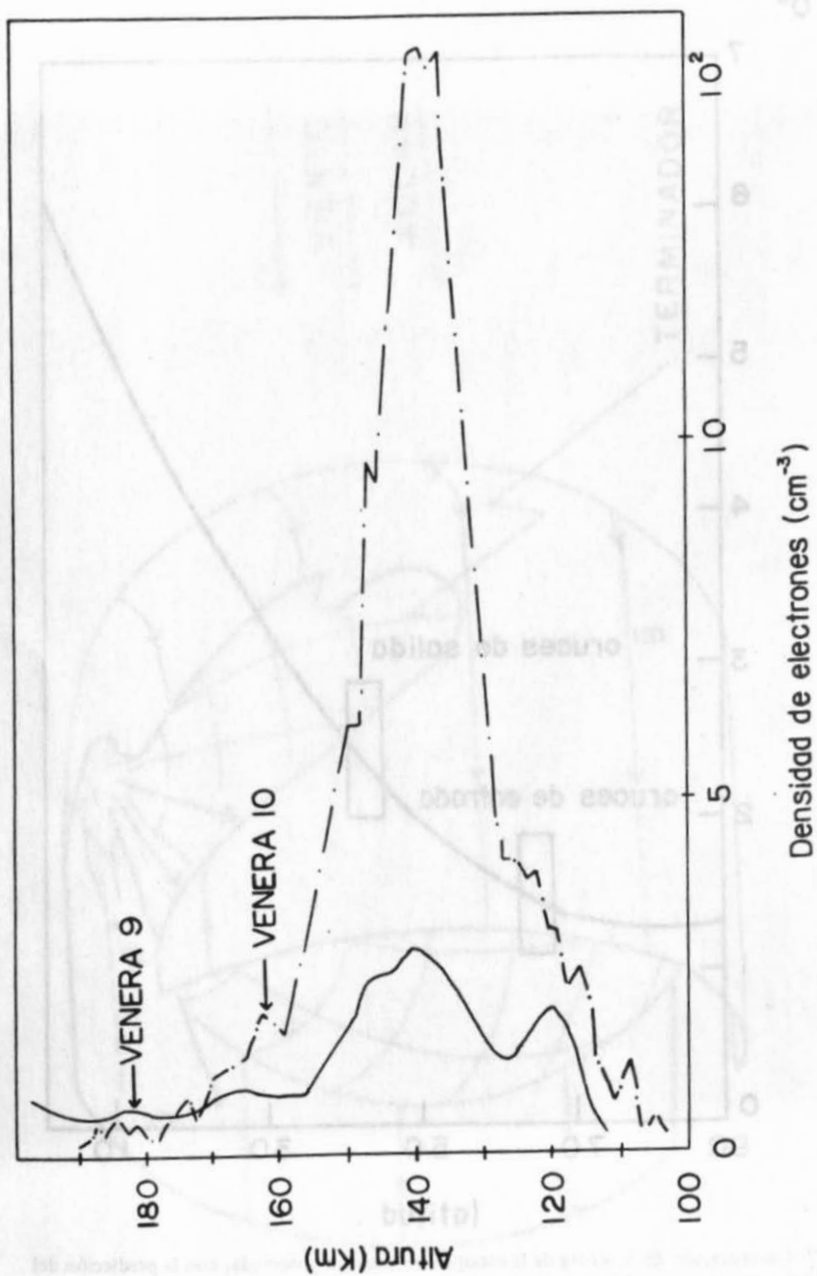


Fig. 18. Perfil ionosférico sobre el hemisferio noche. (Breus, 1979).

Agradecimiento

Deseo expresar mi reconocimiento al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California, por servicios técnicos prestados.

BIBLIOGRAFIA*

- BRACE, L. H., H. A. TAYLOR Jr., P. A. CLOUTIER, R. E. DANIELL Jr. and A. F. NAGY., 1979. On the Configuration of the Night side Venus Ionopause, *Geophys. Res. Lett.* 6, 545.
- BREUS, T. K., 1979. Venus: Review of Present Understanding of Solar Wind Interaction, *Space Science Reviews* 23, 253.
- FIELDBO, G., and V. P. ESHLEMAN, 1969. Atmosphere of Venus as studied with the Mariner 5 radio occultation experiment, *Science*, 4, 879.
- JOHNSON, F. S., 1978. The Driving Force for the Magnetospheric Convection, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 18, 161.
- JOHNSON, F. S. and W. B. HANSON, 1979. A New Concept for the Dayside Magnetosphere of Venus, *Geophys. Res. Letters*, 6, 581.
- KNUDSEN, W. C., K. SPENNER, K. L. MILLER and V. NOVAK, 1980. Transport of Ionospheric O⁺ ions Across the Venus Terminator and Implications, *J. Geophys. Res.* 85, 7303.
- PEREZ-DE-TEJADA, H., and M. DRYER, 1976. Viscous Boundary Layer for the Venusian Ionopause, *J. Geophys. Res.* 81, 2023.
- PEREZ-DE-TEJADA, H., 1980. Viscous Flow Circulation of the Solar Wind Behind Venus, *Science* 207, 981.
- ROMANOV, S. A., V. N. SMIRNOV and O. L. VAISBERG, 1979. On the Nature of Solar Wind-Venus Interaction, *Cosmic Research* 16, 603.
- RUSSELL, C. T., 1978. Re-evaluating Bode's law of Planetary Magnetism. *Nature*, 272, 147.
- RUSSELL, C. T., R. C. ELPHIC and J. A. SLAVIN, 1979. Initial Pioneer-Venus Magnetic Field Results, Dayside Observations, *Science*, 203, 745.
- SPREITER, J. R., A. L. SUMMERS, and A. W. RIZZI, 1970. Solar Wind Flow Past Non-Magnetic Planets, *Planet. Space Sci.*, 18, 1281.

* (Citada únicamente en la explicación de las figuras)

