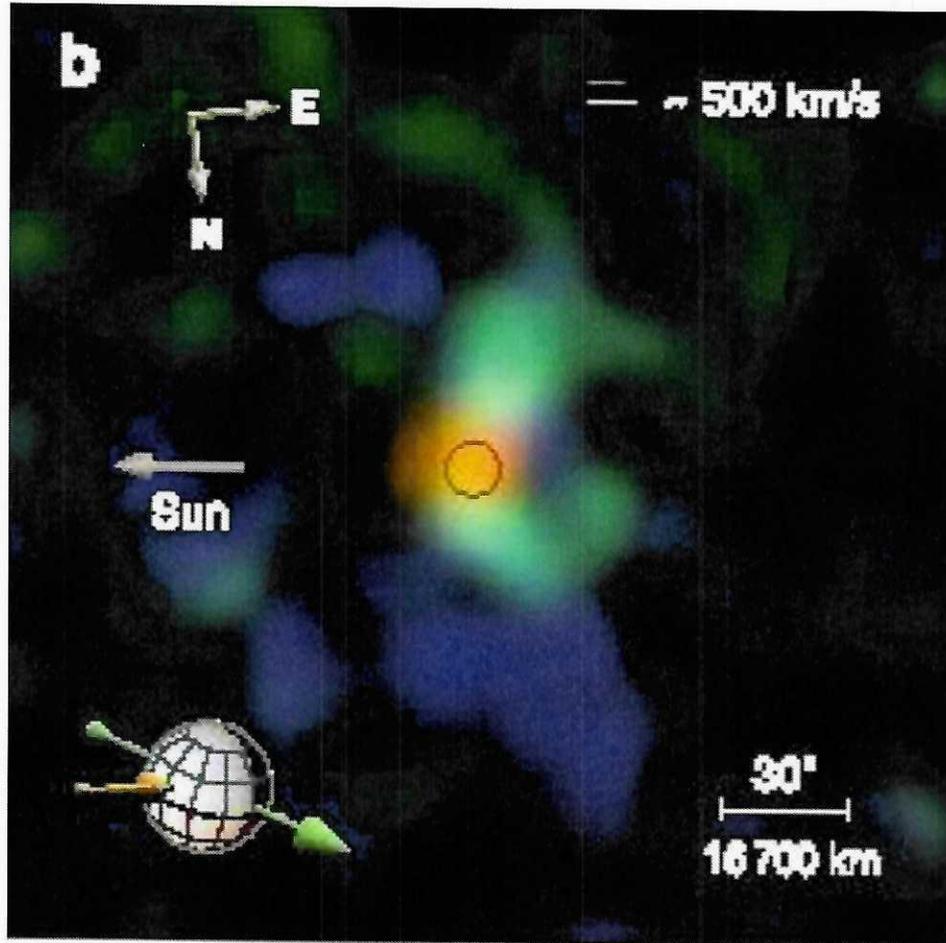


# Vortex Structures in Planetary Plasma Wakes

By  
H. Pérez-de-Tejada

Cambridge  
Scholars  
Publishing





- Imagen de emisión en Rayos X del halo ionosférico observado en
- la vecindad del planeta Marte. Las mediciones se hicieron con el
- espectrómetro reflector integral (RGS) del satélite XMM Newton .
- (Dennerl et al., 2006).

**REPORTE DE LA PUBLICACIÓN DEL LIBRO: "VORTEX STRUCTURES IN PLANETARY PLASMA WAKES" ESCRITO POR H. PÉREZ-DE-TEJADA Y COMUNICADO POR LA EDITORIAL "CAMBRIDGE SCOLLARS PUBLISHING" EN CAMBRIDGE, INGLATERRA [ISBN (10): 1.5275-0110-8]**

H. Pérez-de-Tejada (Instituto de Geofísica, UNAN, México)

El propósito de este reporte es comunicar la publicación del libro "**VORTEX STRUCTURES IN PLANETARY PLASMA WAKES**" escrito por el autor y distribuido por la editorial: Cambridge Schollars Publishing (disponible en un archivo de 150 páginas en esa editorial). El libro describe el origen, el desarrollo, y la preparación de ideas que dieron lugar a la interpretación de fenómenos físicos detectados en la región de interacción del viento solar con ionosferas planetarias (Venus, Marte, y cuerpos cometarios). Su intención es la de utilizar procesos fluido dinámicos para describir el comportamiento del viento solar conforme se mezcla con partículas ionosféricas planetarias.

Entre sus principales resultados el libro se inicia con el descubrimiento en 1982 de estructuras tipo vórtice en los datos del vehículo espacial "Pionero Venus" y que se asemejan a vórtices observados en pruebas de laboratorio (fluido alrededor de obstáculos) y en fenómenos naturales terrestres (ciclones, torbellinos, remolinos). Inicialmente, se hicieron estudios comparativos de datos obtenidos con los vehículos espaciales Marinero 5, Venera, y el Pionero Venus de la NASA), los cuales fueron enviados en trayectorias de paso por Venus o en órbita alrededor de ese planeta, y más recientemente con el vehículo espacial Venus Express enviado por la Agencia Espacial Europea (ESA). En las Figuras 1.1 del libro obtenidas con el Pionero Venus, y también en las Figuras 1.3 del Venus Express (**incluidas como Figura 1 en el reporte**) se observa que la distribución de los vectores velocidad del viento solar en la estela del planeta Venus es de tipo vórtice.

Durante el desarrollo de esas ideas se identificó la existencia de una transición (discontinuidad) inmersa en los datos obtenidos con los vehículos espaciales detectada a través de la estela del planeta (Capítulo II). A tal transición se le identificó como transición intermedia pues se le localizó ubicada entre la frontera exterior de la ionosfera de Venus (ionopausa) y por detrás del frente de choque que se extiende adelante del planeta. Conforme se analizaron tales observaciones se desarrolló un modelo fluido dinámico para examinar la transferencia de momento cinético del viento solar a la ionosfera del planeta Venus y que se puede representar como un flujo que se desplaza sobre un objeto y que da lugar a variaciones en la temperatura y en la velocidad del fluido como se indica en la Figura 2.3 del Capítulo III (**incluida como la Figura 2 en el reporte**). El resultado principal del procedimiento fue el de explicar la medición de un flujo general de la ionosfera de Venus dirigida del hemisferio diurno al hemisferio nocturno (flujo trans terminator) con propiedades que coinciden con las propuestas en el modelo. De tales estudios se derivó el valor del coeficiente de viscosidad del viento solar con características fluido dinámicas como las propuestas por el Dr. E. Parker quien predijo la existencia del viento solar en el medio interplanetario.

Así mismo, se realizaron estudios para explicar la existencia de agujeros ionosféricos derivados de mediciones realizadas con el vehículo Pionero Venus (**incluidos como Figura 3 en el reporte**) en las que se observa un decrecimiento repentino y angosto en la densidad nocturna de la ionosfera de Venus. Tales características fueron interpretadas como resultado de la erosión que el viento solar produce sobre la ionosfera de Venus dando lugar a canales de plasma (**incluidos como Figura 4 en el reporte**) que se extienden en la dirección de su estela.

Estudios del movimiento de los vórtices en la estela de Venus han mostrado un desplazamiento permanente en la forma de un arrastre continuo en la dirección transversal a la dirección del viento solar (el cual es producido por la fuerza de Magnus). Tal efecto es similar al que se presenta en el movimiento de objetos que son enviados en contra de un flujo pero que, además, llevan un movimiento de giro (Capítulo V). La dirección de la estela de Venus es desviada lateralmente por el movimiento de rotación de su atmósfera como se muestra en la **Figura 5 del reporte**.

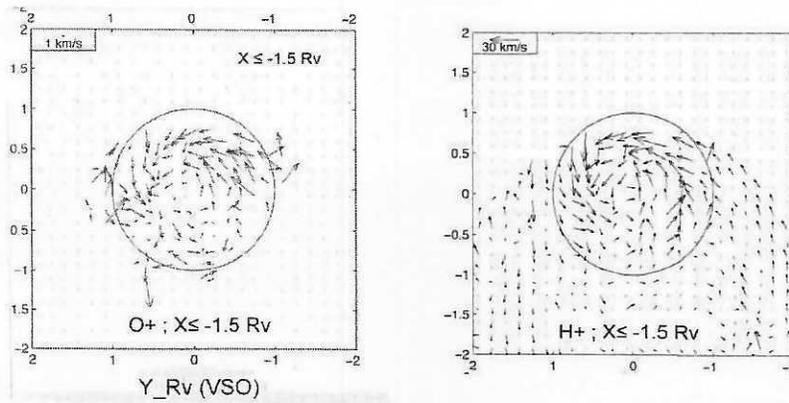
Las mediciones realizadas con los vehículos espaciales han hecho ver que además de los canales de plasma mostrados en la **Figura 4 del reporte** los vórtices conforman también estructuras separadas en la forma de un **saca-corcho** conforme se desplazan en la dirección de la estela (**Figura 6 en el reporte**). Su posición ocurre a menores distancias de Venus durante el mínimo del ciclo solar y su grosor muestra, además, un decrecimiento gradual a lo largo de la estela dando lugar a que las partículas que permanecen con movimiento de vórtice sean consecuentemente aceleradas.

Separadamente de estos estudios el libro discute también la interacción del viento solar con otras ionosferas planetarias (**Capítulo Vi**). En particular, se examinan las condiciones que existen en la frontera de la magnetosfera de la Tierra y alrededor del planeta Marte en donde se ha observado también la presencia de vórtices y una transición de plasma similar a la detectada en Venus. Igualmente ocurre una transferencia del momento cinético del viento solar a la ionosfera de Marte y, además, **un halo de plasma como el que se muestra en la figura de presentación del reporte** y que refleja el comportamiento fluido dinámico del proceso de interacción.

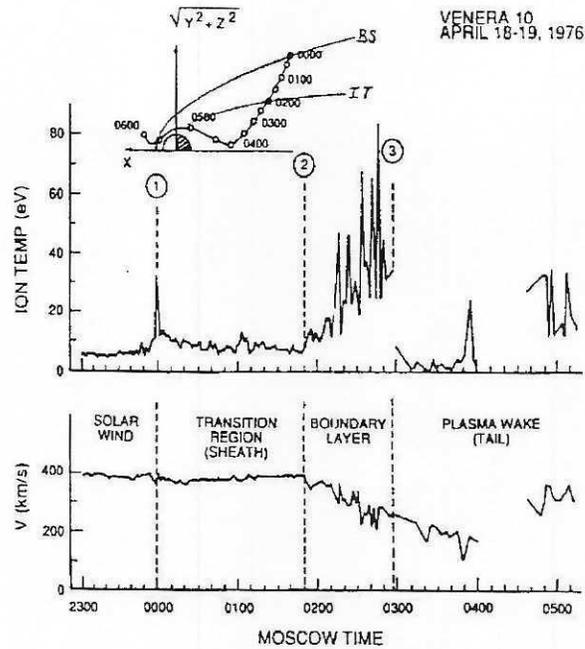
Cuestiones parecidas fueron identificadas también en observaciones realizadas en la interacción del viento solar con los cometas Halley y Giacobinni Zinner (**Capítulo VII**). En ambos casos hay evidencia de procesos similares en la transferencia del momento del viento solar a la ionosfera de ambos cometas y la presencia de la misma transición de plasma a la observada en Venus y Marte.

En la discusión de problemas pendientes (**Capítulo IX**) se menciona que en la aplicación de la dinámica de fluidos a la interacción del viento solar con ionosferas planetarias no se han identificado los procesos físicos que la acreditan. La validez de esta cuestión radica en el hecho de que el viento solar es un plasma no-colisional y, por tanto, no mantiene colisiones físicas con las partículas ionosféricas. A pesar de ello, mediciones realizadas con vehículos espaciales confirman que el viento solar se comporta como un medio continuo en los procesos de interacción. Ante tal disyuntiva ha habido interés en considerar que la turbulencia magnética medida en las regiones de interacción proporciona las razones necesarias para justificar la transferencia de momento y energía entre ambas poblaciones de partículas.

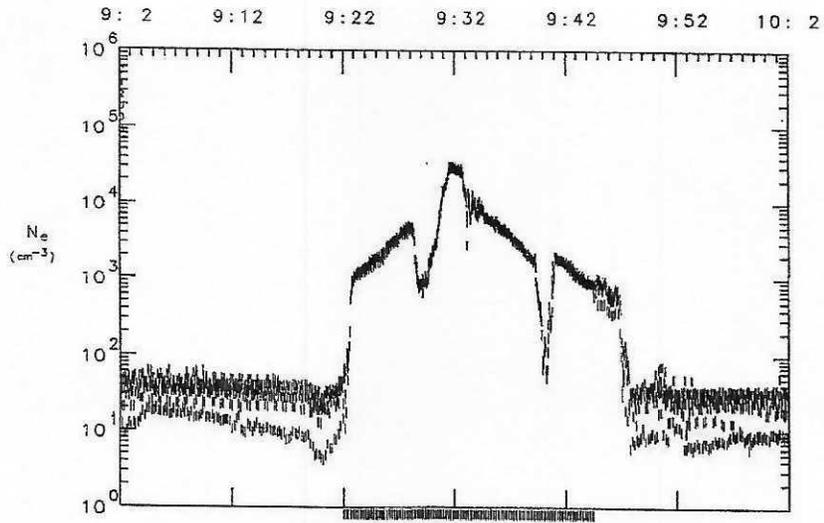
Esquemas teóricos se han planteado con ese objeto y entre ellos destaca el uso de la relación que existe entre sus propiedades fluido dinámicas (disipación viscosa y conducción térmica) y el camino libre medio en interacciones onda-partícula (Liepmann y Roshko, 1967). Su aplicación a la mezcla entre el viento solar y las partículas ionosféricas da lugar a estimar valores del orden de 1000 km para el camino libre medio en esas interacciones. Tal valor es comparable con el radio de Larmor de las partículas del plasma que efectúan movimientos de giro en su desplazamiento en el campo magnético existente. Tal similitud confirma la validez de ambos procedimientos para justificar la descripción fluido dinámica del proceso de interacción del viento solar con ionosferas planetarias. El libro describe además de estas características una interpretación similar de otras observaciones.



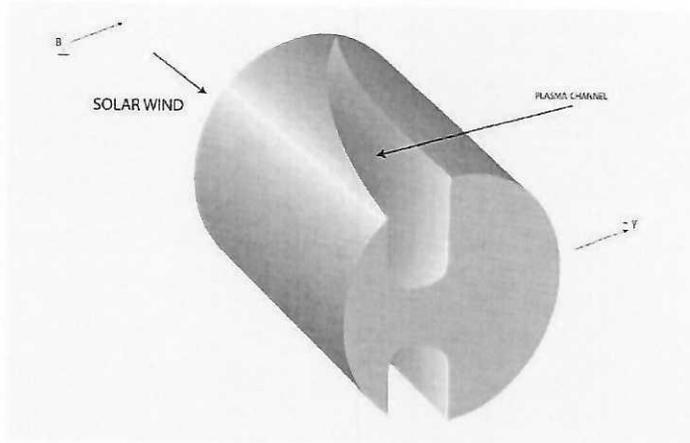
**Figura 1. Vectores de velocidad de iones planetarios O<sup>+</sup> (panel Izquierdo), y de iones H<sup>+</sup> del viento solar (panel derecho) proyectados sobre el plano YZ (perpendicular a la dirección de movimiento del viento solar), y que son medidos en la estela del planeta Venus. Nótese la formación de un vórtice que se desplaza en esa dirección (Lundin et al., 2013).**



**Figura 2.** Perfiles de la temperatura y velocidad de los iones del viento solar medidos en la órbita del 19 de agosto de 1979 con el vehículo espacial Venera 10 y presentadas en coordenadas cilíndricas (descritas en la parte superior). La transición 1 corresponde al cruce del frente de choque (BS), y la capa límite (boundary layer) se refiere al inicio de un incremento en la temperatura y a un decrecimiento de la velocidad a través de la transición intermedia (IT) anotada con el número 2 (Romanov et al., 1979).



**Figura 3. Perfil de densidad de electrones medido con el vehículo Pionero Venus a través la ionosfera nocturna de Venus. Agujeros ionosféricos son detectados a 09:30 UT y a 09:40 UT (Brace et al. 1982).**



**Figura 4.** Esquema de los canales de plasma que se extienden desde las regiones polares de la ionosfera de Venus a lo largo de su estela, y que justifican la existencia de agujeros ionosféricos como los mostrados en la figura 3. Los canales están desviados hacia el hemisferio del amanecer (dirección Y) por la fuerza de Magnus (Pérez de Tejada et al., 2019).

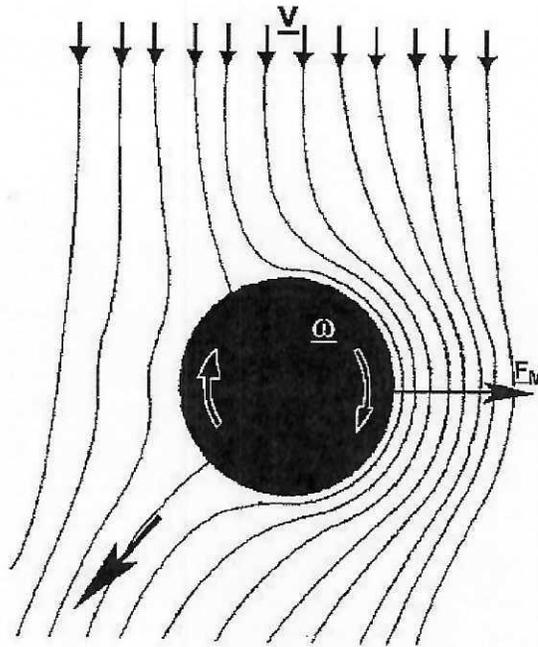
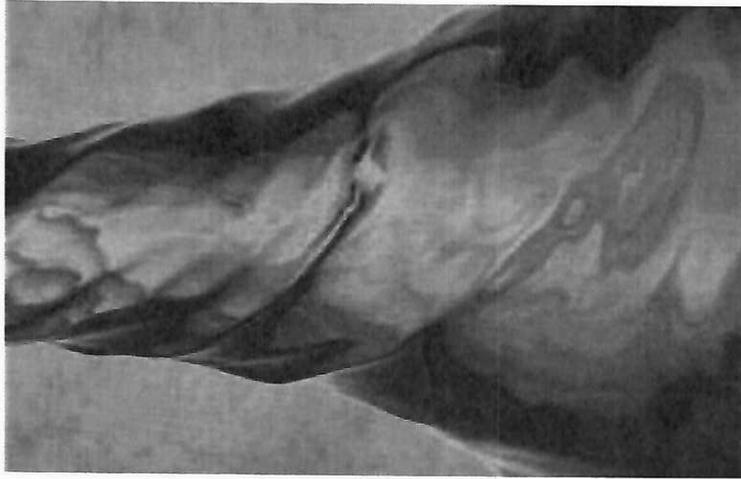


Figura 5. Representación de las líneas de flujo del viento solar que se mueve con velocidad  $V$  al incidir sobre Venus y el cual que gira con frecuencia  $\omega$ . El flujo es desviado por la fuerza de Magnus  $F_M$  transversal a la dirección incidente, y que se genera por la diferente presión dinámica entre ambos lados del planeta. El vector de rotación es perpendicular a la página y la flecha en la parte inferior indica la desviación de la estela de Venus (Rousse, 1978).



**Figura 6. Imagen de un sacacorchos en dinámica de fluidos. Su geometría es similar a la del flujo de vórtices en la estela de Venus en donde su grueso y posición varía durante el ciclo solar. En mínimo solar el vórtice está localizado cerca de Venus (al lado derecho de la figura) y con evidencia de que su grueso disminuye gradualmente con la distancia a lo largo de su estela dirigida hacia el lado izquierdo (Pérez de Tejada et al., 2023).**

## EL COMPORTAMIENTO FLUIDO DEL VIENTO SOLAR

### I

EL PROPÓSITO DE ESTA REUNIÓN ES EL DE DAR A CONOCER UN LIBRO QUE ACABO DE TERMINAR SOBRE MI TRABAJO ACADÉMICO Y QUE FUE PREPARADO POR LA CASA EDITORIAL **CAMBRIDGE SCOLARS** EN LONDRES INGLATERRA.

EL TEMA DEL LIBRO SE REFIERE A ESTRUCTURAS TIPO VÓRTICE. MEDIDAS EN LA ESTELA DE LOS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR Y QUE SE PRODUCEN POR EFECTOS GENERADOS POR EL VIENTO SOLAR. **EL VIENTO SOLAR** ES UN GAS EMITIDO CONTINUAMENTE POR EL SOL Y QUE DA LUGAR A FENÓMENOS DE TIPO FLUIDO DINÁMICO COMO EL QUE SE OBSERVA EN LA ESTELA DEL PLANETA VENUS (**FIGURA 1**).

LAS ESTRUCTURAS TIPO VÓRTICE SON MUY PARECIDAS A LAS QUE OCURREN EN **FLUJOS** DE AIRE O DE AGUA EN DONDE EL FLUIDO ES FORZADO A MODIFICAR SU TRAYECTORIA REGRESANDO, INCLUSIVE, A SU DIRECCIÓN DE MOVIMIENTO.

LO NOTABLE DE ESAS OBSERVACIONES ES QUE EN EL AIRE Ó EN EL AGUA, INCLUYENDO CUALQUIER FLUIDO CONVENCIONAL LAS PARTÍCULAS (O MOLÉCULAS) QUE LOS FORMAN TINEN COLISIONES MUY FRECUENTES ENTRE ELLAS. SIN EMBARGO, **ESTO NO ES EL CASO EN EL VIENTO SOLAR EN DONDE SUS PARTÍCULAS PRACTICAMENTE JAMÁS COLISIONAN ENTRE ELLAS, Y A PESAR DE ESO, EL VIENTO SOLAR SE COMPORTA COMO UN FLUIDO.**

ESTE PROBLEMA FUE IDENTIFICADO HACE MUCHO TIEMPO PUES OBSERVACIONES REALIZADAS EN EL MEDIO INTERPLANETARIO DIERON LUGAR A SUGERIR UN COMPORTAMIENTO TIPO FLUIDO EN EL MOVIMIENTO DEL VIENTO SOLAR.

## II

LO QUE CARACTERIZA A UN **FLUJO** DE AIRE Ó DE AGUA COMO FLUIDO ES UN PARÁMETRO LLAMADO CAMINO LIBRE MEDIO EL CUAL IDENTIFICA LA DISTANCIA EN LA QUE SUS MOLÉCULAS VIAJAN ENTRE SUS COLISIONES, Y QUE ES SOLO DE UNOS POCOS MICRONES EN SUS TRAYECTORIAS.

A DIFERENCIA DE ESTA PECULIARIDAD EL CAMINO LIBRE MEDIO QUE SE IMPLICA POR EL MOVIMIENTO DEL VIENTO SOLAR ES APROXIMADAMENTE LA DISTANCIA QUE EXISTE ENTRE EL SOL Y LA TIERRA (UNA UNIDAD ASTRONÓMICA) Y POR TANTO LA PROBABILIDAD DE UNA COLISIÓN ENTRE ELLAS, O CON UNA PARTÍCULA ATMOSFERICA, ES EXTREMEAMENTE BAJA.

BAJO TALES CONDICIONES HA SIDO NECESARIO SUPONER OTRO TIPO DE INTERACCIONES ENTRE SUS PARTÍCULAS LO QUE CARACTERIZA EL MOVIMIENTO FLUIDO DEL VIENTO SOLAR AL INCIDIR SOBRE UNA ATMÓSFERA PLANETARIA.

PARA ESTO HAY QUE INDICAR EL DIFERENTE TIPO DE MOVIMIENTO QUE TIENEN LAS PARTICULAS DEL VIENTO SOLAR EL CUAL ES UN GAS IONIZADO A ALTAS TEMPERATURAS Y POR TANTO ESTÁ DOMINADO POR PROTONES Y ELECTRONES.

AT TRANSITAR POR UN CAMPO MAGNÉTICO COMO ES DE LA TIERRA SUS PARTÍCULAS EJECUTAN MOVIMIENTOS DOMINADOS POR FUERZAS MAGNÉTICAS QUE LAS INDUCEN A REALIZAR MOVIMIENTOS CIRCULARES ENTRE LAS LÍNEAS DEL CAMPO MAGNÉTICO (GIRO DE LARMOR).

TALES CONDICIONES OCURREN EN LA VECINDAD DE VARIOS PLANETAS EN LOS QUE EXISTE UN CAMPO MAGNÉTICO LOCAL (LA TIERRA, JUPITER, SATURNO, URANO Y NEPTUNO) PERO NO CUANDO **NO** HAY UN CAMPO MAGNÉTICO INTERIOR (VENUS, MARTE).

EL COMPORTAMIENTO FLUIDO DEL VIENTO SOLAR EN VENUS Y MARTE SUGIERE OTRAS CONDICIONES QUE ESTAN CARACTERIZADAS POR PERTURBACIONES TURBULENTAS LOCALES.

EN MEDICIONES REALIZADAS EN LA VECINDAD DE VENUS Y MARTE SE HA OBSERVADO QUE EL CAMPO MAGNÉTICO SOLAR QUE SE DESPLAZA CON EL VIENTO SOLAR ADQUIERE CARACTERÍSTICAS TURBULENTAS EN LA VECINDAD DE ESOS PLANETAS Y QUE SU MAGNITUD Y DIRECCIÓN OSCILAN FRECUENTEMENTE (**FIGURA 2**).

EN TALES CONDICIONES EL MOVIMIENTO LAMINAR DE LAS PARTÍCULAS DEL VIENTO SOLAR ENTRE LAS LINEAS DE CAMPO MAGNETICO NO ES OPERANTE Y, POR TANTO, DEBE HABER OTRO TIPO DE COMPORTAMIENTO.

### III

EVIDENCIA DE OTROS PROCESOS SURTIÓ NO SOLAMENTE POR LA PRESENCIA DE VÓRTICES SINO TAMBIÉN PORQUE LA ATMÓSFERA DE VENUS TIENE UNA FUERTE ROTACIÓN Y EL VIENTO SOLAR ES DESVIADO LATERALMENTE AL DESPLAZARSE ALREDEDOR DE ESE PLANETA. EN ESTE CASO SE OBSERVA QUE LOS VECTORES DE VELOCIDAD DEL VIENTO SOLAR SON DESVIADOS LATERALMENTE AL SER EXAMINADOS POR ATRAS DEL PLANETA (**FIGURA 3**).

ESTE EFECTO ES MUY COMÚN EN FLUIDOS CONVENCIONALES Y ES PRODUCIDO POR LA ROTACIÓN DE UN OBJETO QUE SE MUEVE EN CONTRA DE UN FLUIDO EN MOVIMIENTO.

POR EJEMPLO, CUANDO UNA PELOTA DE BASE-BALL ES ENVIADA CON UNA CIERTA ROTACIÓN EXPERIMENTA UNA DEFLECCIÓN. QUE HACE QUE SE DIRIJA HACIA UN LADO (**FIGURA 4**). ESTO SE DEBE A QUE POR UN LADO DEL OBJETO EL VECTOR VELOCIDAD DEL FLUIDO ESTA DIRIGIDO EN LA MISMA DIRECCIÓN AL VECTOR VELOCIDAD DEL MOVIMIENTO DE ROTACIÓN Y POR TANTO LA SUMA DE LOS DOS VECTORES DA LUGAR A UNA MAYOR VELOCIDAD.

LO CONTRARIO OCURRE AL OTRO LADO DEL OBJETO EN DONDE LOS DOS VECTORES DE VELOCIDAD ESTAN DIRIGIDOS EN DIRECCIÓN CONTRARIA Y, POR TANTO, LA SUMA DE LOS DOS VECTORES DA UNA VELOCIDAD MENOR.

EL EFECTO DE ESTA DIFERENCIA ES QUE SE GENERA UNA PRESIÓN EN EL FLUIDO PUES EN UN LADO LA VELOCIDAD ES MAYOR QUE EN EL OTRO LADO. ESTE COMPORTAMIENTO FLUIDO EXPLICA EL QUE HAYA UNA FUERZA LATERAL EN LA ESTELA DE VENUS Y POR TANTO SU DESPLAZAMIENTO EN UNA DIRECCIÓN.

### IV

UNA RAZÓN MAS QUE APOYA LA INTERPRETACIÓN DEL VIENTO SOLAR COMO UN FLUIDO SE OBTUVO AL OBSERVAR SU INTERACCIÓN CON EL PLANETA MARTE

MEDICIONES REALIZADAS CON VEHÍCULOS ESPACIALES. EN LA VECINDAD DE ESE PLANETA MUESTRAN LA ACUMULACIÓN DEL VIENTO SOLAR ALREDEDOR DE SU IONOSFERA DANDO LUGAR A UN HALO CONTÍNUO QUE SE EXTIENDE POR DETRÁS DE MARTE (**FIGURA 5**).

ADEMÁS DE ESA CONFIGURACIÓN SE HA INFERIDO TAMBIÉN LA EXISTENCIA DE UNA ESTRUCTURA IONOSFÉRICA QUE TIENE LA FORMA DE UN SACACORCHO CON UNA ESTELA QUE SE VA ADELGAZANDO CON LA DISTANCIA DEL PLANETA (**FIGURA 6**).

DE CÁLCULOS REALIZADOS UTILIZANDO SUS PROPIEDADES TERMODINÁMICAS SE HA ESTIMADO QUE EL CAMINO LIBRE MEDIO EFECTIVO DEL VIENTO SOLAR NO SE DERIVA DE COLISIONES ENTRE SUS PARTÍCULAS SINO DE INTERACCIONES QUE OCURREN CON LAS FLUCTUACIONES DE SU CAMPO MAGNÉTICO (**INTERACCIONES ONDA-PARTÍCULA**) Y QUE DAN LUGAR A UN CAMINO LIBRE MEDIO MUCHO MENOR QUE UNA UNIDAD ASTRONÓMICA PUES ES DEL ORDEN DE POCOS MILES DE KILÓMETROS.

ESTA DESCRIPCIÓN PROPORCIONA UN NUEVO DISPOSITIVO PARA ESTUDIAR FENÓMENOS ASTROFÍSICOS A TRAVÉS DE MEDICIONES CON VEHÍCULOS ESPACIALES. EN SITUACIONES SIMILARES. EN PARTICULAR DEBEN TAMBIEN OCURRIR EN LA INTERACCIÓN DE VIENTOS ESTELARES CON EXOPLANETAS, Y CUANDO CHORROS DE PLASMAS DE GRANDES DIMENSIONES INCIDEN SOBRE ESTRUCTURAS GALÁCTICAS EN ROTACIÓN.

H. Pérez de Tejada  
Intituto de Geofísica, UNAM