



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Fronteras compresivas en el antechoque terrestre observadas por Cluster

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

P R E S E N T A

DIANA IVETT ROJAS CASTILLO

JURADO EXAMINADOR

Dra. XÓCHITL G. BLANCO CANO (DIRECTORA DE TESIS)

Dr. JULIO J. MARTINELL BENITO (PRESIDENTE)

Dr. ALEJANDRO LARA SÁNCHEZ (VOCAL)

Dr. PABLO F. VELÁZQUEZ BRITO (SUPLENTE)

Dr. ERNESTO AGUILAR RODRÍGUEZ (SUPLENTE)



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

La realización de esta investigación no hubiera sido posible sin la Dra. Xóchitl Blanco quien con un gran apoyo, tanto en el plano académico como en el personal, me condujo a la culminación de ésta tesis. Un agradecimiento a mi comité tutorial formado por Dr. Ernesto Aguilar, Dr. Alejandro Lara, Dr. Julio Martinell y Dr. Pablo Velázquez por la revisión que hicieron a este trabajo, sus valiosos comentarios y observaciones.

Agradezco el apoyo económico otorgado por el CONACYT para la realización de mis estudios de maestría a través de la beca 232279 y a la Coordinación de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México por la beca otorgada para la culminación de la misma a través del Programa de Fomento a la Graduación de los alumnos de Posgrado.

A los compañeros del Departamento de Ciencias Espaciales del Instituto de Geofísica gracias por la ayuda y amistad que me brindaron. A Mario va un agradecimiento especial por siempre tener un tiempo para mis innumerables dudas y por su enorme ayuda técnica. Gracias a Dení, Oscar, Olivia, Tere, Andrea, Gil y Adriana por hacer siempre la estancia en el Igeof algo placentero.

Finalmente gracias a mi familia por todo el apoyo. En primer lugar gracias a Libertad y Luis; mil gracias por su paciencia y amor, por regalarme muchas de sus tardes y fines de semana para mi trabajo. Gracias a Luis.... por todo. Gracias a Sara, Manuel y Claudia por todo su cariño y apoyo. Gracias a todos ustedes.

Índice general

Índice general	III
Índice de figuras	VII
Índice de cuadros	XI
1. Choque de proa y antechoque terrestres.	5
1.1. El viento solar	5
1.2. Interacción entre el viento solar y el campo geomagnético: magnetósfera terrestre	7
1.3. El choque de proa terrestre	9
1.4. El antechoque	13
1.4.1. Fronteras dentro del Antechoque	19
1.5. Estructuras en el antechoque	22
1.5.1. Anomalías de flujo caliente	22
1.5.2. Cavidades del Antechoque	28
1.5.3. Cavitones	34
1.5.4. Hoyos de Densidad	40
1.5.5. Frontera entre iones intermedios/giratorios e iones alineados al campo	45
1.5.6. Resumen de estructuras en el antechoque	49
1.6. Fronteras compresivas del antechoque	52
1.6.1. Modelo de simulación híbrido	54
1.6.2. Resultados	56
1.6.3. Principales resultados de las FCA	64
1.7. Resumen	66

2. Datos de la misión Cluster y método de análisis	67
2.1. Breve panorama de la misión Cluster	67
2.2. Instrumentos de Cluster	71
2.2.1. Magnetómetro: FGM	72
2.2.2. Analizador electrostático: CIS	73
2.2.3. Detector de partículas: RAPID	77
2.3. Tipo de datos generados por CLUSTER	78
2.3.1. Herramientas de cómputo	79
2.4. Resumen	80
3. Análisis de datos y Resultados	81
3.1. Criterio de selección de los eventos	81
3.1.1. Cálculo de amplitudes de campo magnético y parámetros del plasma	88
3.2. Ejemplo de una FCA	89
3.3. Casos de estudio	94
3.3.1. Casos de estudio según la velocidad del viento solar	94
3.3.2. Casos de estudio según el ángulo θ_{BV}	103
3.4. Características de las FCBs observadas.	114
3.4.1. Condiciones del viento solar.	114
3.4.2. Duración y tamaño.	114
3.4.3. Amplitudes en campo magnético y densidad.	118
3.4.4. Amplitudes de la velocidad.	122
3.4.5. Ángulo θ_{BV} y configuración preferencial para la formación de las FCBs.	126
3.4.6. Número de Mach Alfvénico para cada evento.	128
3.4.7. Orientación de las FCA respecto al choque de proa.	130
3.5. Correlaciones entre las amplitudes de las FCA.	133
3.6. Resumen	136
4. Conclusiones	139
4.1. Discusión	139
4.2. Trabajo a futuro.	148
A. Parámetros del plasma	151
A.1. Propiedades del viento solar	151

A.2. Algunos parámetros importantes del plasma	152
A.3. Longitud inercial de los iones	155
B. Sistema de referencia Hoffman-Teller	159
Bibliografía	163

Resumen

La Tierra posee un intenso campo magnético que origina una coraza magnética alrededor del planeta conocida como *magnetósfera*. En la magnetósfera terrestre ocurren un gran número de eventos físicos, algunos de los cuales son resultado de la interacción del plasma perteneciente al viento solar y el campo magnético terrestre; tales eventos han sido estudiados mediante simulaciones numéricas y datos *in situ* obtenidos de las distintas misiones espaciales. Uno de los modelos usados por estas simulaciones para estudiar el plasma es el Modelo Híbrido en el que se da un tratamiento cinético a los iones mientras que los electrones son considerados como un fluido, Winske y Omidi (1993).

Recientemente, Omidi et al. (2009) mostraron resultados de simulaciones globales híbridas de la interacción del viento solar con la magnetosfera terrestre, revelando la existencia de una nueva estructura a las orillas del antechoque conocida como *Frontera Compresiva del Antechoque*. Esta estructura está asociada con la compresión de la magnitud del campo magnético y la densidad. Rodeando las regiones de compresión del campo magnético y densidad de la frontera compresiva también se encuentra una región donde las intensidades de estos dos parámetros disminuyen por debajo de los valores del viento solar ambiente. La frontera compresiva representa una región de transición que separa el plasma del viento solar prístino o "puro" del plasma del antechoque y en este sentido aún se desconoce si esta frontera coincide o no con la frontera de iones y/o con la frontera de ondas del antechoque. Las simulaciones han mostrado que la formación e intensidad de la frontera compresiva depende de la generación y evolución no-lineal de ondas de Frecuencia Ultra Baja, las cuales a su vez han sido producidas por la interacción de iones reflejados con el viento solar.

El objetivo de esta tesis es determinar si las fronteras compresivas que se predicen en las simulaciones de Omidi et al. (2009) existen o no en el antechoque terres-

tre. De ocurrir estas fronteras compresivas entonces determinaremos cuáles son las condiciones del viento solar y del Campo Magnético Interplanetario para las cuales ocurren y algunas de sus características principales.

En este trabajo usamos datos de campo magnético y plasma de la misión espacial Cluster para mostrar que la frontera compresiva existe y es una estructura frecuente en el antechoque terrestre. Estudiamos ciertas características de las fronteras compresivas como son tamaño, duración, amplitud y orientación; todo esto para ciertas geometrías del Campo Magnético Interplanetario y distintas velocidades del viento solar. También se analizó su localización respecto al choque de proa.

Esta investigación presenta la primera evidencia observacional de la existencia de las fronteras compresivas y compara las características observadas para ellas con lo reportado por las simulaciones numéricas, pues solo se tiene esa información de estas nuevas estructuras.

A continuación describimos brevemente el contenido de esta tesis. En el Capítulo 1 presentamos un panorama general de la región que estamos analizando, se describe la formación de la magnetosfera terrestre como resultado de la interacción del viento solar con el campo magnético terrestre, así como las regiones formadas delante de esta magnetosfera como son el choque de proa y el antechoque. Se describen las dos fronteras que existen al interior del antechoque y que son de particular interés para nuestro trabajo: la frontera de iones y la frontera de ondas de Frecuencia Ultra Baja. Continuamos con una revisión general de los fenómenos presentes en el antechoque que presentan un perfil similar al de las fronteras compresivas y que son clave en el entendimiento de estos nuevos fenómenos, como son las anomalías de flujo caliente, cavidades, cavitones y hoyos de densidad. Para finalizar el capítulo se introduce el concepto de fronteras compresivas en el cual se basa el análisis hecho en los capítulos siguientes.

En el Capítulo 2 se describe brevemente la misión espacial Cluster, los instrumentos a bordo y el tipo de datos generados. Se menciona también la forma de lectura y análisis de los datos así como el código utilizado.

El Capítulo 3 presenta los resultados que obtuvimos y que muestran que las fronteras compresivas son estructuras altamente no-lineales con grandes variaciones en las amplitudes de campo magnético y plasma. Respecto a su tamaño encontramos que alcanzan algunos cientos de longitudes inerciales y puede formarse para diferentes geometrías del campo magnético interplanetario. Los datos analizados

muestran también que el flujo de viento solar puede ser desacelerado y fuertemente desviado cuando cruza la frontera compresiva. También se presentan los resultados del análisis de ondas y de orientación respecto al choque de proa y a los antechoques de iones y de ondas de Frecuencia Ultra Baja.

Finalmente en las Conclusiones se discuten los resultados obtenidos y se comparan con resultados de simulación a fin de corroborar la existencia de las fronteras compresivas. En la sección final se presentan las conclusiones obtenidas de la investigación y el trabajo a futuro que ha originado esta tesis.

Capítulo 1

Choque de proa y antechoque terrestres.

1.1. El viento solar

La evidencia observacional de la existencia de un flujo continuo de plasma proveniente de la corona solar, que llenaba el espacio interplanetario, fue sugerida al analizar las propiedades de las colas cometarias por Biermann a principios de la década de los cincuentas. Años más tarde Parker (1958), demostró que las soluciones a ecuaciones de fluidos que describían la atmósfera solar necesitaban de la existencia de un flujo supersónico continuo al cual se le llamó *viento solar*. La demostración hecha por Parker consistió en mostrar que una corona solar estática y extendida como se suponía era el caso, no podía existir sin una presión externa que la estuviera confinando. Dada la elevada temperatura a la que se encuentra la corona solar existe un considerable gradiente en la presión térmica y dado que la presión interestelar es muy pequeña la corona solar debía expandirse continuamente a muy alta velocidad pues la fuerza de gravedad es superada por la presión térmica, constituyendo lo que Parker llamó el viento solar. Hacia la mitad de los años sesentas fueron hechas las primeras mediciones *in situ* de este viento.

El viento solar se origina en la atmósfera solar con muy bajas velocidades y es acelerado a partir de esa región hasta alcanzar velocidades que van desde 400 km/s hasta los 1200 km/s, (Kivelson y Russell, 1995). La corona solar es una región caliente y de alta densidad con una temperatura de $1.6 \times 10^6 \text{K}$ y densidad de 5×10^7 partículas por cm^3 , donde el campo magnético coronal es del orden de 10^{-2}T y decrece con la distancia. Es justamente este campo magnético el que determina gran parte de la dinámica del viento solar. Cuando este campo es cerrado con ambos pies de las líneas de campo ancladas al Sol, la atmósfera solar se encuentra

1.1. El viento solar

atrapada. Aunque ninguna línea de campo magnético es abierta, pues los pies de las líneas se encuentran siempre ancladas en algún punto, es posible considerar regiones donde localmente las líneas de campo no se encuentran ancladas sino que más bien se hallan abiertas hacia el medio interplanetario (como en los hoyos coronales). En regiones con líneas de campo "abiertas" el plasma solar atmosférico puede fluir hacia el espacio interplanetario convirtiéndose en el viento solar; esto sucede debido principalmente a que la alta temperatura de la corona resulta en un aumento de la presión térmica originando un gradiente en la presión térmica del plasma mayor que la fuerza de gravedad. Los hoyos coronales son estas regiones de campo magnético abierto que resultan ser las fuentes donde se origina el viento solar rápido mientras que las regiones con campo magnético cerrado como los cascos coronales son las fuentes del viento solar lento, (Baumjohann y Treumann, 1997).

A la altura de la órbita de la Tierra, que corresponde a 1 Unidad Astronómica (AU), el viento solar es un tenue gas plasma magnetizado, pues debido a su alta conductividad eléctrica puede llevar consigo el campo magnético solar permeando el espacio interplanetario con el llamado *campo magnético interplanetario*. La densidad de éste gas ionizado a 1UA es típicamente de 5 partículas por cm^3 y la intensidad del campo magnético asociado es de 5nT. En cuanto a su composición se sabe que el 95% corresponde a protones y el 5% a Helio con una pequeña fracción de iones pesados. La velocidad a la que fluye el viento solar va desde un par de cientos de km/s hasta unos 1000 km/s o más, siendo una velocidad típica 500 km/s. A las corrientes de viento solar con velocidades inferiores a 400 km/s se les conocen como *corrientes lentas* y las que exceden los 600 km/s se les conoce como *corrientes rápidas*, (Paschman et al. , 2005).

Algunas propiedades del viento solar se describen en función de parámetros como son la velocidad del sonido, la velocidad de Alfvén, la β del plasma y otras que se describen en detalle en el Apéndice A . La velocidad del sonido en el viento solar a 1UA tiene un valor de unos 40 km/s y la velocidad de ciertas ondas de plasma que son representativas, como lo son las *ondas de Alfvén* es también de unos 40 km/s a esa misma distancia; lo cual implica que el viento solar es un flujo supersónico y supermagnetosónico. La temperatura de los protones a 1UA es del orden de 1.2×10^5 K mientras que los electrones tienden a ser más calientes ($\sim 1.4 \times 10^5$ K), (Paschman et al. , 2005).

Como ya mencionamos uno de los parámetros del viento solar es la β del plasma

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

el cual indica la razón entre las presiones térmica y magnética del plasma; cerca de la órbita de la Tierra la β puede alcanzar valores entre 1-30, de manera que el flujo del viento solar es el que determina en mayor medida el comportamiento del campo lo que tendrá un efecto importante sobre la estructura magnética. Aunque el viento solar fluye radialmente desde el Sol, la rotación de éste último provoca que las líneas del campo magnético formen una espiral de Arquímedes (o *espiral de Parker*) en el espacio. Dada la tasa de rotación ecuatorial del Sol que es de 25.4 días, el vector de campo magnético calculado según el modelo de Parker hace un ángulo promedio de $\sim 45^\circ$ con el vector velocidad del flujo a 1UA.

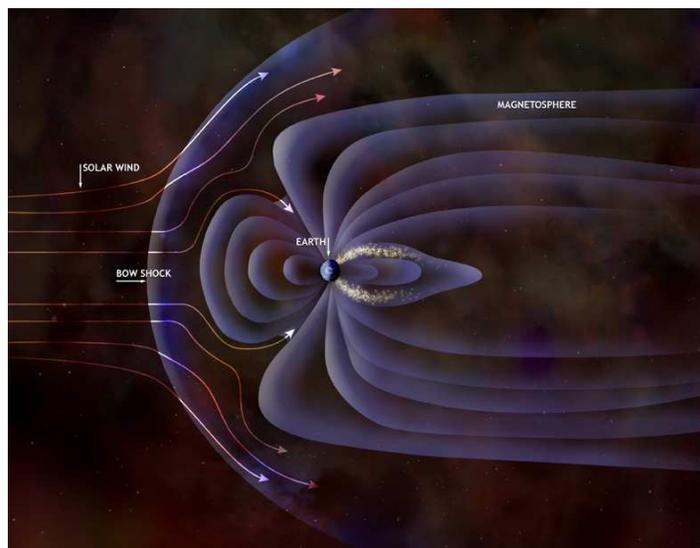


Figura 1.1: En esta representación artística del Sol y la Tierra se observa el viaje del viento solar desde el Sol y cómo envuelve este flujo de plasma a el campo magnético terrestre formando la cavidad que conocemos como *magnetósfera*. También como resultado de la interacción del flujo supersónico del viento solar con el campo geomagnético se forma un choque de proa delante de la magnetósfera.

1.2. Interacción entre el viento solar y el campo geomagnético: magnetósfera terrestre

En su viaje a través del medio interplanetario el viento solar se encuentra con distintos cuerpos celestes como asteroides, cometas o planetas. Dichos obstáculos pueden o no poseer un campo magnético intrínseco, siendo éste último el caso de mayor interés. En el caso donde los obstáculos poseen un campo magnético intrínseco, se tienen regiones de plasmas con distintas características (en principio con diferente campo magnético) los cuales no pueden simplemente mezclarse para

1.2. Interacción entre el viento solar y el campo geomagnético: magnetósfera terrestre

crear un “medio continuo” sino que al tratar de alcanzar un estado de equilibrio suelen generarse fronteras que separan las regiones adyacentes de plasma. En general estas fronteras no son determinadas solamente por las condiciones a uno y otro lado de los plasmas que separan sino que evolucionan al interior del plasma a partir de la interacción entre un plasma y otro formándose entonces delgadas capas de transición entre los plasmas llamadas *discontinuidades*. Aunque los plasmas tienen la característica de que puede analizarse la evolución de las discontinuidades bajo un punto de vista hidrodinámico, resulta mucho más productivo analizar los procesos físicos que tienen lugar en estas fronteras usando teoría magnetohidrodinámica, y entonces desde este punto de vista establecer cuáles son las condiciones que prevalecen a uno y otro lado de la discontinuidad. Dado que las propiedades para un plasma ideal magnetohidrodinámico, es decir, un plasma ideal estudiado bajo un punto de vista magnetohidrodinámico, deben mantenerse a ambos lados de la discontinuidad no cualquier tipo de discontinuidad puede sostenerse para un estado dado del plasma. Esto último implica que las discontinuidades estén agrupadas en diferentes clases. Una clase de discontinuidades son los *choques*; los cuales se forman cuando la velocidad del fluido supera a la velocidad magnetosónica del fluido c_{ms} dada por $c_{ms}^2 = c_s^2 + v_A^2$, la cual es análoga a la velocidad del sonido en un fluido ordinario. El flujo del plasma es ahora llamado supermagnetosónico, y análogamente a lo que sucede con fluidos ordinarios, al encontrarse con un obstáculo que no se mueve se originará un frente de choque. De acuerdo a la Ecuación A.10 del Apéndice A se define el Número de Mach magnetosónico como la relación entre la velocidad del fluido y la velocidad del sonido (o velocidad magnetosónica) lo que nos lleva a que exista una condición para que una onda de choque evolucione en un plasma, dicha condición requiere que $M > 1$. Donde quiera que se cumpla esta condición y el flujo de plasma sea modificado debido a la presencia de un obstáculo, se desarrollará un frente de choque a través del cual los parámetros del fluido cambiarán de manera irreversible y el flujo supermagnetosónico será desacelerado hasta convertirse en un flujo submagnetosónico. El ejemplo más estudiado de un choque lo representa el choque de proa terrestre.

Cuando el viento solar emitido desde la corona se encuentra con la Tierra se tiene un escenario como el descrito previamente en el que interaccionan dos plasmas magnetizados: el viento solar que trae consigo el campo magnético interplanetario (CMI) se encuentra con la Tierra que tiene un campo magnético intrínseco. El intenso campo magnético terrestre funciona como una coraza magnética que

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

desvía al CMI alrededor de la Tierra creando una especie de cavidad alrededor del planeta conocida como *magnetósfera*. El tamaño de la magnetósfera es determinado por el balance de presión entre el campo magnético terrestre y el viento solar. Debido al dipolo del campo magnético terrestre la forma de la cavidad magnetosférica resulta ser asimétrica siendo achatada del lado día mientras que del lado noche se encuentra elongada formando así una cola magnética. El resultado final es una magnetósfera que adquiere la forma de un paraboloides de revolución. La *magnetopausa* es la interfaz que separa el plasma proveniente del viento solar del campo geomagnético. Como ya se había mencionado el viento solar se mueve a velocidades supersónicas por lo que al encontrarse con la magnetósfera se forma una discontinuidad tipo choque delante de la magnetopausa, a lo largo de la cual el viento solar se desacelera y pasa de ser un flujo supersónico a ser subsónico. Este choque es conocido como el *Choque de Proa* terrestre y divide el flujo del viento solar en dos regiones: la región río arriba del choque contiene al viento solar sin perturbar mientras que la región río abajo contiene el plasma perturbado o "chocado" en lo que se conoce como *magnetofunda*. El choque de proa de la Tierra es el ejemplo más conocido y mejor estudiado de un choque en plasmas sin colisiones. En este sentido los choques sin colisiones son importantes de estudiar pues nos proveen de un laboratorio natural donde es posible analizar distintos procesos físicos como la transferencia de energía entre partículas donde no existen colisiones, la disipación de calor o la aceleración de partículas; además de que los choques sin colisiones constituyen una fracción importante del ambiente astrofísico. Análogamente el interés en las fronteras que se forman delante y al interior de la magnetósfera proviene del hecho de que son un sitio donde pueden estudiarse diversos fenómenos y procesos en el plasma como aceleración de partículas, reconexión magnética y turbulencia que se piensa existen en todo el universo y en este sentido el viento solar resulta ser un laboratorio natural en el que estos y muchos otros procesos pueden ser analizados. Sin embargo, este laboratorio natural y sus fronteras deben ser estudiadas *in situ* por que no son accesibles mediante técnicas de percepción remota.

1.3. El choque de proa terrestre

La función del choque de proa es desviar el plasma alrededor del obstáculo magnetosférico que toma la forma de un paraboloides. En la Figura 1.2(a) el área

1.3. El choque de proa terrestre

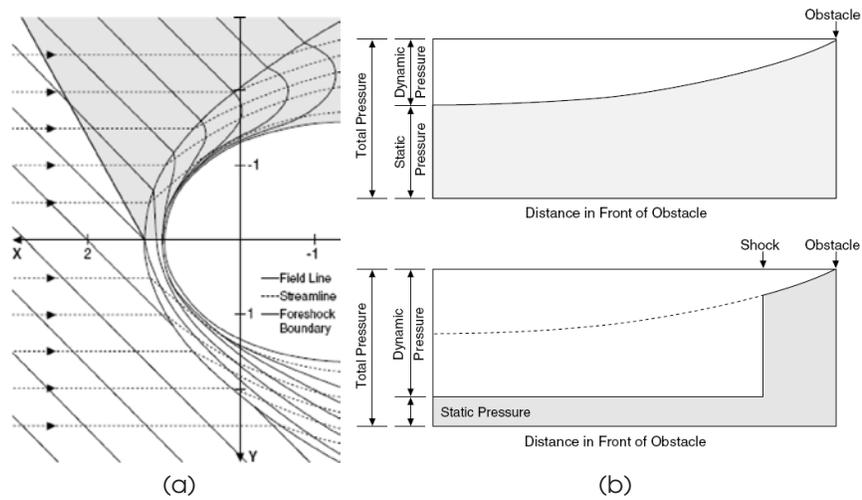


Figura 1.2: En (a) se observa el campo magnético y el flujo de viento solar que se acerca al choque de proa terrestre así como la magnetósfera tal y como lo predicen los modelos de gas dinámico. El plano de la figura contiene las líneas de campo magnético y las líneas de flujo que son llevadas hasta el punto subsolar. En la región sombreada se encuentran los iones energéticos que han sido acelerados y que pueden moverse río arriba del choque. La figura (b) muestra un esquema cualitativo del gradiente de presión que causa que el plasma se desvíe alrededor del obstáculo magnetosférico. En el panel superior la velocidad de la onda compresiva es suficientemente rápida como para crear el perfil de presión necesario para hacer la desviación. En el panel inferior la onda de presión no se puede mover río arriba y como consecuencia se tiene que formar un choque para poder hacer la desviación del flujo. Russell et al. (2004).

en blanco del lado derecho es la magnetósfera que puede ser considerada como un cuerpo impenetrable para esta descripción. Del lado izquierdo se observa que el flujo del viento solar viaja siguiendo una trayectoria recta la cual cambia repentinamente al encontrarse con el choque de proa adquiriendo entonces una trayectoria curva justo delante de este. La Figura 1.2(b) resulta muy ilustrativa para entender cómo se forma el choque delante de la Tierra (lado día). El panel superior muestra los cambios en presión en un flujo subsónico conforme se acerca al obstáculo. La presión total está conformada por la presión dinámica y la presión estática (o térmica); la primera es proporcional al flujo de momento o la densidad de masa por la velocidad al cuadrado mientras que la segunda es proporcional al producto de la densidad y la temperatura, y en un plasma magnetizado se considera una componente adicional que es proporcional al cuadrado del campo magnético. La presión total permanece constante pero la presión estática crece conforme la presión dinámica disminuye. El gradiente formado por el aumento de la presión estática detiene y desvía el flujo de manera que rodee el obstáculo. Cuando el flujo

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

es supersónico la presión dinámica excede la presión estática la cual es incapaz de formar un gradiente suficientemente fuerte para desviar el flujo. La formación del choque calienta y comprime el flujo al convertir la presión dinámica en presión térmica. El flujo subsónico resultante puede establecer el gradiente requerido por la presión estática para detener y desviar aún más el flujo. El lugar donde se forme el choque depende de qué tan comprimido está el flujo en la región río abajo del choque, también llamado el lado de alta entropía. Todo el material que pasa a través del frente del choque debe pasar entre el choque y el obstáculo de manera que si sólo existe una débil compresión del plasma la región después del choque tendrá que ser gruesa.

Como el viento solar es una corriente de plasma con un alto Número de Mach, $M \sim 8$, el choque de proa es un choque magnetosónico rápido. La densidad y el campo magnético aumentan al cruzar el choque desde el viento solar hacia la magnetofunda; observacionalmente se encontró que estos incrementos corresponden a un factor de 4, es decir, los valores de densidad y campo magnético en la magnetofunda son aproximadamente 4 veces los valores medidos en el viento solar ambiente para dichos parámetros. Los choques con un M_{ms} grande y que cumplen $M_{ms} > M_c$ son llamados *supercríticos* y se comportan de distinta manera que los choques con M_{ms} pequeño para los que $M_{ms} < M_c$ y que se conocen como *subcríticos*. El *Número de Mach crítico*, M_c , se define por convención como el Número de Mach para el cual la velocidad del flujo río abajo del choque es igual a la velocidad del sonido río abajo de manera que el M_{ms} río abajo del choque es igual a 1. En el caso del choque de proa se ha encontrado que el M_c oscila entre 1 y 2, de manera que la mayoría de las transiciones del choque de proa son supercríticas.

Los factores que controlan la compresión en un fluido ideal para choque supercríticos son el índice politrópico de la ecuación de estado que gobierna la relación entre densidad y temperatura, y el Número de Mach que es la razón entre la velocidad del fluido y la velocidad de las ondas compresivas que desvían el flujo. Si el índice politrópico para un choque supercrítico es, por ejemplo 5/3 que corresponde a un proceso adiabático en un gas colisional monoatómico, entonces el plasma del viento solar será comprimido por un factor de 4. Si el índice politrópico es 2, el cual indica un proceso adiabático para partículas colisionales confinadas a un plano, entonces el viento solar puede ser comprimido por un factor solo de 3 y el choque se encuentra más lejos del obstáculo. La física del choque de proa es rica en procesos que calientan el plasma, dispersan y reflejan las partículas.

1.3. El choque de proa terrestre

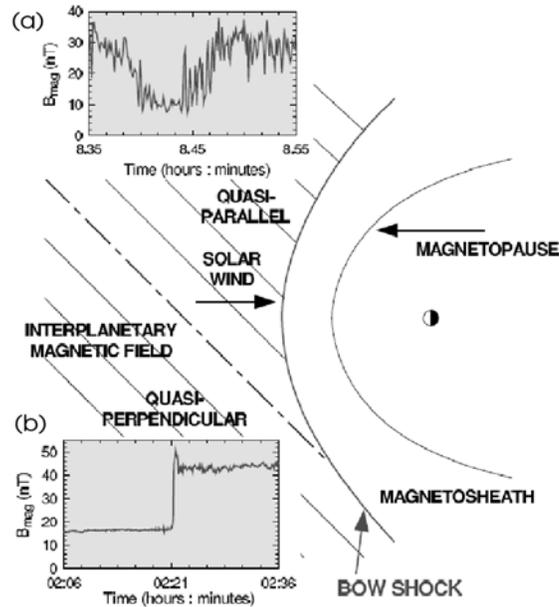


Figura 1.3: Esbozo del choque de proa de la Tierra formado delante de la magnetofunda y la magnetósfera. El ángulo entre la dirección de las líneas del CMI y la normal a la superficie del choque puede ser cuasi-paralelo en el lado amanecer y llegar a ser cuasi-perpendicular en el lado anochecer del choque. Las escalas de la transición del choque y las regiones de disipación son significativamente diferentes para los casos cuasi-perpendicular y cuasi-paralelo como se muestran en los recuadros, en ellos se puede apreciar la evolución de la magnitud del campo magnético medida por Cluster a través de las transiciones de los choques cuasi-paralelo en (a) y cuasi-perpendicular en (b). Balogh et al. (2005).

La Figura 1.3 es un esbozo de la localización y forma aproximada del choque de proa. La distancia típica entre la Tierra y el punto subsolar en el choque (en el plano de la eclíptica) es de $14 R_E$, sin embargo la localización del choque de proa es variable dependiendo de la densidad y velocidad del viento solar. En términos generales la geometría de gran escala del choque de proa depende de la presión dinámica del viento solar. Para todas las ondas de choque en plasmas sin colisiones la naturaleza de la transición de un fluido de supersónico a subsónico depende principalmente de dos parámetros: el Número de Mach y el ángulo θ_{Bn} . Antes mencionamos que el M_{ms} de una onda de choque es la razón entre la velocidad del choque río arriba y la velocidad de las ondas características del plasma río arriba, en el caso de ondas magnetosónicas se tendrá un Número de Mach magnetosónico, M_{ms} y en el caso de ondas de Alfvén se tendrá el Número de Mach Alfvénico, M_A . Para el choque de proa terrestre el Número de Mach magnetosónico está entre 3 y 10. El ángulo θ_{Bn} es el ángulo entre la dirección del campo magnético interplanetario y la dirección normal a la superficie del choque. La física involucrada en la

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

transición también está influenciada por la β del plasma, (Balogh et al., 2005).

La forma en la cual el plasma dominante calienta y disipa el entorno en el choque depende del ángulo θ_{Bn} . La Figura 1.3 muestra la dirección promedio de las líneas del CMI río arriba del choque de proa. A lo largo de la superficie del choque el ángulo θ_{Bn} oscila entre $\sim 90^\circ$ y casi 0° (o sea de una configuración cuasi-perpendicular a una cuasi-paralela). En el caso cuasi-perpendicular ($\theta_{Bn} > 45^\circ$), la transición del choque tiende a ser abrupta en el tiempo y espacialmente está bien definida, Figura 1.3(b) mientras que en el caso cuasi-paralelo ($\theta_{Bn} < 45^\circ$) la transición ocurre sobre una región más amplia llena de fluctuaciones magnéticas, Figura 1.3(a).

Las observaciones del choque de proa que había antes del año 2000 poseen la limitación de haberse hecho con una o dos naves. El choque de proa es un choque dinámico, es decir, es una región en constante movimiento debido a los cambios en la presión dinámica del viento solar. Su estructura también cambia continuamente como respuesta a los cambios del ángulo θ_{Bn} y los parámetros del plasma que determina el viento solar. Entonces estas variaciones alteran los parámetros físicos que pueden ser observados en las regiones circundantes. Como decíamos las observaciones de una o dos naves tienen limitaciones y éstas se deben justamente a que deben hacerse ciertas suposiciones en el momento de efectuar las mediciones y dichas suposiciones en ocasiones son cuestionables. En este sentido la misión Cluster con sus cuatro naves ha contribuido en el mejoramiento de las mediciones. Esto se tocará a detalle en la sección 2.1.

1.4. El antechoque

Los choques sin colisiones existen primordialmente para mediar la interacción del flujo del plasma supermagnetosónico y como fuentes de aceleración de partículas. Bajo ciertas configuraciones geométricas del CMI una porción del plasma proveniente del viento solar regresa a la región río arriba del choque al rebotar en éste de manera que no es conducido a la región río abajo. La combinación del plasma entrante y el plasma que va contracorriente al choque es susceptible a inestabilidades que pueden generar ondas, (Russell y Hoppe, 1983; Gary, 1993). Estas ondas interactúan con los iones y electrones del viento solar en formas muy complejas modificando la función de distribución del plasma.

La región río arriba del choque que está magnéticamente conectada con el

1.4. El antechoque

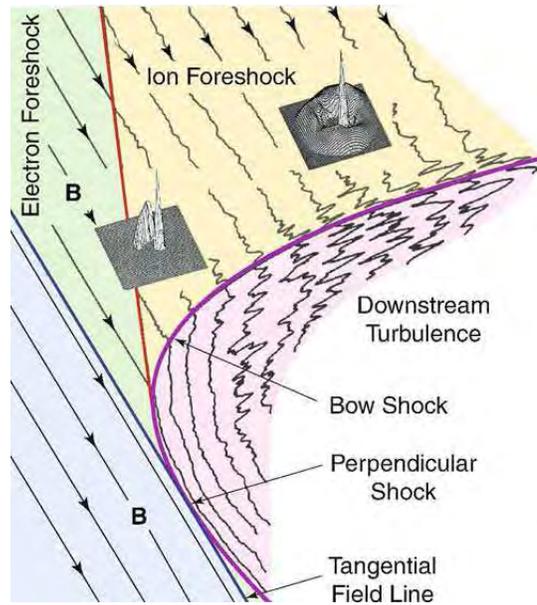


Figura 1.4: En el esquema se observa el sistema del choque y antechoque terrestre. Su configuración depende del ángulo θ_{Bn} que divide la región delante del choque en el *choque cuasi-paralelo* y el *choque cuasi-perpendicular*, siendo el choque cuasi-paralelo una región más extendida y variable a lo largo del tiempo. El antechoque, en mayor parte río arriba del choque cuasi-paralelo y confinado a la región detrás de la línea de campo tangente, exhibe una clara estructura espacial. Justo detrás de la línea de campo tangente se encuentra el antechoque de electrones donde sólo se observan electrones rebotados en el choque. Detrás de la frontera del antechoque de iones generalmente se observan distribuciones de iones rebotados que son alineados al campo. Dentro del antechoque y cerca del choque cuasi-paralelo se observan iones rebotados que formaron distribuciones de iones difusos. En el esquema se superponen gráficos del espacio de velocidades para representar las distribuciones de los iones alineados (cerca de la frontera del antechoque de iones) y de los iones difusos (cerca del choque cuasi-paralelo). En estas gráficos de relieve el pico afilado corresponde al viento solar. Tomada de Treuman y Scholer (2001).

choque y que está llena de partículas que han rebotado en el choque y de ondas se conoce como *antechoque*. El choque de proa se divide en dos regiones de acuerdo al ángulo θ_{Bn} : el *choque cuasi-paralelo* limita la región donde $\theta_{Bn} < 45^\circ$ y el *choque cuasi-perpendicular* se refiere a la región con $\theta_{Bn} > 45^\circ$. Aunque para el choque cuasi-perpendicular el antechoque puede extenderse y ocupar las regiones entre $40^\circ < \theta_{Bn} < 70^\circ$ *, eventualmente puede quedar restringido al pie del choque mientras que en la parte cuasi-paralela el antechoque cubre ahora una región río arriba mucho más amplia y adquiere la estructura de un antechoque propiamente. La Figura 1.4 ilustra la estructura básica del antechoque terrestre, para el cual $\theta_{Bn} \sim 45^\circ$, en ella el viento solar fluye de izquierda a derecha y el choque de proa se indica por una línea curva (en rosa). La estructura del choque y la dinámica

*Esto se sabe pues se han observado distribuciones de iones alineados al campo entre la región donde $\theta_{Bn} > 40^\circ$ y $\theta_{Bn} < 70^\circ$

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

del flujo río abajo dependen del ángulo θ_{Bn} con el choque cuasi-paralelo cubriendo una región más grande, ver Figura 1.3. El antechoque, se extiende río arriba del choque cuasi-paralelo y está confinado a la región delante de la línea tangente al campo (en rojo). En este caso el antechoque ocupa casi toda la región del choque cuasi-paralelo.

La importancia de distinguir entre los choques cuasi-paralelo y cuasi-perpendicular es clara cuando se analiza el movimiento de las partículas en cada uno de estos choques pues eso determina cómo se comporta la partícula al ser inicialmente alejada del choque. En el sistema de referencia Hoffman-Teller (ver el Apéndice B para mayor detalle) el movimiento de la partícula tiene dos partes: un movimiento no amortiguado a lo largo de la dirección del campo magnético y un movimiento de giro alrededor de esa dirección (su combinación resulta en un movimiento tipo helicoidal). En el caso del choque cuasi-paralelo la línea de campo "atraviesa" al choque y el movimiento a lo largo del campo lleva a la partícula a través del choque alejándola de él o bien la partícula puede rebotar en el choque y regresar por las líneas de campo; cualquiera de los dos escenarios resultan ser procesos que la partícula puede hacer fácilmente, (ver Figura 1.5). En el caso del choque cuasi-perpendicular las líneas de campo son paralelas a la superficie del choque de manera que el movimiento de la partícula a lo largo de la línea de campo no puede llevar a la partícula a través del choque. De hecho el movimiento de giro de la partícula hace que permanezca en el choque.

La extensión del choque cuasi-paralelo resulta ser mayor debido a que hay una mayor interacción entre iones rebotados y iones provenientes del viento solar a diferencia del choque cuasi-perpendicular donde no hay rebote de partículas de manera que los efectos sobre las partículas ahí presentes son menores y por lo tanto su extensión resulta ser menor que la del choque cuasi-paralelo.

Los iones son los que determinan la mayor parte de la estructura de los choques sin colisiones debido a que al ser más masivos que los electrones, portan la mayoría de la masa y energía en los flujos del plasma. Debido a esta diferencia de momento entre iones y electrones serán los electrones los que lleguen más lejos del antechoque al ser rebotados de manera que en el antechoque se observan dos regiones muy bien delimitadas conocidas como: *antechoque de iones* y *antechoque de electrones*.

Gran parte del conocimiento que se tiene sobre el antechoque y los fenómenos ahí existentes son derivados de las mediciones *in situ* que han hecho distintas mi-

1.4. El antechoque

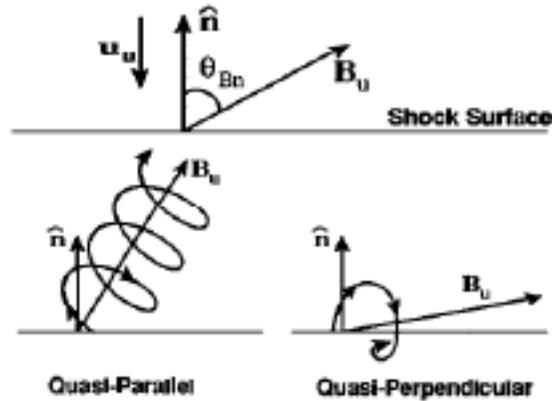


Figura 1.5: El ángulo θ_{Bn} y ejemplos de trayectorias de partículas reflejadas en los casos de choques cuasi-paralelo (izquierda) y cuasi-perpendicular (derecha). El vector normal a la superficie del choque está indicado por \hat{n} y B_u es el vector unitario del CMI. Tomada de Kivelson y Russell (1995).

siones espaciales. Las primeras observaciones hechas por una sola nave indicaron la existencia de distribuciones de iones río arriba del choque de proa que no podían ser clasificadas como las distribuciones típicas del viento solar o las pertenecientes a la magnetofunda. Éstas distribuciones además estaban asociadas con fluctuaciones en el campo magnético. Conforme se tenían las observaciones de las siguientes misiones se observaba una variedad de distribuciones de partículas y ondas mucho mayor de la que se tenía pensada. Por ejemplo, se demostró que las fluctuaciones del campo en las distribuciones observadas eran en realidad ondas cuasi-monocromáticas con periodos de cerca de 30 segundos, igualmente Russell et al. (1971) observaron ondas empujadas linealmente polarizadas llamadas *shocklets* asociadas con paquetes de ondas discretos y Fairfield (1974) observaron ondas llamadas de 1Hz. Se hallaron *ondas de Frecuencia Ultra Baja* (FUB) asociadas a distribuciones de iones difusos y además se encontró que estas ondas se propagaban en la dirección del Sol, alejándose del choque en la misma dirección que los iones rebotados.

Las observaciones de las naves *ISEE-1* y *ISEE-2* contribuyeron de manera importante en la descripción de la dinámica del antechoque. Entre los avances hechos se identificaron distintas distribuciones de iones: *reflejados* o *alineados al campo* (IAC), *intermedios* y *difusos*. Esta división fue hecha en base a las funciones de distribución de las velocidades en 2-D, Gosling et al. (1978) y espectrogramas de tiempo-energía, Paschman et al. (1981, 1979). Observaciones posteriores mostraron la existencia de otros tipos de distribuciones, entre ellos dos distribuciones de iones girato-

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

rios: los de tipo *racimo*, Fuselier et al. (1986) y los originados por *reflexión especular*, Meziane et al. (2001, 2004b). Estas cinco distribuciones de iones no son las únicas presentes en el antechoque pero si las más estudiadas pues son las responsables de casi todas las ondas observadas en el entorno terrestre. Además del estudio de estas distribuciones, las observaciones han permitido establecer las relaciones entre las ondas y las distribuciones de iones que producen cada uno de los modos. Un estudio sobre la asociación entre distribuciones de iones y ondas puede encontrarse en Hoppe y Russell (1983). Los iones alineados al campo tienen una distribución fría y se propagan a lo largo del campo magnético, son observados en la orilla del antechoque de iones y río arriba del choque cuasi-perpendicular ($40^\circ \leq \theta_{Bn} \leq 70^\circ$). Los iones difusos tienen una distribución caliente e isotrópica mientras que la distribución de los iones intermedios tiene una forma de media luna en el espacio de velocidades y esta centrada a lo largo de la dirección del campo magnético. Los iones giratorios muestran un movimiento de giro alrededor del campo magnético. Sin embargo, en la actualidad las distribuciones tridimensionales obtenidas por Cluster muestran que no hay evidencia clara de que los iones intermedios tengan distribuciones con formas de media luna. En lugar de estos, haces de IAC más calientes o de distribuciones que muestran una firma de iones giratorios se observan más frecuentemente río abajo de la región con IAC fríos. Entonces, desde el punto de vista actual la orilla del antechoque de iones está permeada por IAC fríos seguida de una región río abajo donde haces giratorios (y no girotrópicos) bien definidos están presentes, Blanco-Cano (2009c). Como puede observarse en la Figura 1.6 los iones difusos aparecen en regiones más internas del antechoque, cerca del choque cuasi-paralelo.

Estadísticamente los diferentes tipos de ondas tienen una dependencia de la geometría del choque de proa que es determinada por el ángulo entre las líneas de campo y la dirección normal al choque, θ_{Bn} . Los haces de iones con energías de varios keV colimados a lo largo de las líneas del CMI usualmente son observados río arriba del choque cuasi-perpendicular. Lo que en principio se pensó eran distribuciones de iones intermedios y que ahora se conocen como IAC se observan en la orilla del antechoque de iones río arriba del choque cuasi-perpendicular mientras que los iones giratorios, con una amplia dispersión en el espacio de velocidades centrado en el campo magnético, son observados justo río abajo de la región donde se ven los IAC. Finalmente las poblaciones de iones difusos distribuidos en

1.4. El antechoque

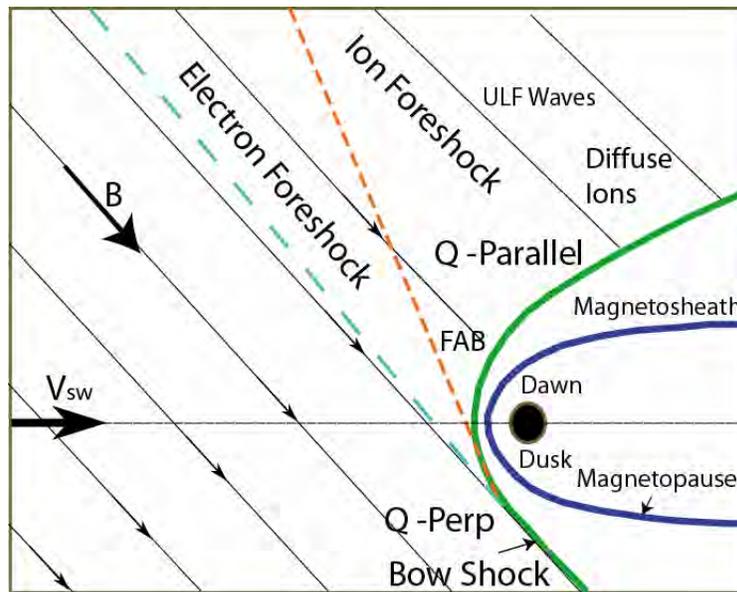


Figura 1.6: En esta figura, como en la Figura 1.4, se observa el choque de proa y el antechoque. Se ilustran las regiones donde se encuentran comúnmente las distribuciones de iones difusos y IAC. Tomada de Blanco-Cano (2009c).

un cascarón de radio casi constante para una velocidad media, pueblan la región río arriba del choque cuasi-paralelo. (Gosling et al., 1978; Bonifazi y Moreno, 1981; Paschman et al., 1981).

Comparados con los iones, los electrones rebotados tienen una variedad en sus propiedades mucho menor, (Fitzenreiter, 1995). A lo largo de las líneas de campo tangentes al choque se encuentran electrones energéticos, de más de 1 keV, mientras que más adentro del antechoque los electrones encontrados son de menores energías. Esto se puede entender en términos de la deriva del campo eléctrico convectivo del viento solar el cual adquiere mayor importancia en el caso de los electrones de menor energía. Los electrones rebotados existen como una cola de alta energía en la distribución principal del viento solar lo que produce ondas de Langmuir a la frecuencia electrónica del plasma, en particular en la parte de la orilla del antechoque de electrones más cercana al choque donde los electrones rebotados tienen mayor energía. Más adentro en el antechoque de electrones la frecuencia de la onda es corrida más allá de la frecuencia electrónica del plasma y entonces se encuentran armónicos de ésta frecuencia que corresponden a ondas electromagnéticas.

1.4.1. Fronteras dentro del Antechoque

Frontera del Antechoque de Electrones

Como mencionamos antes, al interior del antechoque se observan dos regiones bien delimitadas: una ocupada por los iones rebotados y otra por los electrones. El *antechoque de electrones* ocupa la región desde el choque de proa hasta justo río abajo de la línea tangente de campo magnético o sea hasta la frontera con el choque cuasi-perpendicular, Figura 1.4. Así como el antechoque de iones es una región muy dinámica, el *antechoque de electrones* también lo es y en ella los electrones rebotados en el choque de proa se mueven río abajo a través del choque debido al campo eléctrico del viento solar, $\vec{v} \times \vec{B}$. De manera similar a como se observan los iones en el antechoque de iones, los electrones de mayor energía se observan cerca de la frontera del antechoque mientras que los electrones menos energéticos se observan más lejos río abajo debido a efectos del tiempo de vuelo y al campo eléctrico del viento solar. El resultado de esta configuración de los electrones son haces de ellos que producen una función de distribución de *abultamiento en la cola*, (ver Figura 1.7). Las ondas observadas en ésta región (básicamente ondas de Langmuir) están típicamente a la frecuencia del plasma f_{pe} y su segundo armónico, pero más allá de la frontera del antechoque ya en el interior del antechoque de electrones estas ondas han sido corridas a frecuencias por arriba o debajo de f_{pe} .

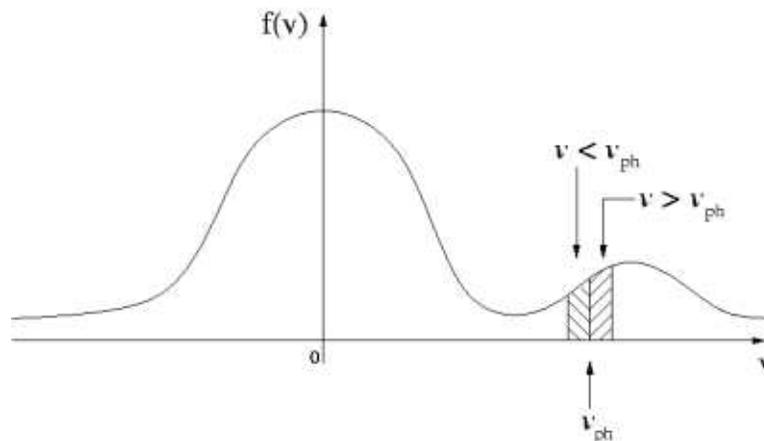


Figura 1.7: Función de distribución con abultamiento en la cola (*bump-on-tail*, en inglés) y partículas interactuando con una onda con velocidad de fase v_{ph} . Hay más partículas con velocidades mayores que v_{ph} que partículas con velocidades menores que v_{ph} lo que significa que hay más energía disponible para el crecimiento de ondas. Esta función de distribución es típica para inestabilidades entre dos flujos.

1.4. El antechoque

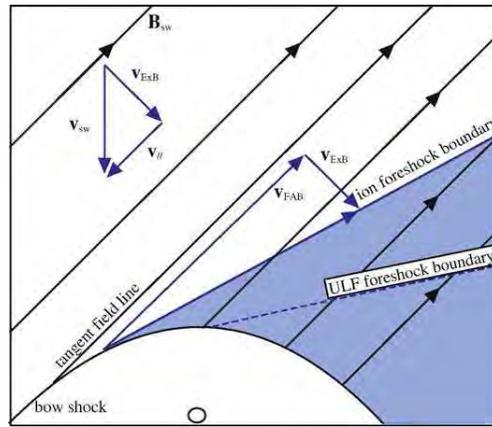


Figura 1.8: Estructura del antechoque de iones para una configuración típica del CMI (ángulo de cono = 45°). Es importante notar que la frontera del antechoque de iones no está alineada con el campo y se encuentra detrás de la línea de campo tangente. La frontera del antechoque de ondas FUB indica el límite río arriba de la región de ondas FUB en el antechoque. Tomada de Paschman et al. (2005)

Fronteras internas del antechoque de iones

La morfología del antechoque de iones ha sido establecida gracias a las observaciones *in situ* de las distribuciones de iones y de las ondas. La Figura 1.8 muestra un esquema de la estructura del antechoque de iones para un ángulo de cono del CMI de 45°. El viento solar fluye verticalmente desde la parte superior de la figura con una velocidad \vec{v}_{sw} . La línea de campo tangente marca el punto en el cual el viento solar se conecta magnéticamente con el choque de proa; detrás de éste punto de tangencia los iones pueden escapar del choque y regresar a la región río arriba. Los iones son rebotados con una velocidad \vec{v}_{IAC} y en este caso se muestran alineados al campo. Sin embargo, los iones rebotados también están sujetos a una deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ en el campo eléctrico convectivo del viento solar y por lo tanto la frontera río arriba del antechoque de iones no está alineada al campo magnético. También se puede observar que la frontera río arriba del antechoque no intersecta la superficie delimitada por la línea de campo tangente.

Las distribuciones alineadas al campo, las cuales no se observan conjuntamente con ondas FUB, se observan típicamente en la orilla del antechoque de iones casi antes del choque de proa y las distribuciones giratorias se observan río abajo de los IAC; mientras que las distribuciones difusas que sí existen en presencia de ondas FUB son observadas más adentro del antechoque en la región río arriba del choque cuasi-paralelo. Entonces una segunda frontera dentro del antechoque de iones queda definida en la que la actividad de ondas FUB está confinada, esta fron-

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

tera es conocida como la *frontera FUB del antechoque* o la *frontera de ondas del antechoque de iones*. Los estudios han mostrado que para ángulos de cono del CMI de $\sim 45^\circ$ ésta nueva frontera se observa bien definida limitando la región de ondas FUB y se calcula que intersecta al choque de proa a un ángulo $\theta_{Bn} \approx 50^\circ$, Le y Rusell (1992). En la Figura 1.8 la frontera FUB se indica con una línea discontinua.

Basados en un análisis de datos de la misión *ISEE*, Bonifazi y Moreno (1981) mostraron que estadísticamente los iones alineados al campo y los entonces llamados iones intermedios ocupaban regiones distintas. En su trabajo los autores reportaban que los iones IAC ocupaban una capa de un ancho $\sim 0.4R_E$ en la orilla delantera de la frontera del antechoque de iones. ^{*} Después de esta capa, río abajo, reportaban una región de iones intermedios con un espesor de $\sim 3.5R_E$. Sin embargo, el hecho de que Cluster no ha observado las distribuciones de iones intermedios con la forma de media luna y en su lugar ha encontrado iones difusos río abajo de los IAC sugeriría entonces que esta capa de cerca de $3.5R_E$ no es exclusivamente de iones intermedios o bien que los iones intermedios son más bien distribuciones giratorias. Actualmente esta tesis se ha modificado gracias a las observaciones de Cluster como veremos a continuación.

Los iones giratorios de tipo racimo suelen observarse o en la región de iones intermedios o dentro de otra región distinta entre ésta y la de los iones IAC, lo que sugiere la existencia de otra frontera espacial que separa los iones IAC de los intermedios y giratorios de racimo además de sugerir que las tres distribuciones implicadas no se forman en la misma porción de la superficie del choque. Meziane y d'Uston (1998) reportaron evidencia observacional de dicha frontera usando datos del detector unidireccional de partículas a bordo de *ISEE-1*. Los autores muestran que para un cierto rango del ángulo de cono del campo magnético existen puntos de aumento del flujo espacialmente organizados en el antechoque. Debido al campo de visión del detector usado que apunta en la dirección $-Z_{GSE}$, los puntos de aumento del flujo se asociaron con iones rebotados calientes, es decir con iones giratorios o posiblemente difusos. Para un ángulo de cono de $\sim 45^\circ$ ésta frontera se encontró que coincidía con la frontera FUB. Mientras que para ángulos de cono de entre $20 - 30^\circ$ la orientación de la frontera fue muy distinta a la de la frontera FUB.

^{*}El término orilla delantera es una traducción a éste contexto del término *frontera de ataque-leading edge* y se refiere a la parte de la frontera del antechoque de iones que se encuentra delante de la intersección de dicha frontera con el choque de proa.

1.5. Estructuras en el antechoque

Muchas de las ideas que se tienen acerca del antechoque asumen que se encuentra en equilibrio dinámico; sin embargo, el sistema formado por el choque de proa y el antechoque es altamente no-lineal con complicados mecanismos de retroalimentación. Aunque es claro en simulaciones híbridas que los cambios en las condiciones del plasma río arriba del choque (particularmente los cambios en la orientación del campo) causan cambios proporcionales en la estructura de gran escala del antechoque, (Omidi et al., 2005; Blanco-Cano et al., 2006), no conocemos los detalles de los procesos mediante los cuales se dan los cambios ni las escalas de tiempo de respuesta. Existen diversos estudios que examinan estos cambios, por ejemplo se han estudiado los efectos que tiene una breve conexión del CMI con el choque sobre las condiciones del viento solar. En este sentido se han estudiado cómo las llamadas *cavidades del antechoque* modifican los parámetros del plasma y también se ha estudiado cómo la intersección del choque de proa con una discontinuidad interplanetaria puede ocasionar grandes trastornos en el flujo del viento solar río arriba del choque originando la existencia de *anomalías de flujo caliente*. Este panorama indica que existen otras estructuras en el antechoque terrestre además de las ondas. En la región río arriba del choque se han encontrado estructuras en el plasma para las cuales los cambios de los que se hablaba previamente, se presentan como variaciones en el campo magnético y en la densidad de iones; en este sentido se ha reportado la existencia de varios fenómenos con perfiles que muestran depresiones en el campo magnético y/o en la densidad de iones y cuyos orígenes son totalmente distintos. En este trabajo estamos interesados en este tipo de eventos pues los perfiles observacionales con los que se trabajó son similares; con la finalidad de diferenciar cada uno de esos eventos de la nueva frontera del antechoque presentada en este trabajo se hace una descripción de tales eventos con cierto detalle.

1.5.1. Anomalías de flujo caliente

Una de las primeras estructuras del antechoque que se describieron fueron las *cavidades diamagnéticas* (CD), éstas fueron reportadas por primera vez por Schwartz et al. (1985) en cuyo trabajo mostraban una nueva estructura en el plasma perteneciente al viento solar que formaba un sistema hoja de corriente/depresión magnéti-

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

ca frente al choque de proa. Los datos de campo magnético y plasma mostraban que alrededor de este nuevo sistema el campo magnético sufría una rotación, el viento solar era comprimido y calentado, la intensidad del campo magnético aumentaba y había una considerable actividad de ondas. La región interna de este sistema mostraba un fuerte calentamiento de los iones; sin embargo tanto la densidad como el campo magnético fluctuantes disminuían sus valores. La velocidad del flujo al interior de la región era desviado bruscamente de la dirección anti-Sol pero no hacia la dirección donde se predecía que habría compresión en el campo a través de la frontera de este sistema. Las fuentes de momento y energía de estos nuevos eventos no se conocían entonces pero se pensaba que eran de tipo magnetosférico.

Posteriormente las cavidades diamagnéticas identificadas por Schwartz et al. (1985) fueron llamadas Anomalías de Flujo Caliente (AFC) y se estudiaron con mayor profundidad.

Las AFC son perturbaciones del antechoque y del choque de proa causadas por la interacción de los iones presentes en estas regiones con una hoja de corriente (probablemente una *discontinuidad tangencial*) que ha viajado con el plasma del viento solar. Su perfil observacional incluye: (1) regiones centrales calientes con distribuciones isotrópicas de velocidades de iones y electrones; (2) velocidades de bulbo mucho menores que las velocidades del viento solar ambiente que además han sufrido desviaciones en el mismo sentido que el flujo en la magnetofunda, pero de mayor intensidad; (3) campo magnético poco perturbado en la región central de la anomalía, con frecuencia se observan regiones de aumento y depresión en la intensidad del campo; (4) duraciones que impliquen escalas espaciales de uno o más radios terrestres; (5) regiones en las orillas que presentan compresión y que son consistentes con choques débiles, en la parte interior de estas orillas (hacia la región central) parecen ser simplemente regiones de viento solar chocado separadas de la región central por una discontinuidad tangencial; y (6) una estructura tridimensional inferida de las orientaciones de las normales al choque en las orillas delantera y trasera a la región central, lo que sugiere que la superficie del choque tendría protuberancias durante estos transientes.

Existen numerosos ejemplos de AFC observadas *in situ* por una o varias naves, el trabajo de Lucek et al. (2004b) presenta ejemplos de estos eventos observados simultáneamente en las cuatro naves de Cluster el 02 de Abril del 2002 y en la cual se sugiere que las AFC observadas corresponden a distintos momentos de evolu-

1.5. Estructuras en el anteochoque

ción del fenómeno. La Figura 1.9 muestra dos discontinuidades ocurridas durante el intervalo de tiempo entre las 03:34:00 UT y las 03:39:00 UT, la región marcada con el número 1 no alcanzó a producir una AFC aunque la orientación del campo magnético fue tal que los iones reflejados pudieron salir del plano de la discontinuidad. La segunda discontinuidad ocurrió en la región marcada con el número 2 a lo largo de la cual el campo magnético cambió su orientación y sí produjo una AFC pues los cálculos hechos para el campo eléctrico convectivo mostraron que éste sí actuó como un colimador sobre los iones reflejados alejándolos del plano de la DT tal como se propone que es la formación de las anomalías. Cluster 1 entró en la AFC a través de una región de débil compresión marcada por (a) y salió a través del choque en (b). Entre estas dos transiciones Cluster observó una región de bajo campo magnético en la que las distribuciones de iones mostraron la presencia de dos poblaciones de iones: la del viento solar y un haz fluyendo en dirección Sol, lo que es consistente con los iones reflejados en el choque que han sido colimados a lo largo de la discontinuidad. Las densidades de las dos poblaciones son casi las mismas. Esa distribución de iones es inestable a la generación de ondas las cuales tenderían a dispersar los iones formando una única distribución; de hecho la cavidad ya muestra cierta evidencia de actividad de las ondas y para anomalías que suceden después, en esa misma órbita, se observa una única población de plasma caliente. Dado que las dos poblaciones de iones eran distintas en este caso, los autores sugieren que esta AFC se encontraba en una etapa temprana de desarrollo.

La región de plasma caliente y comprimido entre las transiciones (c) y (d) en la Figura 1.9 fue interpretada como un reencuentro con el plasma comprimido en el borde de la AFC, que se movió hacia el norte de vuelta a la nave. Cluster no vio la firma de plasma caliente dentro de la región de compresión lo que sugiere que la nave no volvió a entrar en la AFC, pero la orientación y el movimiento de las fronteras (c) y (d) es coherente con esta interpretación. Este reencuentro sugiere o bien un cambio en la tasa de expansión de la AFC o un cambio en el movimiento de toda la estructura. Lo primero podría surgir de la mezcla de las dos poblaciones de iones, o la convección de la AFC más cerca de la nariz del choque de proa en el que el evento es más fuerte. Lo segundo podría surgir de que la DT subyacente no estuviera en un plano.

Para que una discontinuidad tangencial (DT) genere una AFC, la normal a la DT debe estar bastante inclinada respecto a la línea Sol-Tierra, es decir, para configuraciones oblicuas del ángulo de cono del CMI. La línea a lo largo de la cual la

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

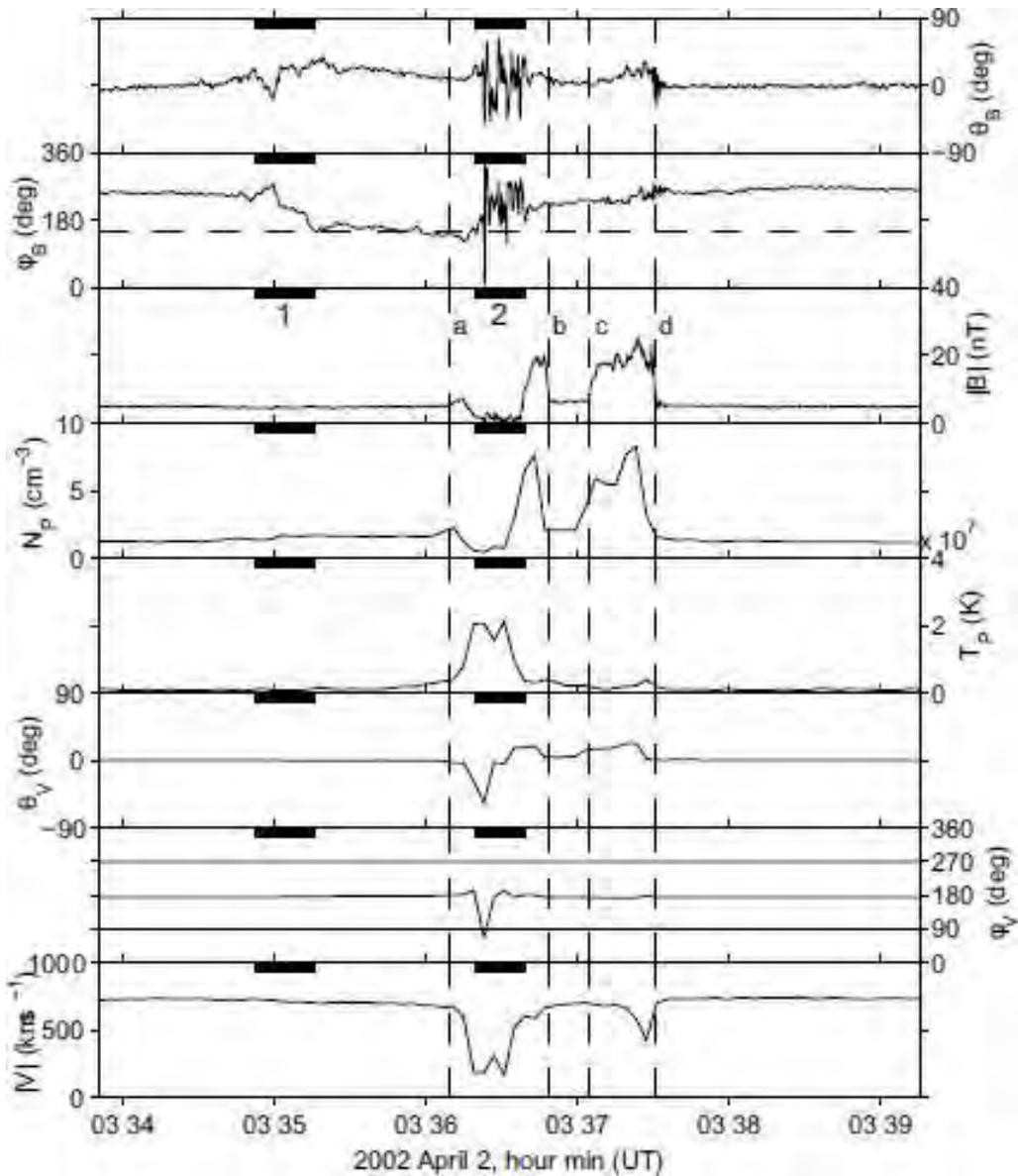


Figura 1.9: Las AFC resultan de la interacción de una hoja de corriente interplanetaria con el choque de proa terrestre. El flujo desviado y el interior caliente de la AFC son consecuencia de que los iones reflejados en el choque de proa sean conducidos a lo largo de la hoja de corriente. Este proceso requiere de un campo magnético que se mueva en la dirección de la hoja de corriente en al menos uno de los lados de la hoja. Los aspectos cinéticos de la formación de AFC sugieren que la hoja de corriente debe pasar relativamente despacio a lo largo del choque de proa o sea que sus normales deben tener grandes ángulos de cono. En la gráfica se observan datos de campo magnético y plasma de una AFC observada por Cluster 1. Los paneles muestran (de arriba a abajo): ángulo de elevación del campo magnético θ_B , ángulo de longitud ϕ_B en coordenadas GSE, magnitud del campo magnético $|B|$, densidad de protones N_p , temperatura de protones T_p , elevación del vector velocidad, ángulos de longitud θ_V y ϕ_V , y magnitud de la velocidad $|V|$. Tomada de Lucek et al. (2004b).

1.5. Estructuras en el anteochoque

discontinuidad intersecta al choque de proa se debe mover lentamente a través de la superficie del choque conforme la discontinuidad se mueve dentro del viento solar en dirección anti-Sol. Una fracción del flujo del viento solar incidente es reflejada desde el choque de proa y esos iones reflejados experimentan un campo eléctrico convectivo resultante de la convección que sufre el CMI por el viento solar.

La física de la formación de la AFC puede resumirse como sigue: para empezar la dirección del campo magnético en uno o a ambos lados de la DT debe colimar los iones reflejados hacia el plano de la discontinuidad. Además la velocidad a la que sigue moviéndose la DT debe ser lenta respecto a la velocidad de los iones reflejados de manera que muchos iones reflejados son direccionados a lo largo del plano de la discontinuidad. Por último la DT debe ser delgada en relación al radio de giro de los iones reflejados, lo que garantizará que una población significativa de iones reflejados pueden ser encausados a lo largo del plano de la DT. Estos iones interactúan con el haz del viento solar para generar ondas, causando que las dos poblaciones de iones se dispersen y formen una sola población de iones calientes. La presión extra que tiene esta población caliente de iones, que fluye a lo largo de la DT, causa la expansión de una cavidad centrada en el plano de la discontinuidad. Las regiones de compresión se forman a las orillas de la región central la cual puede desarrollarse y formar un choque si la tasa de expansión es suficientemente rápida. La Figura 1.10 es un diagrama de la formación de las AFC y la Figura 1.11 es un diagrama de las condiciones del viento solar asociadas a la formación de anomalías.

Sin duda la característica más significativa de estas anomalías es la gran desviación que puede sufrir el flujo del viento solar. La temperatura de las AFC suele aumentar hasta en dos órdenes de magnitud por encima de los valores promedios en viento solar, de $T_i \sim 10^5$ a $T_i \sim 10^7$ y la distribución de iones al interior de la anomalía es de una simple población maxwelliana caliente, Schwartz (1995). Las distribuciones de electrones también son aproximadas por funciones maxwellianas. La duración típica de las anomalías es de algunos minutos lo que implica tamaños de algunos radios terrestres.

El proceso de termalización del plasma dentro de la AFC aún está en discusión. Algunos trabajos en los que se simulaba la interacción de un haz de iones contra un flujo de viento solar se encontró que dicha interacción producía fluctuaciones que calentaban el plasma, el cual luego se expandía y comprimía el campo magnético ambiente reproduciendo muy bien un perfil típico de una AFC. Sin embargo la

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

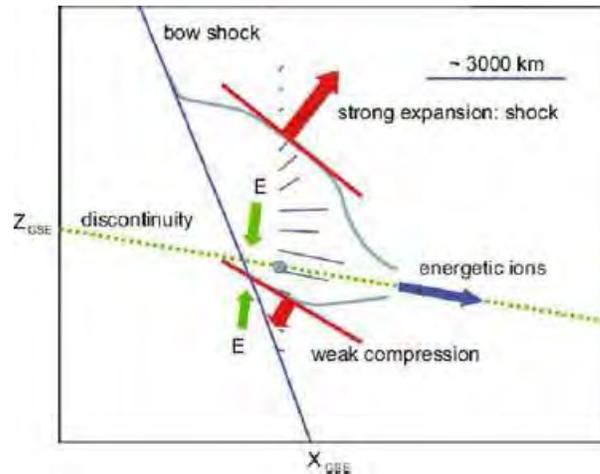


Figura 1.10: Diagrama esquemático de una AFC observada por Cluster, proyectado en el plano xz en coordenadas GSE. El perfil observado por Cluster es interpretado como una burbuja que se expande bajo presión interna. La forma de la AFC está sujeta a las siguientes condiciones: localización relativa de la nave respecto a la superficie del choque de proa (círculo azul), el plano aproximado de la discontinuidad (línea punteada azul), los vectores de velocidad de la perturbación graficados bajo la suposición de que la discontinuidad sigue su movimiento hacia el sur a 110 km/s (líneas suaves azules, estos vectores son las diferencias instantáneas entre el vector velocidad local y el vector velocidad del viento solar fuera de la AFC), y finalmente las orientaciones de la compresión y del choque a las orillas del evento. Tomada de Lucek et al. (2004b).

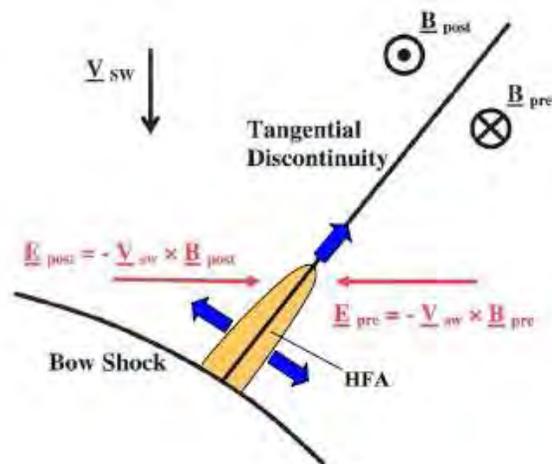


Figura 1.11: El diagrama mostrado ilustra la interacción entre una discontinuidad tangencial interplanetaria y el choque de proa planetario requerido para la formación de AFC. Conforme la DT y su AFC asociada se desplazan sobre la nave, se observa primero el lado de la DT previo al evento y luego el lado posterior. La dirección del flujo del viento solar nominal está indicado por una flecha negra, la orientación del campo magnético en cada lado está señalado por círculos, la dirección del campo eléctrico convectivo se indica con flechas rojas y la expansión de la cavidad perteneciente a la AFC se ilustra con flechas azules. Esta expansión puede ser a lo largo de la DT o hacia los lados, como si se alejara, desde el sistema de referencia de la discontinuidad. Tomada de Masters et al. (2008).

1.5. Estructuras en el antechoque

polarización de estas fluctuaciones no concordaba con la polarización esperada. Recientemente Eastwood et al. (2008) sugirió que en el interior de la AFC donde hay una alta presión cinética la distribución de electrones es isotrópica ($T_{\parallel}/T_{\perp} = 1$). La distribución se ve limitada a ser isotrópica debido a la inestabilidad tipo manguera de electrones y la inestabilidad *whistler*.

Como mencionamos al principio de esta sección, las AFC pueden ocurrir cuando una discontinuidad interactúa con un choque sin colisiones, (Lucek et al., 2004b). Hay reportes de que se han observado eventos tipo AFC en los choques de Marte, Øieroset et al. (2001) y Saturno, Masters et al. (2008).

1.5.2. Cavidades del Antechoque

Después de lo reportado observacionalmente por Schwartz et al. (1985) para las AFC, se hicieron simulaciones híbridas de la interacción entre el viento solar y los iones rebotados en el choque de proa, Thomas y Brecht (1988), donde se encontró que esta interacción generaba ondas capaces de que en una cierta región “empujaran” el campo magnético hacia las orillas, provocando también una disminución en la densidad local de iones originando entonces un perfil en campo y densidad, como el asociado a las cavidades diamagnéticas por lo que también se les conoció con este nombre.

El proceso de termalización de las cavidades diamagnéticas no estaba bien determinado en los primeros reportes pues se pensaba que las fluctuaciones presentes en el plasma eran las que calentaban el plasma, lo cual fue sugerido a partir de la simulación de interacciones entre el viento solar y haces de iones. El plasma así calentado, se expandía y luego se comprimía generando un perfil típico de cavidad diamagnética. El problema con esta hipótesis de termalización surgió cuando la polarización de dichas fluctuaciones no concordaba con la polarización esperada. En las simulaciones de Thomas y Brecht (1988) se mostró que éstas fluctuaciones correspondían a una inestabilidad resonante derecha que produce una distribución caliente tipo halo con un núcleo frío y no una distribución termalizada simple.

El estudio de las cavidades diamagnéticas tuvo un nuevo matiz cuando Sibeck et al. (2001) reportó los estudios hechos a observaciones de la nave *IMP-8* que trataban de determinar los efectos de iones energéticos sobre el viento solar para comparar con las predicciones teóricas que existían al respecto; estos iones energéticos ganaron su energía al ser reflejados por el choque e interaccionar con las ondas

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

que permean la región delante del choque. Debido a que las líneas del CMI forman una espiral y al ángulo con el que se encuentran a la magnetósfera terrestre, los eventos son más comunes río arriba de las regiones previas o posteriores al mediodía. Se observó que las presiones asociadas con los iones energéticos causaban una disminución en la intensidad del campo magnético y la densidad del plasma, y que la magnitud de la depresión resultó ser proporcional a la intensidad de los iones energéticos. Alrededor de estas depresiones se observaban delgadas regiones donde la densidad y el campo magnético en ocasiones formaban zonas donde aumentaban estos dos parámetros; sin embargo, fuera de estas zonas la velocidad del flujo disminuía. En este trabajo a estas zonas de depresión de campo y densidad se les llamó *cavidades del antechoque*. Estas cavidades ocurrían preferentemente para corrientes rápidas de viento solar pero no mostraron ninguna otra dependencia clara de otros parámetros del viento solar.

Un ejemplo de las CA se muestra en el Figura 1.12, el evento se observó el 15 de Febrero de 2001 a las 05:30:00 UT. El panel superior muestra mediciones de la intensidad del campo magnético hechas por las cuatro naves de Cluster mientras que los demás paneles sólo muestran información proveniente de Cluster 1. Los dos primeros paneles (de arriba a abajo) muestran la magnitud del campo magnético y su orientación en el sistema GSE. En los cuatro perfiles superpuestos del campo magnético se observa con claridad la firma típica de una cavidad, en ella se identifica una región de depresión del campo alrededor de las 05:30:00 UT que está rodeada de un ligero aumento del campo a ambos lados de la depresión. El tercer panel muestra el tiempo en que las líneas del campo estuvieron conectadas con el choque con un ángulo de la normal al campo de $\theta_{Bn} < 60^\circ$ (rojo) y $\theta_{Bn} < 45^\circ$ (negro) en la intersección; es de notarse que el centro del evento estuvo conectado en condiciones cuasi-paralelas por cerca de 500 segundos. El siguiente panel muestra la densidad de protones del plasma (línea roja) así como la densidad de iones medidas por Cluster 1 (en negro) y por Cluster 3 (en verde). En las tres líneas se observa también la cavidad como una región donde la densidad aumenta ligeramente para luego disminuir en la zona central del evento. En este mismo panel se grafica, en símbolos azules, la densidad de la componente de iones supertérmicos con menos de 32 keV escalados por 1000. Los siguientes paneles muestran la velocidad y dirección del flujo, siendo la velocidad la que exhibe una disminución antes de encontrarse con la cavidad. El séptimo panel corresponde a la temperatura de iones y electrones que no muestran un comportamiento particular. El penúltimo pan-

1.5. Estructuras en el antechoque

el muestra el flujo de iones con $E > 35$ keV y finalmente el panel inferior muestra las contribuciones del campo magnético y las partículas a la presión total del plasma.

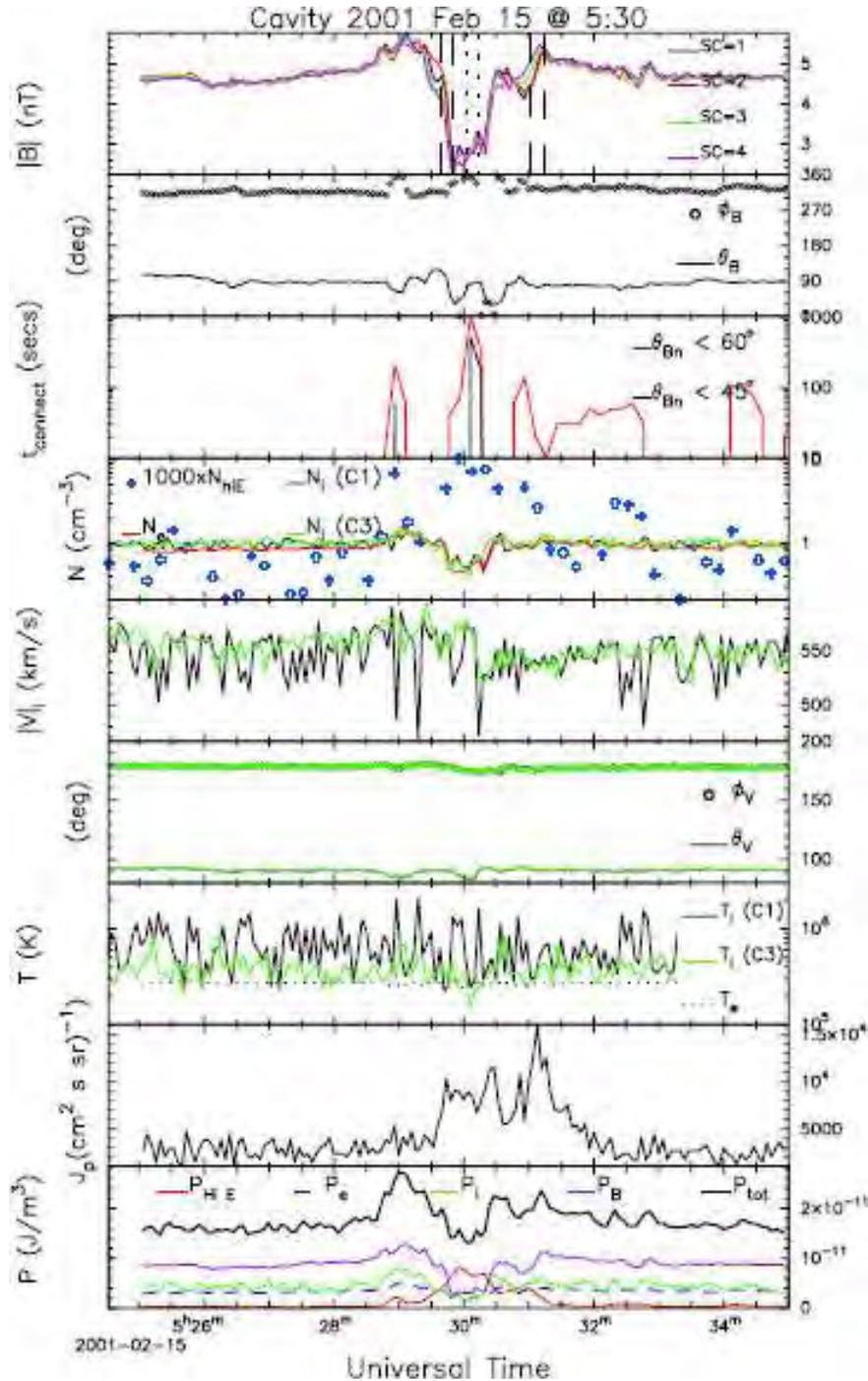


Figura 1.12: La figura muestra los parámetros del plasma para una cavidad del antechoque observada por Cluster el 15 de Febrero de 2001 a las 05:30:00 UT. En este evento podemos notar en la línea roja del panel inferior un aumento en la contribución de los iones supertérmicos a la presión total en la región central del evento. Tomada de Schwartz et al. (2006a).

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

El intervalo en que los iones energéticos asociados aparecieron resultó ser del orden de la interacción entre las discontinuidades de campo magnético interplanetario, el movimiento de la magnetopausa y eventos de transferencia de flujo, lo que sugirió una relación causal entre dichos fenómenos. Posteriormente se compararon observaciones de la nave *Wind* con simulaciones híbridas para las cavidades, Sibeck et al. (2002), obteniendo la confirmación de las predicciones que esperaban observar las cavidades rodeadas de un aumento en el campo y la densidad y además éstas cavidades debían exhibir en su interior una población de iones supertérmicos. En contraste con lo reportado para AFC tanto las velocidades del flujo como la presión térmica dentro de la cavidad del antechoque eran casi las mismas que en el viento solar, las temperaturas de los iones no se disparaban si no que existía sólo un ligero calentamiento respecto a las temperaturas ambiente por lo que las poblaciones de iones no se volvían totalmente isotrópicas y por último se tenía que los eventos no estaban centrados a lo largo de una discontinuidad tangencial del CMI que hubiese intersectado al choque de proa.

En este punto se reconoció que las cavidades diamagnéticas y las cavidades del antechoque eran distintas estructuras debido a su diferente origen; a los eventos del primer tipo se les llamó anomalías de flujo caliente como vimos previamente, y ocurrían en la intersección de ciertas discontinuidades tangenciales con el choque de proa terrestre. En cuanto a las cavidades del antechoque, Schwartz et al. (2006a) sugirieron que éstas se formaban cuando una colección aislada de líneas del CMI se conectaban con la región cuasi-paralela del choque de proa lo que producía que iones energéticos fluyeran río arriba y excavaran una cavidad local en el plasma. En un estudio estadístico sobre cavidades, Billingham et al. (2008) distinguen entre AFC y cavidades analizando si los cambios en la temperatura son muy marcados o si la magnitud de la velocidad del flujo al interior del evento supera el 20% de el valor de la velocidad del viento solar los eventos serán considerados como AFC.

Las cavidades del antechoque se observan con más frecuencia que las AFC y son menos intensas que éstas últimas. Como mencionamos antes a diferencia de las AFC las cavidades no están asociadas con discontinuidades interplanetarias que separan regiones con diferentes orientaciones de campo y distintos parámetros del plasma, sin embargo las cavidades poseen una estructura interna que probablemente está relacionada con las condiciones interplanetarias previas a su existencia. Schwartz et al. (2006a) reportaron que las distribuciones de iones térmicos del viento solar dentro de las cavidades no muestran calentamiento ni desviación aunque

1.5. Estructuras en el antechoque

exista una segunda distribución supertérmica. Las cavidades se forman cuando el aumento en la presión de los iones supertérmicos dentro de los haces de líneas de campo conectadas al choque de proa causa que estos haces se expandan hacia afuera y compriman el plasma cercano y su campo magnético en regiones del espacio no conectadas con el choque. Como resultado, las cavidades pueden identificarse como zonas de aumento de densidad y campo rodeando una región donde estos parámetros decrecen y donde existe una componente de iones supertérmicos isotrópica. Entonces, a diferencia de las AFC la formación de las cavidades no está asociada a cambios de gran escala del CMI. Las cavidades se parecen a una región aislada del antechoque con iones difusos que afectan el plasma que se halla en las orillas de la estructura.

El proceso cinético responsable de la formación de cavidades y AFC es favorecido por largos tiempos de conexión con el choque de proa, lo que resulta ser consistente con lo sabido respecto a que un tiempo mínimo es necesario para que las interacciones onda-partícula formen la distribución de partículas supertérmicas isotrópicas requeridas para excavar la parte central de la cavidad. Consecuentemente a estos largos tiempos de conexión, las orientaciones del CMI casi radiales y discontinuidades con normales casi transversales a la línea Sol-Tierra favorecen la aparición de AFC marcadas por grandes amplitudes. La conexión con el choque de proa también permite observar un campo magnético altamente perturbado al interior de la cavidad.

En las orillas delantera y trasera de la discontinuidad se esperan distribuciones de partículas anisotrópicas. La Figura 1.13 muestra que las velocidades de giro de las partículas cuyas órbitas se extienden hacia afuera de la superficie anterior de la cavidad deben estar en la dirección $+\vec{n} \times \vec{B}$. En contraste las velocidades de giro de las partículas cuyas órbitas se extiendan fuera de la orilla o superficie posterior de la cavidad deben tener dirección contraria.

En un trabajo reciente, Billingham et al. (2008) analizaron 204 cavidades observadas por las naves Cluster en la región del antechoque encontrándose que las depresiones en campo magnético y densidad eran de aproximadamente el 60% de los valores ambientes para esos parámetros. La duración de los eventos es considerada como el tiempo que tarda la nave en detectar las dos orillas que rodean la región donde el campo magnético disminuye su magnitud y típicamente es entre 90 s y 180 s que corresponde a un tamaño de $\sim 8R_E$. El plasma sufre aumento o disminución en su velocidad en los alrededores de las cavidades y dicho cambio es

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

generalmente de alrededor del 10% de la velocidad del viento solar ambiente; al respecto los autores encuentran una tendencia a que las cavidades se formen para velocidades altas del viento solar. La región río abajo del antechoque de iones se caracteriza por ser una región con mucha turbulencia lo que podría disfrazar a las cavidades con las fluctuaciones de densidad y campo magnético típicas de esta zona. Debido a la dificultad para diferenciar las cavidades de este plasma turbulento se espera observarlas preferentemente en regiones quietas río arriba del antechoque de iones intermedios. Cuando el ángulo de cono del CMI es bajo, $\theta_{B_x} \sim 45^\circ$ las cavidades son observadas casi exclusivamente río arriba de la frontera del antechoque nominal de iones intermedios. Sin embargo, cuando el ángulo de cono es grande, $\theta_{B_x} \sim 70^\circ$, las cavidades se observan en regiones más río abajo. Finalmente los autores apoyan la hipótesis de que las cavidades son resultado de una conexión entre haces de flujo magnético aislados con la región cuasi-paralela del choque de proa, esta hipótesis es hasta el momento la más aceptada.

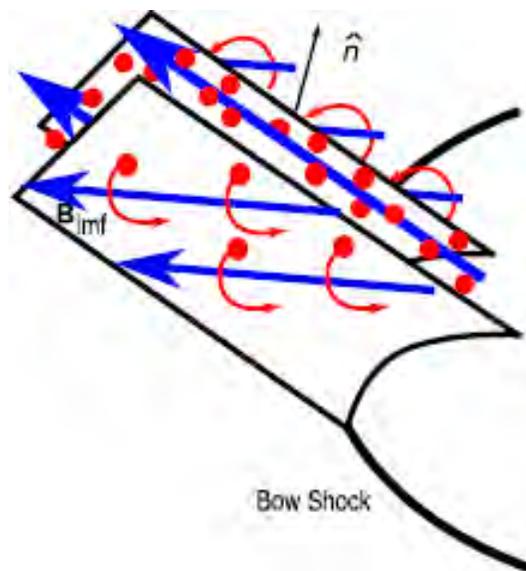


Figura 1.13: Diagrama de la interacción de una hoja de corriente en el viento solar con el choque de proa que origina una cavidad del antechoque dentro de la hoja de corriente. Se ilustra la conexión cuasi-paralela con el choque dentro de la hoja de corriente y las girofases opuestas de los iones super-térmicos (rojo) en las dos orillas. Tomada de Schwartz et al. (2006a).

1.5.3. Cavitones

Blanco-Cano et.al. (2009) reportaron la existencia de una estructura a la que llamaron *cavitón* en simulaciones híbridas globales 2-D de la interacción del viento solar con la magnetósfera terrestre para una configuración radial del CMI. Los autores hallaron estas estructuras caracterizadas por un decremento en la intensidad del campo magnético y la densidad, y un aumento en la temperatura total de los iones (considerando iones del viento solar y iones supertérmicos); perfil que también muestran las cavidades. En principio estas estructuras fueron consideradas cavidades por Omidi et al. (2007), sin embargo las simulaciones mostraron que los cavitones aparecieron en regiones con actividad de ondas FUB lo que resultó contrastante con la idea de que fueran cavidades, pues éstas últimas son estructuras aisladas sin presencia de ondas. Las simulaciones mostraron que los cavitones son generados por la interacción no lineal de dos tipos de ondas de frecuencia ultra baja presentes en el antechoque: por un lado se tienen las ondas sinusoidales débilmente compresivas que se propagan paralelas al campo; éstas ondas interactúan con las ondas magnetosónicas rápidas, altamente oblicuas y linealmente polarizadas que denotaremos por ROL*. Estos dos tipos de ondas se propagan en direcciones perpendiculares una en relación a la otra lo que provoca que conforme interaccionen se pierda coherencia y sean creados frentes de ondas que finalmente formen los cavitones. Figura 1.14.

En este mismo trabajo los autores reportan que los cavitones exhiben iones difusos calientes tanto en la región central de la estructura como en las regiones que los rodean, es decir, antes y después de los cavitones mientras que las cavidades sólo muestran iones difusos calientes al interior de la estructura y pueden mostrar algunos iones supertérmicos en regiones adyacentes. Esto es, que los cavitones están completamente inmersos en regiones con iones supertérmicos a diferencia de las cavidades que pueden mostrar estos iones sólo en una de las orillas. Este escenario contrastó con lo reportado por Sibeck et al. (2001), en cuyo trabajo se mencionaban la presencia de iones energéticos durante intervalos más largos que los calculados para las depresiones de campo y densidad. Otro punto de discusión se estableció con lo reportado por Schwartz et al. (2006a) quienes mostraron un ejemplo de una cavidad con iones supertérmicos enfrente de la orilla delantera de la cavidad,

*En inglés estas ondas se conocen como *highly oblique, linearly polarized, fast magnetosonic waves* o FLO

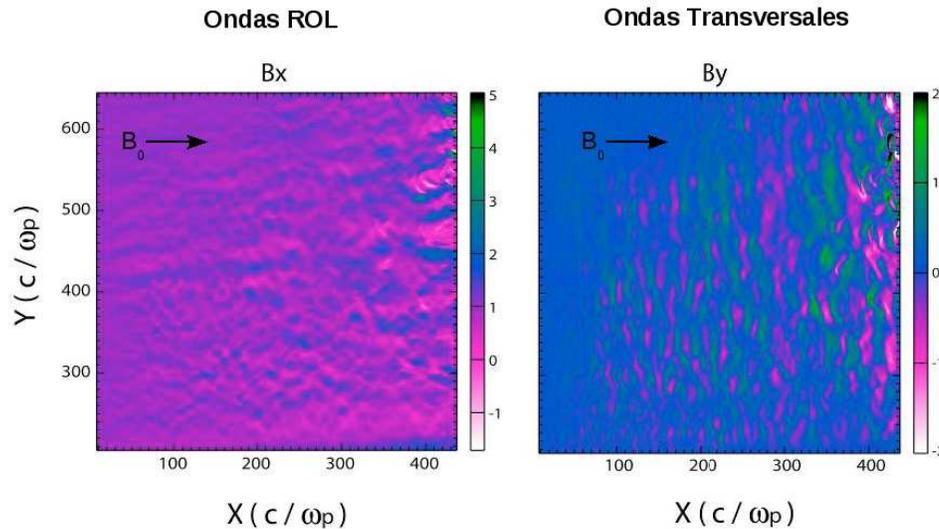


Figura 1.14: Imagen de simulaciones híbridas donde se observan dos tipos de ondas FUB que pueblan el antechoque terrestre, la dirección del campo magnético B_0 se indica por una flecha. En el panel izquierdo se observan las ondas ROL y en el panel derecho se distinguen las ondas transversales. Ambas ondas se propagan en direcciones perpendiculares una respecto a la otra. Imagen proporcionada por N. Omidi.

además de que para este ejemplo los iones energéticos también aparecían aún cuando la parte central de la cavidad ya había pasado.

En un trabajo posterior, Blanco-Cano et al. (2010), se muestran resultados de simulaciones híbridas globales y observaciones de cavitones hechas por Cluster que muestran que tales eventos son estructuras comunes en el antechoque y que se pueden formar para diferentes geometrías del CMI. Además de las depresiones en campo y densidad se muestra que la temperatura aumenta por la presencia de iones supertérmicos y que como ocurre con las cavidades, los cavitones también ayudan al choque de proa a procesar el plasma de viento solar antes de que alcance la magnetósfera terrestre.

En ese mismo trabajo, se muestra un corrida de una simulación híbrida para la que el CMI y el flujo del viento solar están a lo largo de la dirección x y que grafica la densidad donde se muestran cavitones, (Figura 1.15(a)). Se observa que los cavitones aparecen en una región extendida del antechoque rodeados por ondas FUB cuyos frentes de onda muestran que se propagan a grandes ángulos respecto al campo magnético. También se observan ondas débilmente compresivas que en contraste se mueven a ángulos pequeños. Los tamaños y formas de los cavitones son variables y se observa que las variaciones en densidad y campo se hacen mayores conforme se encuentran más cerca del choque lo que también es

1.5. Estructuras en el antechoque

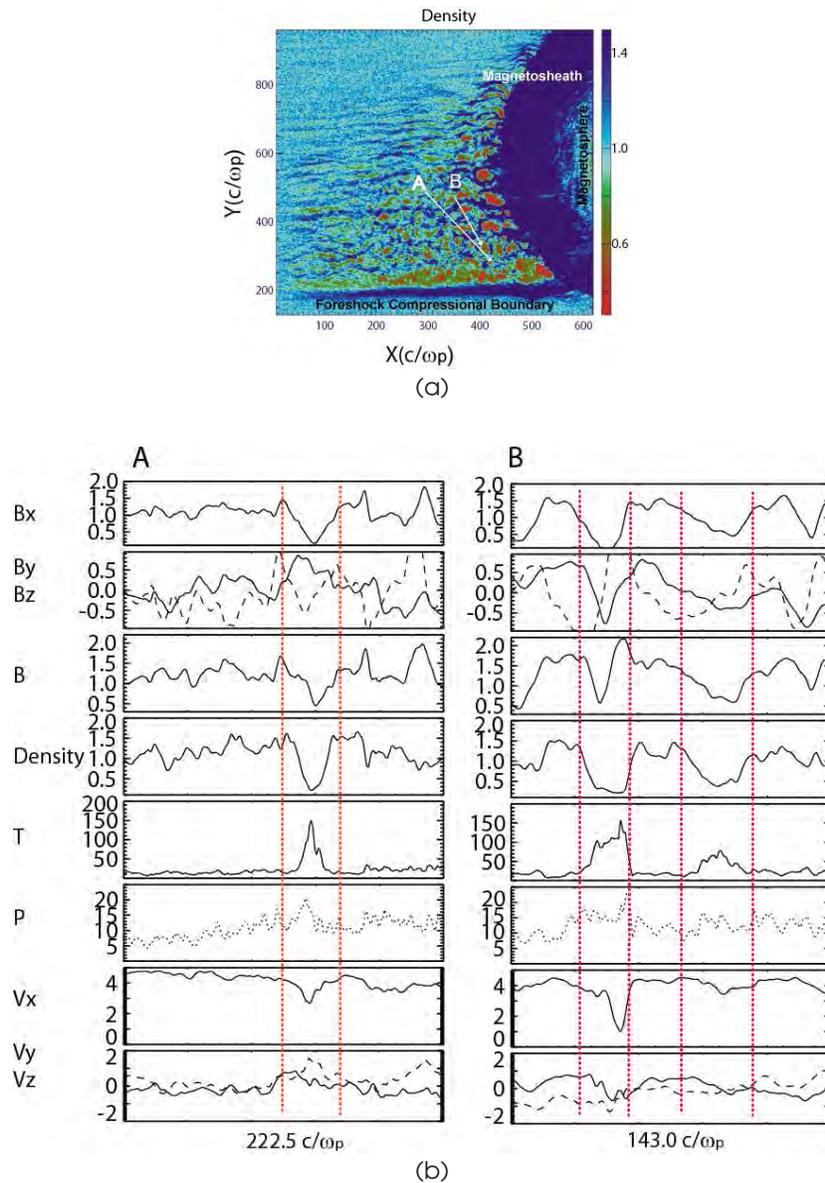


Figura 1.15: (a) Gráfica de densidad para la simulación donde se observa la región que ocupa el antechoque de iones así como una región permeada de ondas y cavitones. Los valores de densidad están normalizados a valores del viento solar quieto. Las flechas indican la dirección de los dos cortes para los cuales son mostrados el campo y la densidad en la figura (b). Esta figura muestra también la existencia de la Frontera Compresiva del Antechoque caracterizada por aumentos en fase de densidad y campo magnético. (b) Parámetros del plasma a lo largo de los cortes A y B mostrados en la simulación, que muestran los perfiles de los cavitones. De arriba a abajo se muestran las componentes del campo x,y,z (línea discontinua), la intensidad del campo, densidad, temperatura, presión total y componentes de la velocidad x,y,z (línea discontinua). La longitud de cada trayectoria esta indicada en longitudes inerciales. Los parámetros de campo, densidad, temperatura y presión están normalizados a valores de viento solar. La velocidad está en unidades de la velocidad de Alfvén. Tomada de Blanco-Cano et al. (2010).

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

acompañado por grandes aumentos en la temperatura total (viento solar e iones supertérmicos). La Figura 1.15(b) muestra los parámetros de plasma y campo para los dos cortes indicados en la Figura 1.15(a). La densidad e intensidad del campo del corte A decrecen por mucho 50% debajo de los valores ambientes y la depresión tiene una extensión de 39 longitudes inerciales del ión (c/ω_p , donde c es la velocidad de la luz y ω_p es la frecuencia del ión del plasma). Este cavitón está rodeado por fuertes aumentos de los mismo parámetros. Dentro del cavitón la temperatura total aumenta, disminuye la componente x de la velocidad y el flujo sufre una desviación. El primer cavitón en el panel B de la Figura 1.15(b) muestra decrementos en densidad, campo y velocidad en la dirección x similares a los de el cavitón en A; y a diferencia de ese evento en éste sólo una de las orillas del cavitón presenta un *hombro* que corresponde a la pequeña región de compresión en el campo. El segundo cavitón en el panel B también muestra decrementos en campo y densidad pero a diferencia de los dos ejemplos previos la velocidad en la dirección x sólo muestra un pequeño cambio, casi no hay desviación en el flujo y no hay hombros en el perfil de campo; esto sugiere que se trata de un cavitón menos desarrollado que los otros ejemplos. Los cavitones del panel B tienen extensiones de 21.2 y 31.8 longitudes inerciales, respectivamente. Las trayectorias A y B muestran que los cavitones están inmersos en regiones con fluctuaciones compresivas. Una inspección simple de las distribuciones de iones dentro de los cavitones y en sus vecindades muestran que los cavitones se desarrollan en regiones donde existen iones difusos. Al interior de los cavitones las distribuciones se muestran más extendidas que en las regiones adyacentes, de ahí que haya un aumento en la temperatura al interior del cavitón. Cuando los aumentos en la temperatura son muy elevados como en el caso del cavitón en A y del primer evento en B, la presión total del plasma (térmica y magnética) aumenta significativamente; mientras que para eventos como el segundo del panel B el aumento es pequeño y la presión total tiene valores similares a los de ese parámetro en el antechoque.

Queda claro que tanto los cavitones como las cavidades poseen un perfil muy parecido y de hecho este mismo perfil lo comparten con otras estructuras conocidas como *hoyos de densidad*, los cuales analizaremos en la siguiente sección. La diferencia principal entre los cavitones y las cavidades es que los primeros siempre están rodeados por ondas de baja frecuencia con gran amplitud mientras que las cavidades aparecen como estructuras aisladas en el viento solar sin ondas FUB de amplitud considerable. Por otro lado los cavitones tienen una duración en prome-

1.5. Estructuras en el antechoque

dio de ~ 25 s, Kajdič et al. (2010), la cual es mucho menor que la duración de las cavidades que es de entre 1.5 y 3 minutos, Billingham et al. (2008). En cuanto a los iones se encontró que mientras solamente al interior de las cavidades existen iones difusos, estas distribuciones están presentes tanto al interior como en las vecindades de los cavitones en las simulaciones; lo que sugiere que el interior del evento se haya conectado con el choque de proa pero no así las regiones adyacentes, Schwartz et al. (2006a).

Se sabe que los hoyos de densidad también aparecen en regiones donde existen ondas FUB y en ocasiones cerca de estructuras magnéticas cortas de amplitud larga conocidas como *SLAMS*. Estos hoyos difieren de los cavitones en su tamaño, siendo los cavitones estructuras de mayor escala que además muestran grandes variaciones de la velocidad del flujo. Mientras que el campo y la densidad están correlacionados en los hoyos de densidad, cuando existen hoyos de densidad profundos con grandes aumentos en las orillas se tiene que en el campo los hoyos son poco profundos con débiles sobre-aumentos* en las orillas y en el caso en que los hoyos en densidad son poco profundos con débiles aumentos en las orillas pueden tener hoyos en campo profundos con grandes sobre-aumentos, Parks et al. (2006). Esta combinación de perfiles contrasta con el del cavitón, pues para estas estructuras los decrementos en densidad y campo siempre tienen amplitudes similares.

Un estudio estadístico hecho por Kajdič et al. (2010) para 68 cavitones observados por la misión Cluster a distancias entre 13 y 20 R_E muestra que la duración de los eventos típica es menos de 30 s, aunque se han encontrado algunos eventos de hasta 1 minuto. La amplitud promedio con la que el campo y la densidad disminuyen es de un 40%, que concuerda con lo predicho en simulaciones por Blanco-Cano et al. (2009). En cuanto a la orientación del CMI el estudio muestra que casi todos los eventos estudiados presentan un ángulo de cono menor a los 50° y en cuanto a las velocidades del viento solar, los cavitones ocurren para un amplio rango de velocidades: 250 a 650 km/s. Las observaciones reportadas muestran que los cavitones no son eventos aislados, pueden observarse por grupos y además un cavitón puede tener un perfil que indique que al interior se encontraba uno o más eventos del mismo tipo que se fusionen.

Finalmente, la Figura 1.16 muestra un ejemplo de un cavitón observado por Cluster el 15 de Febrero del 2001 a las 08:08:00 UT cuya duración fue aproximadamente

*Que en inglés se conocen como *overshoots*

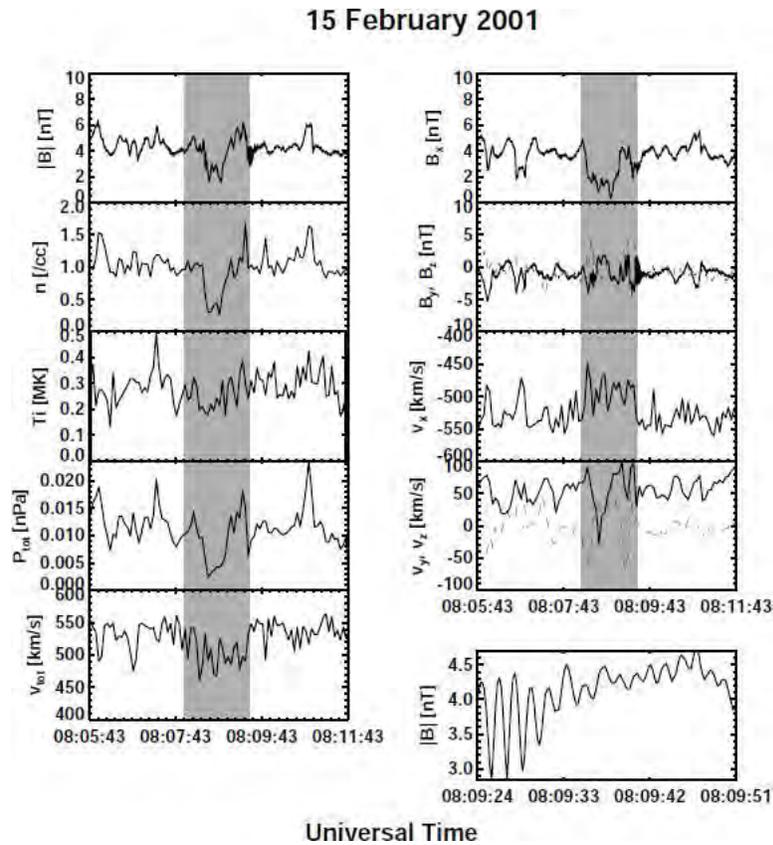


Figura 1.16: Cavitón observado el 15 de Febrero del 2001 por Cluster. En la gráfica de la izquierda se muestran los perfiles (de arriba a abajo) de intensidad del campo, densidad, temperatura, presión total y magnitud de la velocidad. En la gráfica superior derecha se muestran los perfiles para las componentes del campo y la velocidad. En la gráfica inferior izquierda se muestra un acercamiento de la región poblada de ondas de alta frecuencia que fueron detectadas alrededor del cavitón. En el centro del evento se observan dos decrementos en campo y densidad que sugieren la fusión de dos cavitones. Tomada de Kajdič et al. (2010).

de 30 s. La intensidad del campo disminuyó en un 60% del valor ambiente y la densidad decreció en un 73%. La componente x del campo magnético muestra un importante decremento mientras que las componentes y,z muestran una pequeña rotación. La velocidad de 540 km/s decrece en un 13%. Los perfiles de campo y densidad muestran dos picos al interior del cavitón lo que podría significar dos cosas: que las ondas del plasma también están dentro del cavitón o bien que hay dos cavitones que se unen para formar una sola estructura. La temperatura no reportó ningún aumento mientras que la presión total decreció en un 80%. Después de la orilla derecha del cavitón se observan variaciones de alta frecuencia en la magnitud del campo, ~ 0.5 Hz, y también en sus tres componentes. El ángulo de cono para este evento fue de 18° .

1.5.4. Hoyos de Densidad

Observaciones de las naves Cluster y Double Star reportadas por Parks et al. (2006), mostraron depresiones en la densidad y campo magnético de iones río arriba del choque de proa terrestre a los que se les dió el nombre de *hoyos de densidad* con duraciones de alrededor de ~ 18 s y cuyas densidades disminuían en promedio 70% del valor de la densidad en el viento solar. El análisis hecho con varias naves permitió mostrar que estos hoyos se mueven con el viento solar, pueden alcanzar un tamaño de algunos radios de giro de iones y además pueden expandirse. Los hoyos magnéticos que se observan con los hoyos de densidad son casi de la misma forma y aunque generalmente las caídas del campo y la densidad están en fase, en ocasiones los decrementos de ambos parámetros están desfasados. En la orilla río arriba del hoyo de densidad, el campo y la densidad suelen aumentar en un factor entre 2 y 5 veces los valores de esos parámetros en el viento solar. Las componentes del campo sufren una rotación en las orillas de los hoyos, de $\sim 36^\circ$, y la componente x del campo es pequeña, casi cero, en el mínimo del hoyo. En cuanto a la temperatura presentan una población de iones supertérmica importante que provoca que la temperatura al interior de los hoyos supere los 10^7 K, de manera que la densidad y la temperatura se encuentran anticorrelacionadas. Las escalas espaciales de estos eventos son de algunos radios de giro del ión y se encuentra que pueden expandirse. No se ha encontrado una dirección específica del CMI que favorezca la aparición de estos hoyos pero si se ha encontrado que se forma preferentemente para corrientes rápidas del viento solar (~ 620 km/s) y aunque en ocasiones se encuentran dentro de hojas de corriente su mecanismo de producción aún es desconocido. Al respecto de la localización se sabe que no necesariamente están en el antechoque.

La Figura 1.17 muestra cuatro ejemplos de hoyos de densidad observados para diferentes cruces del choque de proa cerca de la región subsolar observados por las naves Cluster y Double Star, Parks et al. (2006). Los hoyos de densidad pueden tener formas simétricas como en el evento del 2 de Marzo del 2005 donde la densidad aumenta en ambas orillas del hoyo, o bien su forma puede ser asimétrica con sólo una orilla elevada como el caso del 3 de Marzo del 2004. Para los cuatro eventos presentados los modelos del choque indican una geometría cuasi-perpendicular en las orillas río arriba mientras que en las orillas río abajo se observa una geometría oblicua.

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

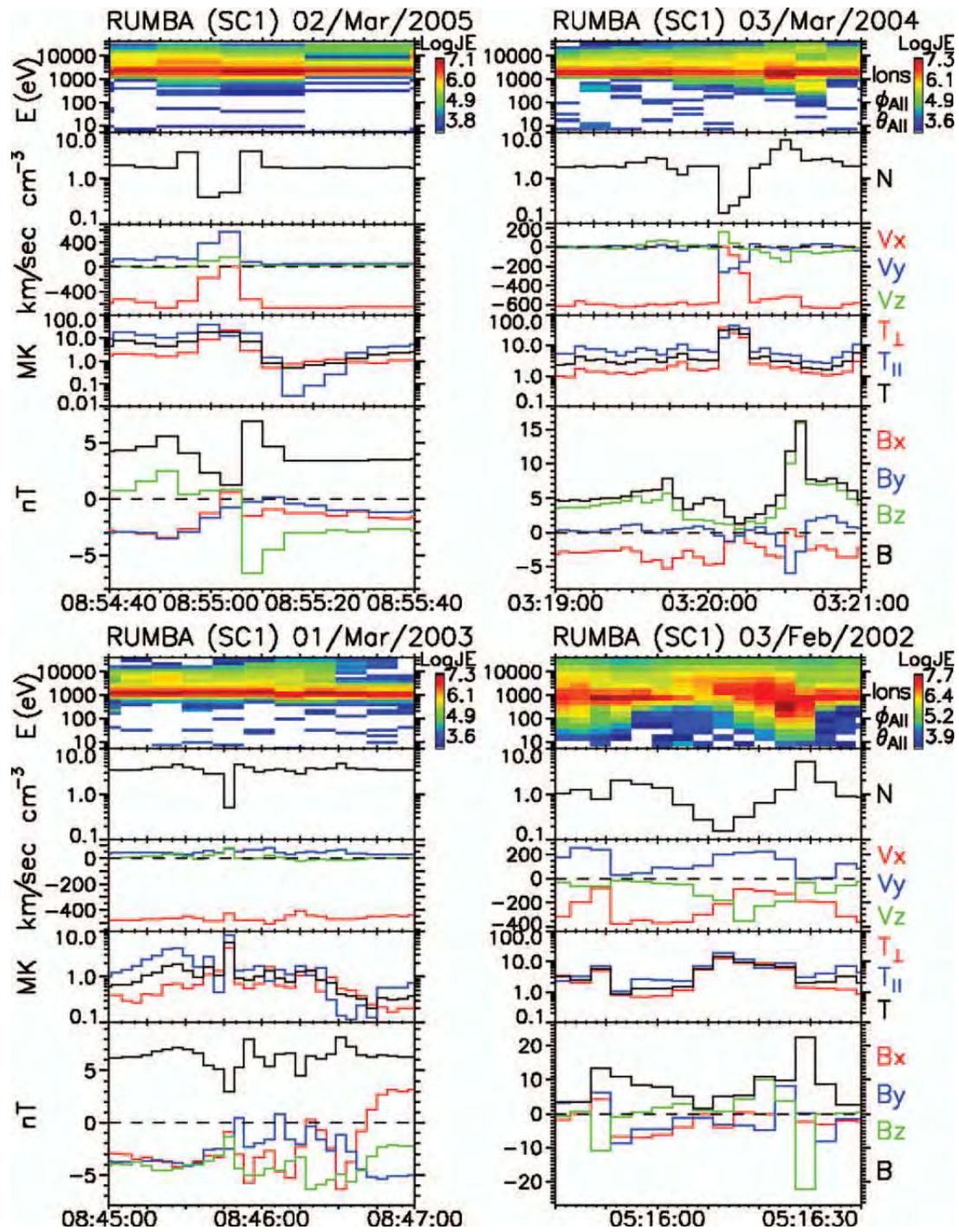


Figura 1.17: La Figura muestra ejemplos típicos de hoyos de densidad. Estas estructuras están acompañadas de hoyos magnéticos donde la intensidad del campo se reduce y en las orillas se incrementa de manera escalonada. La escala del campo es lineal mientras que la de la densidad es logarítmica. Todos los eventos muestran que la temperatura al interior del hoyo aumenta considerablemente, sea este profundo o superficial en el perfil de densidad. Tomada de Parks et al. (2006).

1.5. Estructuras en el antechoque

El haz de iones del viento solar que se observa reducido en los hoyos de densidad es parcialmente reemplazado en estos eventos por iones isotrópicos supertérmicos y en ocasiones se observan superaugmentos* en densidad e intensidad de campo magnético en los bordes de la estructura. Existe aumento en la actividad de ondas que incluyen un aumento en las ondas ión-ciclotrón y tipo *whistler* en el interior de los hoyos y cerca del mínimo en la densidad del evento se encuentran ondas electrostáticas intensas, Wilber et al. (2008).

La Figura 1.18 muestra un hoyo de densidad observado por Cluster alrededor de las 04:12:30 UT, los parámetros del plasma indican que en este periodo hubo una transición entre la región del choque cuasi-perpendicular a la región cuasi-paralela y en la que el viento solar tuvo una velocidad de aproximadamente 700 km/s. La temperatura al interior del hoyo aumenta por un factor de 10, lo que es comparable con lo observado para las AFC, sin embargo la desviación del flujo en este caso es pequeña. Los perfiles de campo y densidad así como el espectrograma muestran un comportamiento curioso pues del lado río arriba la transición es muy brusca mientras que río abajo el cambio es gradual. El espectrograma muestra que en la orilla río abajo el cambio gradual ocurre con una dispersión evidente de la energía de los iones, lo que sugiere un efecto de filtro en la velocidad. Wilber et al. (2008).

Los hoyos de densidad presentan desviaciones pequeñas en el flujo y están llenos de plasma caliente que presenta un aumento de densidad en las orillas y en ocasiones compresión del campo en uno o ambas orillas del evento además de electrones con energías de decenas de keV. Estas estructuras tienen duraciones similares a las de las estructuras magnéticas cortas de amplitud larga (SLAMS) y en ocasiones se observan cerca de estos eventos. Los SLAMS son pulsaciones magnéticas caracterizadas por grandes aumentos en la intensidad del campo magnético por al menos un factor de 2.5 veces el valor ambiente y su escala de tiempo es de unos 10 s, Schwartz et al. (1992). Sin embargo las duraciones de los hoyos y por tanto sus dimensiones, son mucho más pequeñas que las de las anomalías de flujo caliente y de las cavidades. Hasta el momento se piensa que los hoyos de densidad no tienen conexión alguna con otras estructuras del antechoque como las cavidades, las AFC y los hoyos magnéticos aislados (Turner et al. (1977)) que se observan en el viento solar en la heliosfera en regiones donde no hay un choque ni por tanto partículas

*Los superaugmentos son conocidos en la literatura con el término en inglés *overshoots*

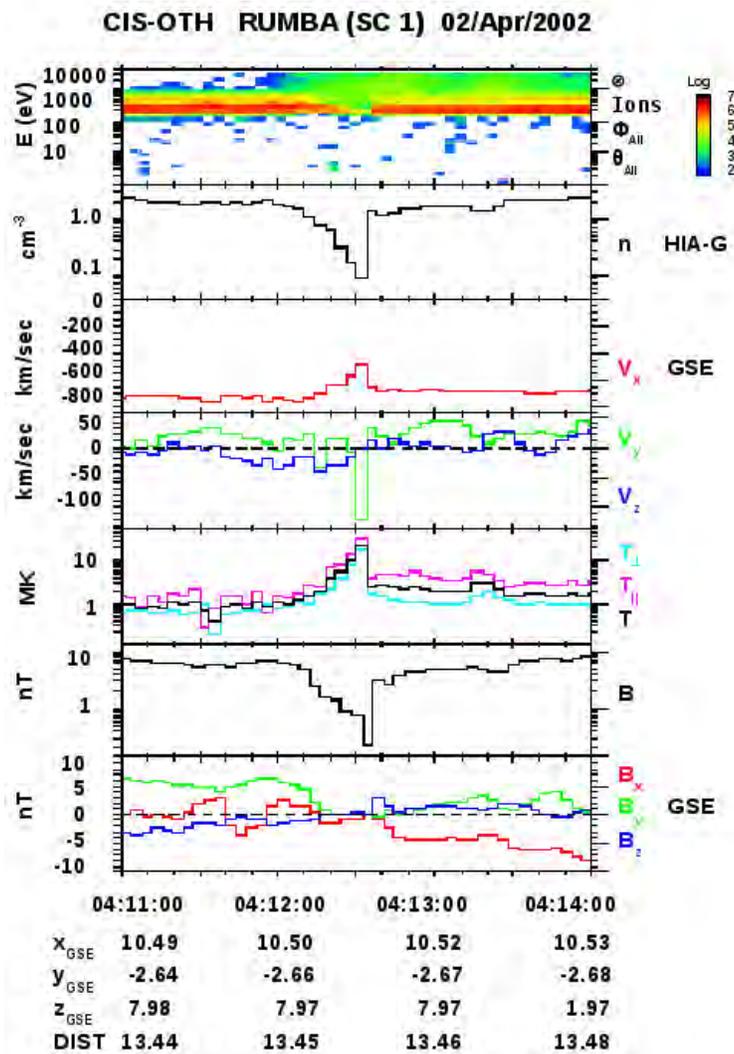


Figura 1.18: Hoyo de densidad observado el 2 de Abril del 2002 por Cluster. El panel superior muestra el flujo de energía de los iones, le siguen los paneles de densidad, componentes de la velocidad y temperatura de los instrumentos CIS-HIA, intensidad del campo magnético y sus componentes del magnetómetro FGM. Tomada de Wilber et al. (2008).

rebotadas asociadas; sin embargo es aún un tema abierto.

Hoyos Magnéticos Aislados en el viento solar

En la descripción de los hoyos de densidad mencionamos a los hoyos magnéticos como estructuras que ocurren de manera independiente y que no están siempre asociados a depresiones en la densidad del plasma. Cabe mencionar que los *hoyos magnéticos aislados* reportados por primera vez por Turner et al. (1977), los cuales no están asociados a cruces de hojas de corriente, ocurren en el viento solar a una tasa en la que pueden tener efectos en la difusión de partículas energéti-

1.5. Estructuras en el antechoque

cas. Si estas estructuras son ondas MHD aisladas o si surgen de una inestabilidad cinética como la del modo espejo* es aún una incógnita. De ser resultado de una inestabilidad tipo espejo los hoyos magnéticos deberían moverse con el plasma del viento solar mientras que si fueran ondas MHD entonces tendrían una velocidad de propagación finita en el sistema de referencia del viento solar.

Considerando lo anterior es claro que los hoyos de densidad que explicamos en la sección anterior (que son depresiones en densidad acompañados siempre de hoyos magnéticos) son estructuras presentes delante del choque de proa y se encuentran con mayor regularidad en regiones de viento solar quieto.

La Figura 1.19 muestra un conjunto de hoyos magnéticos reportados por Fränz et al. (2003). Las velocidades de estos hoyos es consistente con la necesaria para la convección del viento solar pero las incertidumbres en el tiempo originadas por la pequeña separación que en ese momento tenían las naves Cluster dificultó a los autores descartar totalmente la posibilidad de analizar si estas estructuras se movían a velocidades de ondas MHD.

Un análisis detallado de las distribuciones de iones y electrones requiere que los hoyos magnéticos tengan una duración mínima de alrededor de 30 s de manera que el tamaño de la estructura sea de algunos radios terrestres. Estos hoyos magnéticos deben ser estructuras grandes comparables con las escalas del viento solar. La teoría lineal de los modos tipo espejo sugiere que la tasa de crecimiento se maximiza a longitudes de onda perpendiculares del orden de $1 R_E$. Por otro lado, se observan hoyos magnéticos aislados preferentemente bajo condiciones de viento solar lento. El ejemplo de la Figura 1.19 cumple la condición para la tasa de máximo crecimiento. En este caso, Fränz et al. (2003) reportan que la firma más intensa del evento fue hallada en los datos de electrones que mostraron una depresión importante en la temperatura de los electrones y fluctuaciones en la densidad electrónica. La información de los iones no mostró ninguna anisotropía intensa en los protones tal como es de esperarse para el modo espejo, ni los aumentos de densidad o variaciones en la velocidad esperadas para un solitón MHD sugiriendo que los hoyos magnéticos son vistos en su estado no-lineal y que los electrones pueden jugar un papel importante en la generación de estos eventos.

*La inestabilidad tipo espejo es un modo que no se propaga, generado bajo condiciones de altas β del plasma y una temperatura anisotrópica de protones donde $T_{\parallel} > T_{\perp}$

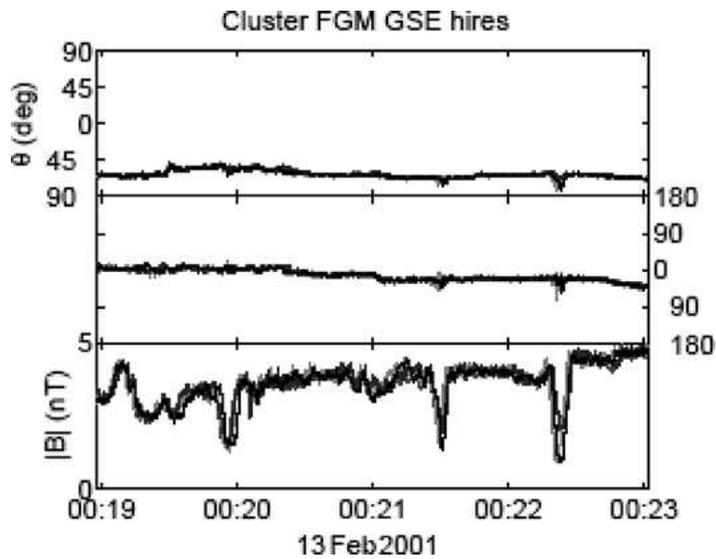


Figura 1.19: La Figura muestra el primer conjunto de ondas solitarias lineales observadas por Cluster río arriba del choque de proa de la Tierra a $19.5R_E$ el 13 de Febrero del 2001. Los paneles muestran (de arriba a abajo) los ángulos polar y azimutal para el campo magnético en coordenadas GSE y la magnitud del campo con una resolución de 22 vect/s para las cuatro naves (que se observan en tonos de grises). La extensión de las estructuras en la escala temporal es de unos 10 s que corresponde a un tamaño de 5000 km a una velocidad del viento solar de 450 km/s. Tomada de Fränz et al. (2003).

1.5.5. Frontera entre iones intermedios/giratorios e iones alineados al campo

Como se mencionó en la sección 1.4.1 las distintas distribuciones de iones en el antechoque ocupan regiones específicas, en principio se establecieron las regiones que ocupaban los IAC, los iones intermedios y los difusos; (Gosling et al., 1978; Paschman et al., 1979, 1981). Trabajos posteriores a dicho resultado mostraron que muchas de las distribuciones de iones que se pensaban correspondían a una distribución intermedia resultaron ser una distribución de iones giratorios, los cuales se encontraron en asociación con ondas cuasi-monocromáticas de frecuencia ultrabaja, Fuselier et al. (1986).

Los iones giratorios pueden ser producidos en el choque de proa por reflexión especular de iones del viento solar en regiones cuasi-paralelas; sin embargo las observaciones de éstas distribuciones en regiones lejanas al choque sugirieron que tales iones no se originan sólo por reflexión especular sino que también existe un mecanismo de producción local en regiones distantes del antechoque. Uno de los mecanismos sugeridos, y el más aceptado, es que las ondas electromagnéticas producidas por la propagación de IAC a través del viento solar, se desplazan río

1.5. Estructuras en el antechoque

abajo y entonces son atrapados iones durante el crecimiento inicial de las ondas produciendo así los iones giratorios, Mazelle et al. (2003).

Los haces de IAC y las distribuciones de iones giratorios no han sido observadas simultáneamente lo que sugirió la existencia de una frontera espacial entre las dos poblaciones como mencionamos anteriormente, ver sección 1.4.1.

Las transiciones entre diferentes regiones del antechoque se asocian frecuentemente a rotaciones en el campo magnético interplanetario. En general, estas transiciones son rápidas y por tanto resultan difíciles de analizar. Recientemente Meziane et al. (2004a) presentó observaciones de Cluster para una transición lenta entre la región de iones IAC y la región de iones giratorios permitiendo un estudio más detallado de la frontera antes sugerida. La Figura 1.20 muestra observaciones registradas el 03 de Febrero del 2001 por Cluster 1. El panel superior muestra un espectrograma de energía para los protones medido por el instrumento CODIF con una resolución de 12 s y en el que se excluye el haz del viento solar. Durante las 21:08:00-21:09:07 UT se estrechó a la región de 1-8 keV, siendo estos protones aquellos que se alejan del antechoque. Posteriormente a las 21:09:07 UT aparecen protones con energías entre 10 y 30 keV por alrededor de dos minutos. Durante este lapso la energía inferior límite de la componente de 10-30 keV disminuyó hasta que las dos componentes se fusionaron en un pico más amplio. Los siguientes tres paneles (hacia abajo) de la Figura muestran densidad y componentes de la velocidad del instrumento CIS con una resolución de 4 s. La primera permaneció casi constante (4.5 cm^{-3}) hasta las 21:11:15 UT donde la densidad aumentó en un 20% por alrededor de un 90 s, a lo que le siguió una disminución del parámetro (3.5 cm^{-3}) con oscilaciones cuasi-periódicas de gran amplitud de unos 40 s de duración. Casi al mismo tiempo la velocidad también sufrió cambios y se observaron pequeñas perturbaciones. Finalmente el panel inferior muestra los vectores del campo magnético del FGM también con 4 s de resolución. El campo también permanece estacionario hasta las 21:11:15 UT y después muestra modulaciones con una gran amplitud ($\delta B/B$) y duración de aproximadamente 40 s.

La Figura 1.21 muestra los espectros de energía de los iones rebotados medidos en intervalos de tiempos sucesivos por Cluster 1 CIS/CODIF durante 3 minutos el 3 de Febrero del 2001. El espectro inicial de energía de protones tomado a las 21:09:05-09:17 UT (curva negra discontinua) muestra la existencia de una sola componente con una energía tope de $\sim 8 \text{ keV}$. En el siguiente espectro (curva roja) aparece un pico secundario en el rango de energía 10-30 keV. El haz principal gradualmente

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

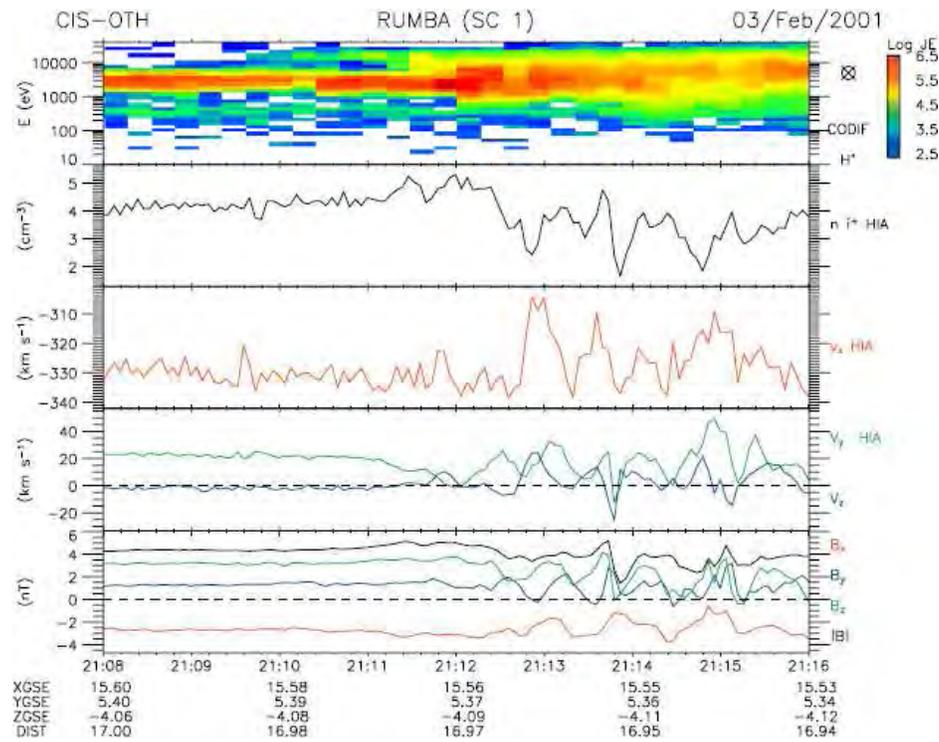


Figura 1.20: Los paneles de la gráfica indican, de arriba a abajo: espectrograma de protones obtenido de Cluster 1, densidad y velocidad del viento solar y las tres componentes del CMI en el sistema GSE. Tomado de Meziane et al. (2004a).

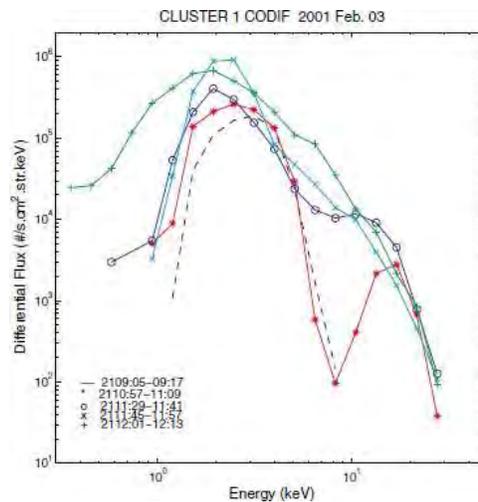


Figura 1.21: Espectro de energía de los iones rebotados usando datos del instrumento CIS-CODIF de Cluster 1. La curva discontinua negra muestra el espectro de energía de protones inicial entre las 21:09:05-09:17 UT el 3 de Febrero del 2001; esta curva indica la existencia de una sola componente de iones correspondiente a una distribución IAC. En los siguientes espectros (curvas negra, roja, azul, morada y verde) aparece un pico secundario que después se fusiona con el haz principal haciendo una sola población hacia las 21:12:01-12:13 UT. La distribución final es giratoria. Tomado de Meziane et al. (2004a).

1.5. Estructuras en el antechoque

se ensancha y a la par hay un ligero corrimiento hacia una menor energía mientras el pico del haz secundario se mueve hasta ~ 10 keV. Estas tres primeras curvas de la Figura muestran un ensanchamiento gradual del pico de baja energía con el flujo máximo cambiando ligeramente hacia menores energías. Ya hacia las 21:12:02-12:13 UT el espectro se asocia a una sola población más caliente. En su trabajo los autores reportan las funciones de distribución de las partículas indicando que el primer espectro en tiempo corresponde a un haz de iones alineados al campo con una velocidad de 860 km/s. El haz secundario y la distribución final están asociados con distribuciones de iones giratorios. En el evento reportado se observan simultáneamente poblaciones de IAC y iones giratorios diferenciados por una pequeña región de compresión a la que se identifica como la *frontera IAC/intermedios*, además de que dicha frontera se observa en los espectros de energía también se observa como rotaciones en las componentes del CMI (como era de esperarse para una región de transición), en particular los autores reportan que la rotación más importante se presenta en la componente z. Se calcula la longitud de esta frontera como la distancia entre los centros guía de cada población de iones y resulta ser ≤ 1 giroradio. Durante este tiempo el ángulo de cono entre el CMI y el vector velocidad del viento solar fue de $\sim 45^\circ$ y la nave se conectó con el choque de proa a una geometría oblicua, $\theta_{Bn} \sim 50^\circ$.

Los iones giratorios comienzan a aparecer primero a energías altas, lo que ha sido interpretado como un efecto de detección, Figura 1.22. Cuando los haces IAC son observados por la nave en el punto S , los iones giratorios se encuentran justo río abajo de la región de detección de iones IAC. Los iones giratorios de mayor energía son detectados primero debido a que tienen un mayor radio de giro, después son detectados iones de menor energía y se pueden detectar simultáneamente distintos canales de energía porque la nave permanece un cierto tiempo en los alrededores de la frontera.

Las velocidades de transmisión calculadas de las distribuciones IAC se encontraron incompatibles con las predicciones de los mecanismos de emisión de la corriente relacionada al choque. Además las propiedades detalladas de los iones giratorios tampoco concordaron con los esperados debido a los mecanismos de producción en el choque considerados, lo que sugiere que pueden haber sido producidos localmente. Sin embargo, Meziane et al. (2004a), reportó que la frontera entre los dos tipos de iones rebotados hizo un ángulo de 77° con la línea Sol-Tierra, lo que checó con las predicciones teóricas y además coincidió con la ubicación

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

esperada de la frontera FUB del antechoque. Cabe mencionar que en otros trabajos de los mismos autores se establece que ésta nueva frontera no siempre coincide con la frontera FUB del antechoque. Se observó que aunque las propiedades geométricas de esta frontera entre las dos poblaciones de iones da lugar a fuertes restricciones en el mecanismo de producción, se requiere de un mayor trabajo a futuro para conocer detalladamente las propiedades de las distribuciones de iones rebotados.

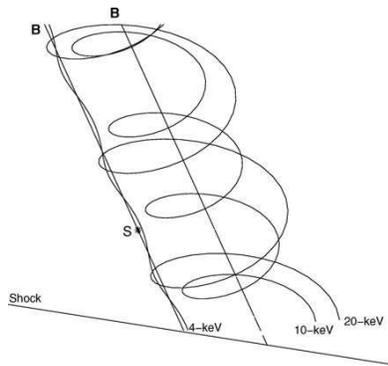


Figura 1.22: Interpretación del espectro de energía mostrado en la Figura 1.21 donde inicialmente se observa una distribución de iones alineados al campo. Conforme la nave se mueve lentamente en relación a la frontera primero se detectan los iones giratorios más energéticos. La observación simultánea es posible porque la nave permanece en la vecindad de la frontera por algún tiempo; la frontera en sí es repentina y fuerte, del orden de 1 radio de giro de espesor. Tomado de Meziane et al. (2004a).

1.5.6. Resumen de estructuras en el antechoque

En la sección anterior hemos presentado la variedad de estructuras que encontramos en el antechoque terrestre y que han sido objeto de estudio desde las primeras observaciones *in situ*. En la siguiente sección describimos a detalle la Frontera Compresiva del Antechoque, esta estructura recientemente descubierta comparte ciertas características de sus perfiles observacionales con los eventos explicados previamente. Antes de continuar con este capítulo vale la pena resumir lo desarrollado en la sección anterior y entonces enlistar de manera breve los eventos que antes explicamos:

Anomalías de flujo caliente: Estas depresiones de campo y densidad tienen grandes amplitudes en el campo y se encuentran llenas de partículas isotrópicas con temperaturas superiores a las del viento solar. La desviación que sufre el plasma es significativa; su duración es de algunos minutos lo que le permite tener

1.5. Estructuras en el antechoque

una longitud de algunos radios terrestres. Su formación se debe a la interacción entre hojas de corriente y el choque de proa. (Schwartz et al., 1985; Lucek et al., 2004b).

Cavidades: También se observa como una depresión del campo magnético y la densidad con iones a mayor temperatura que los iones del viento solar ambiente. Su formación se debe a la conexión de líneas del CMI con la región cuasi-paralela del choque que produce diferencias de presión dando por resultado la excavación de una cavidad. Los flujos no son muy diferentes de los del viento solar, la temperatura y la presión del plasma al interior de la cavidad es ligeramente mayor que en el plasma ambiente. Se parecen a las AFC pero en estos eventos no existe gran desviación del flujo. Se distinguen de las AFC analizando la temperatura y la velocidad del flujo, si los cambios en la temperatura son muy marcados o si la magnitud de la velocidad del flujo al interior del evento supera el 20% del valor de la velocidad del viento solar los eventos serán considerados como AFC. (Sibeck et al., 2001, 2002; Schwartz et al., 2006a; Billingham et al., 2008).

Cavitones: Son generados por la interacción no lineal de ondas ROL y ondas transversales presentes en el antechoque terrestre. Se diferencian de las cavidades pues se encuentran inmersos en regiones de ondas de FUB. Las depresiones en campo y densidad se encuentran correlacionadas y sus amplitudes son similares. La duración de los eventos típica es menor a 30 s y la amplitud promedio con la que el campo y la densidad disminuyen es de un 40%. La temperatura al interior de los cavitones alcanza hasta 10 veces el valor ambiente. Pueden observarse por grupos y además un cavitón puede tener un perfil que indique que al interior se encontraba uno o más eventos del mismo tipo que se fusionen. (Blanco-Cano et al., 2009; Blanco-Cano et al., 2010; Kajdič et al., 2010).

Hoyos de densidad: Estructuras con depresiones en la densidad y en el campo, las disminuciones en la densidad son las más marcadas. Su tamaño es del orden de algunos radios de giro de iones y su perfil incluye caídas de densidad en el centro y aumentos en las orillas. (Parks et al., 2006, 2008).

Frontera de iones giratorios y IAC: Esta frontera representa una transición entre la región de IAC y la región de iones giratorios que permean el antechoque. Su perfil observacional también muestra una zona de compresión en la densi-

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

dad y en la intensidad del campo magnético. (Mazelle et al., 2003; Meziane y d'Uston, 1998; Meziane et al., 2004a).

El Cuadro 1.1 indica el estado de investigación en el que se encuentran las estructuras que se explicaron y cuya firma es de nuestro interés. Se indica cual es la duración y longitud aproximada que se ha reportado, la amplitud en densidad y magnitud del campo magnético, el comportamiento de la velocidad al interior de la estructura así como la temperatura al interior. Tanto el sobreauento como los hombros se refieren a si existe compresión del campo magnético en las orillas de la estructura siendo esta compresión muy grande (sobreauento) o poco marcada (hombros). Algo importante es saber si la estructura presenta una estructura tipo choque bajo alguna circunstancia y si la existencia de la estructura es o no frecuente. La existencia de un campo eléctrico sólo es reportado en dos tipos de estructuras. También se investiga si se ha reportado la existencia de ondas y en caso afirmativo cuáles son los modos presentes, la presencia de iones rebotados en el antechoque y si la firma de la estructura se observa en los datos correspondientes a electrones. Por último se reporta lo referente a la presencia de corrientes dentro de la estructura.

	AFC	CA	Cavitones	HD	IG-IAC
Duración	~min	90-180 s	< 30s	~18s	~ segs
Longitud	~ R_E	~ $8R_E$	~ $10^2 c/\omega_p$	~ R_L	~ $1R_L$
$\delta n/n$	< 0.2	~ 0.6	~ 0.4	0.7	~ $2n_{sw}$
$\delta B/B$	-	~ 0.6	~ 0.40	0.2-0.5	-
Velocidad	$V_x \rightarrow -100$	~ V_{sw}	~ V_{sw}	$V_x \rightarrow \sim 0$	-
Temperatura	~ 10^7	> 10^5	~ $10T_{sw}$	> 10^7	-
Sobreauento	sí	no	no	sí	-
Hombros	sí	sí	sí	-	sí
¿Choque?	sí	no	no	sí	-
Ocurrencia	rara	frec	frec	frec	frec
Campo \vec{E}	-	-	-	sí	-
Ondas	-	no	sí *	sí**	sí *
Iones Rebot.	sí	sí	sí	sí	sí
Electrones	sí	-	-	sí	sí
Corrientes, \vec{J}	-	-	-	sí	-

* Ondas FUB

** Ondas lón-Ciclotrón, *Whistlers* y Electrostáticas

** El símbolo (-) implica que no hay reportes al respecto

Cuadro 1.1: Actual estado de investigación de las estructuras que se describieron en la sección anterior, se reportan las diferencias y semejanzas entre las firmas de los distintos eventos.

1.6. Fronteras compresivas del antechoque

Como se mencionó en la Sección 1.4.1 se han identificado tres fronteras asociadas al antechoque de iones pero la mayoría de la literatura al respecto describe solamente dos de ellas: la frontera de iones y la frontera de ondas FUB. La frontera de iones separa los haces de iones alineados al campo que han sido rebotados en el choque de la región donde existe plasma del viento solar puro. La frontera de ondas FUB separa la región donde se forman y crecen estas ondas de la región donde sólo encontramos iones rebotados, esta frontera se encuentra al interior de la frontera de iones y en ella coexisten ondas FUB y iones. En la Figura 1.23 se muestran los resultados de una simulación para una configuración radial del CMI ($\theta_{BV} = 0^\circ$, con $B_x > 0$) con el punto subsolar en $D_p = 64c/\omega_p$, Blanco-Cano et.al. (2009). Recuerde que el ángulo de cono o θ_{BV} es el ángulo entre los vectores de campo magnético y velocidad del viento solar. Por otro lado el punto subsolar es el punto donde el flujo del viento solar deja de ser supersónico convirtiéndose entonces en un flujo subsónico, este punto subsolar coincide con la nariz del choque de proa. En la gráfica se observa la componente z del campo magnético normalizada al valor correspondiente del viento solar ambiente y su escala se fijó en ± 1 para mostrar las ondas río arriba. El choque cuasi-paralelo y el antechoque se forman frente al lado día de la magnetofunda y el plasma que se ha desplazado hacia esta región se encuentra muy perturbado; el choque cuasi-perpendicular se forma en los flancos del choque. La región río arriba está permeada por ondas FUB y es posible ver que el antechoque de iones ocupa una región más extendida que la región permeada por ondas. Resultados similares se encontraron para el caso donde $\theta_{BV} = 45^\circ$, donde simulaciones -Blanco-Cano et al. (2006)- y observaciones -Le y Rusell (1992), Meziane y d'Uston (1998)- han mostrado que las ondas necesitan un cierto tiempo para crecer y ser observables lo que resulta en una frontera de ondas río abajo de la frontera de iones supertérmicos.

En un estudio reciente sobre cavidades, Sibeck et al. (2008) notaron en simulaciones híbridas de la magnetósfera terrestre para geometrías radiales la presencia de una frontera a un lado del antechoque que estaba asociada con incrementos en la intensidad del campo magnético, densidad y temperatura. Las condiciones del plasma y del campo magnético a un lado de la frontera correspondían a viento solar puro y al otro lado de la frontera a la región del antechoque de iones. Aunque esta frontera se conoció en ese trabajo como *frontera del antechoque*,

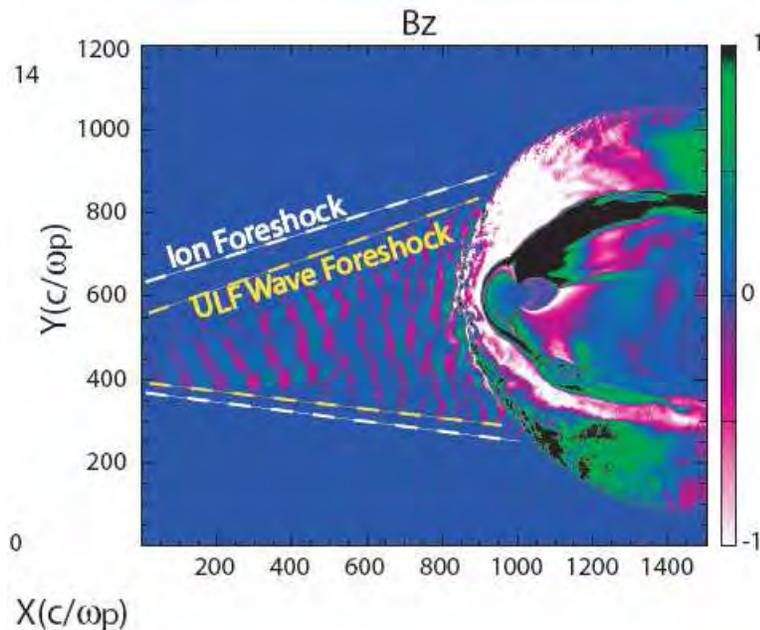


Figura 1.23: Valores de la componente z del campo magnético en simulaciones híbridas que muestra las extensiones del antechoque de iones y de la región poblada por ondas, que resultan ser distintas. Tomado de Blanco-Cano et.al. (2009).

posteriormente se acuñó el término de *frontera compresiva del antechoque* (FCA) pues describe mejor a la estructura, Omidi et al. (2009). Considerando ahora esta FCA los autores reinterpretaron las cavidades del antechoque como cruces de esta nueva frontera con las naves debido al movimiento constante de la frontera y estos cruces se manifiestan justamente como los perfiles de CA que se habían estado estudiando.

Recientemente resultados de simulaciones globales híbridas de la interacción del viento solar con la magnetósfera terrestre publicadas por Omidi et al. (2009) revelaron la existencia de la FCA. Esta nueva estructura presente en las orillas del antechoque representa una región de transición que separa el plasma del viento solar del plasma del antechoque y está asociada con la compresión de la magnitud del campo magnético y la densidad. Rodeando las regiones de compresión del campo magnético y densidad la frontera compresiva también se encuentra una región donde las intensidades de estos dos parámetros disminuyen por debajo de los valores del viento solar ambiente. Las simulaciones han mostrado que la formación e intensidad de estas fronteras dependen de la generación y evolución no-lineal de ondas de Frecuencia Ultra Baja, las cuales a su vez han sido producidas

1.6. Fronteras compresivas del antechoque

por la interacción de iones reflejados en el choque de proa con el viento solar. En el trabajo citado se estudia para qué condiciones del viento solar existen las FCA y cómo los cambios en las condiciones del viento solar modifican su estructura. Con este objetivo analizan la dependencia entre la formación de las FCA y el Número de Mach, en el caso donde el CMI tiene una configuración radial; y luego analizan para qué ángulos de cono del CMI se forman las fronteras compresivas.

A continuación describiremos con más detalle los resultados de Omidi et al. (2009) pues es el único trabajo teórico que existe al respecto de esta nueva estructura.

1.6.1. Modelo de simulación híbrido

Las simulaciones generadas se basan en un código híbrido electromagnético en 2.5-D (2-D en el espacio y 3-D en campos electromagnéticos y corrientes) que considera a los iones como macropartículas que pueden consistir de una o varias especies, dependiendo por ejemplo de su diferente masa o carga, mientras que los electrones son tratados como un fluido neutro y sin masa.

Es conveniente hablar del modelo híbrido global y lo haremos brevemente, un estudio detallado se encuentra en Omidi et al. (2005). La simulación global se encuentra en el plano xy con x en la línea Sol-Tierra. Las dimensiones de la caja simuladora son de 1500 y 1200 c/ω_p en las direcciones x y y respectivamente. Cada celda tiene un tamaño de 1 c/ω_p y el número de partículas por celda es de 15 para el plasma del viento solar. Los β para electrones y iones tienen un valor de 0.5. Las líneas del CMI también están en el plano xy y hacen un ángulo θ con la dirección x (ángulo de cono). Este ángulo de cono está restringido a valores entre 0 y 40° que corresponden a CMI radiales y cuasi-paralelos; esta variación del ángulo θ_{Bv} permite la formación de la FCA a uno o ambos lados del antechoque, siendo esto último útil al estudiar la simetría de esta nueva estructura. El flujo del viento solar es inyectado en la dirección x desde la izquierda de la caja de simulación y se consideran velocidades correspondientes a entre 6 y 15 M_A . El obstáculo usado para el flujo del viento solar puede ser un dipolo magnético o bien una superficie circular reflejante. En la Figura 1.24 se ilustra una caja típica usada en estas simulaciones híbridas.

Cabe destacar que el tamaño del choque de proa simulado es más pequeño que el choque de proa terrestre, de hecho es comparable con el choque de Mer-

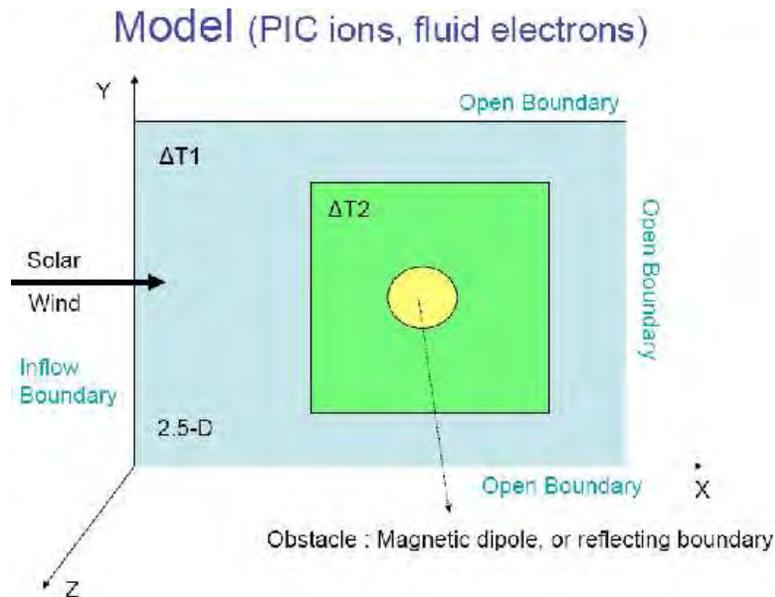


Figura 1.24: En la imagen se ejemplifica la caja usada en las simulaciones híbridas. El plasma del viento solar es inyectado desde el lado izquierdo de la caja y se encuentra con el choque formado por un obstáculo, que en este caso es un dipolo magnético. El haz del viento solar se encuentra a una temperatura ΔT_1 y corresponde a la zona en azul claro. La zona en color verde es la región del plasma que es dominado por el dipolo, para fines prácticos sería la magnetósfera asociada al obstáculo, en donde la temperatura del plasma es ΔT_2 . Imagen proporcionada por N.Omidi.

curio; sin embargo, esta diferencia de escala no altera los resultados que se esperan obtener pues tanto el choque de proa como el antechoque de iones no son sensibles a los tamaños del sistema siempre que estos sean mayores que las escalas donde existen efectos cinéticos, Blanco-Cano et al. (2004).

En el trabajo citado también se usa una simulación local para la densidad, velocidad y temperatura del plasma del viento solar. El plano de la simulación se encuentra en las direcciones xy con condiciones de frontera periódicas en la dirección x y en la y son no periódicas. La caja de la simulación tiene un tamaño de 500 y 800 c/ω_p en las direcciones x y y , respectivamente, cada celda tiene el mismo tamaño que en el código global y también se usan 15 partículas por cada celda representando los protones del viento solar. Nuevamente el viento solar es inyectado desde la izquierda y los iones rebotados están presentes a lo largo de toda la dirección x pero se encuentran confinados en la dirección vertical: $200 \leq y \leq 600$. Esto permite que la formación de la FCA ocurra en la interfaz entre el viento solar puro y el viento solar perturbado por el antechoque que incluye iones rebotados. Los iones rebotados tienen la misma velocidad que el viento solar pero se mueven de derecha a

1.6. Fronteras compresivas del anteochoque

izquierda en la caja. Se consideran densidades de los haces rebotados de entre 1 % y 2.5% del viento solar, velocidades entre 10 y 30 veces la velocidad de Alfvén (V_A) en el viento solar y temperaturas de entre 2 y 20 veces las consideradas para los protones del viento solar.

1.6.2. Resultados

Dependencia de las FCA respecto al Número de Mach

Para examinar esta dependencia se usaron simulaciones híbridas globales con un CMI radial, Omidi et al. (2009). La Figura 1.25 muestra la intensidad del campo magnético (B) y la densidad (N) para cuatro corridas con velocidades del viento solar de 6,8,10 y 15 veces V_A . Los valores de B y N están normalizados a los valores ambientes y para facilitar la comparación entre estos parámetros se ha fijado la escala de 0 a 7.5. Los aumentos del campo y la densidad son claros en la simulación y son señalados por flechas, estos incrementos están correlacionados indicando que la FCA se encuentra en un modo magnetosónico rápido.

De la Figura 1.25 es evidente que al aumentar la velocidad del flujo la frontera compresiva se vuelve más intensa, es decir, los incrementos en campo y densidad se hacen más grandes. Al interior del anteochoque se observan oscilaciones de B y N que están asociadas con el crecimiento y evolución no-lineal de ondas de Frecuencia Ultra Baja y que de acuerdo a Omidi et al. (2007) y Blanco-Cano et al. (2009) son cavitones. En esta Figura también se nota que los decrementos de campo y densidad asociados a los cavitones adquieren una mayor amplitud al aumentar M_A . Esto muestra que a escala global las estructuras al interior del anteochoque están asociadas con regiones más grandes donde B y N sufren aumentos y decrementos al incrementarse la velocidad del flujo del viento solar, es decir, las estructuras se vuelven más intensas.

Para analizar cómo cambian la frontera compresiva y las propiedades del anteochoque en función del Número de Mach consideraremos la Figura 1.26. Las gráficas se produjeron al tomar cortes transversales de las cuatro corridas previas para las cuales se graficaron densidad (N), temperatura (T), componentes de la velocidad del viento solar (V_x y V_y) e intensidad del campo magnético (B). Al observar los gráficos de color y los perfiles notamos que el corte considerado corresponde a una trayectoria a lo largo de la cual se cruzó completamente el anteochoque, por lo que se observan dos FCA correspondientes a cada uno de los costados del anteochoque.

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

En el perfil obtenido para $M_A = 6$, Figura 1.26 (arriba-izquierda), los cambios en densidad y campo están correlacionados y aunque las firmas de las fronteras compresivas no son idénticas, en promedio la intensidad de ambas es comparable. El aumento generado en la temperatura río arriba de la FCA se debe a la presencia de iones rebotados lo que sugiere que la FCA no coincide siempre con la frontera del antechoque de iones. Como tal, la FCA no es una frontera entre las regiones cuasi-paralela y cuasi-perpendicular del choque de proa sino que más bien es una frontera entre el viento solar altamente perturbado (principalmente por las interacciones entre ondas y partículas en el antechoque) y el viento solar sin perturbar, el cual puede incluir iones rebotados. La presencia de iones rebotados río arriba de la frontera compresiva provoca que la velocidad del flujo sufra una disminución a lo largo de la dirección radial (V_x) mientras que el mayor cambio de la velocidad, que es en la componente y , está asociado con la FCA y corresponde al flujo que se aleja de la dirección de la línea Sol-Tierra.

Las FCA formadas para un $M_A = 8$ resultan ser más intensas y empinadas, Figura 1.26 (arriba-derecha), también existe disminución en la velocidad del flujo pero en este caso los decrementos más grandes se observan justo en la FCA. Después de ésta disminución en la velocidad del flujo, la velocidad comienza a aumentar, entonces mientras que a bajos números de Mach la FCA corresponde a un pulso de una onda magnetosónica rápida para $M_A \geq 8$ la frontera tiene un comportamiento tipo choque. En virtud de que la FCA participa en el desvío del flujo alrededor del obstáculo magnetosférico podemos decir que la frontera compresiva es una extensión del choque de proa; esto particularmente para M_A grandes donde el perfil del campo magnético y la densidad muestra variaciones comparables con las que ocurren en el choque de proa.

Impacto de las propiedades de los iones sobre la FCA

La dependencia de las FCA respecto al Número de Mach está ligado finalmente a las propiedades de los haces de iones rebotados y su interacción con el viento solar. Los autores utilizan el modelo híbrido local descrito previamente para simular esta interacción; en el modelo el viento solar se mueve de izquierda a derecha mientras que los iones alineados al campo se mueven en dirección opuesta, las magnitudes de las velocidades de ambos flujos son iguales lo que permite simular la reflexión especular que ocurre en el choque de proa. Los resultados reportados consideran

1.6. Fronteras compresivas del antechoque

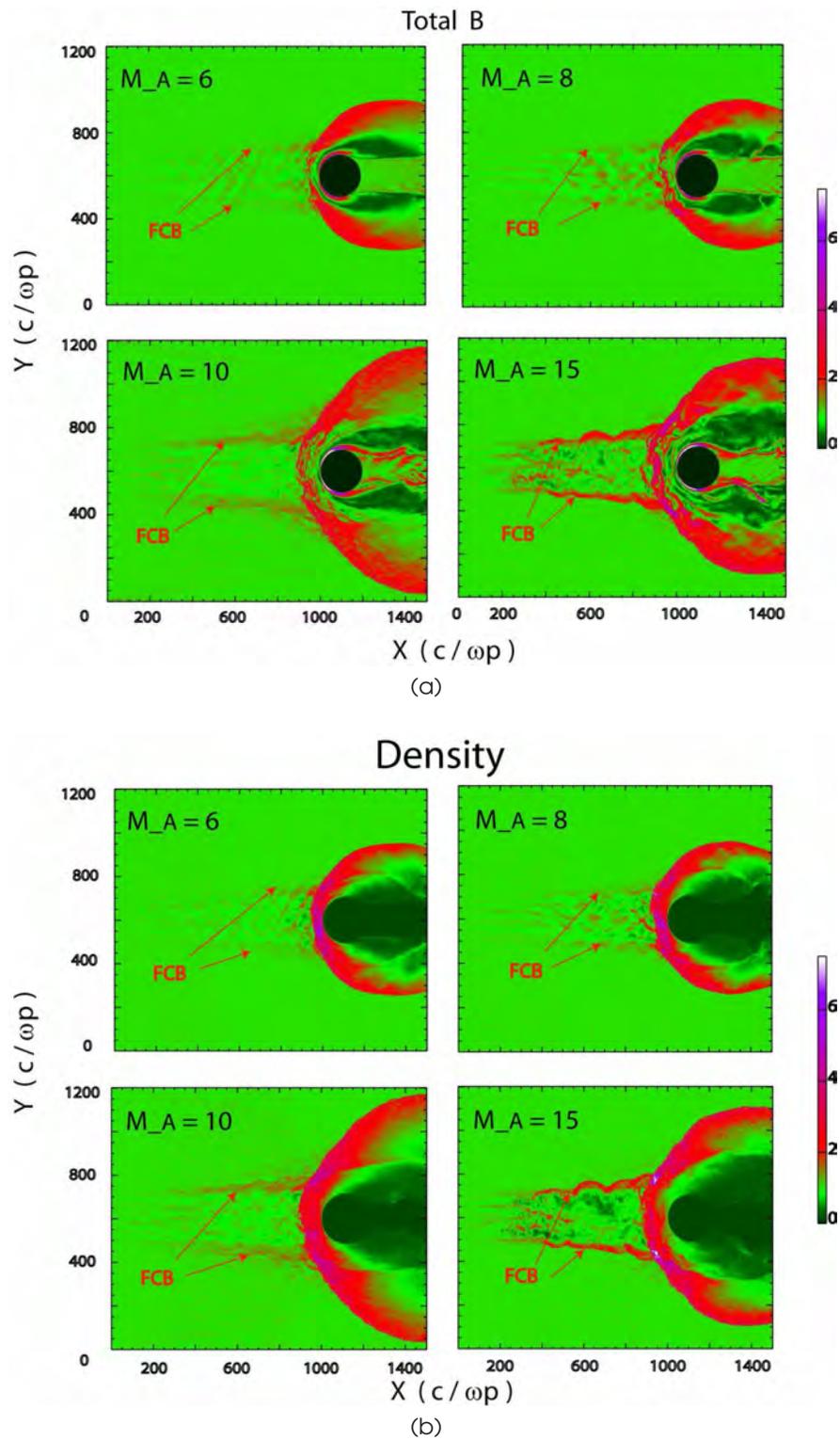


Figura 1.25: Gráficas de intensidad de campo magnético (a) y densidad (b) para cuatro corridas con diferente Número de Mach. En ambas gráficas se puede observar que la FCA se intensifica al aumentar M_A . Tomada de Omidi et al. (2009).

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

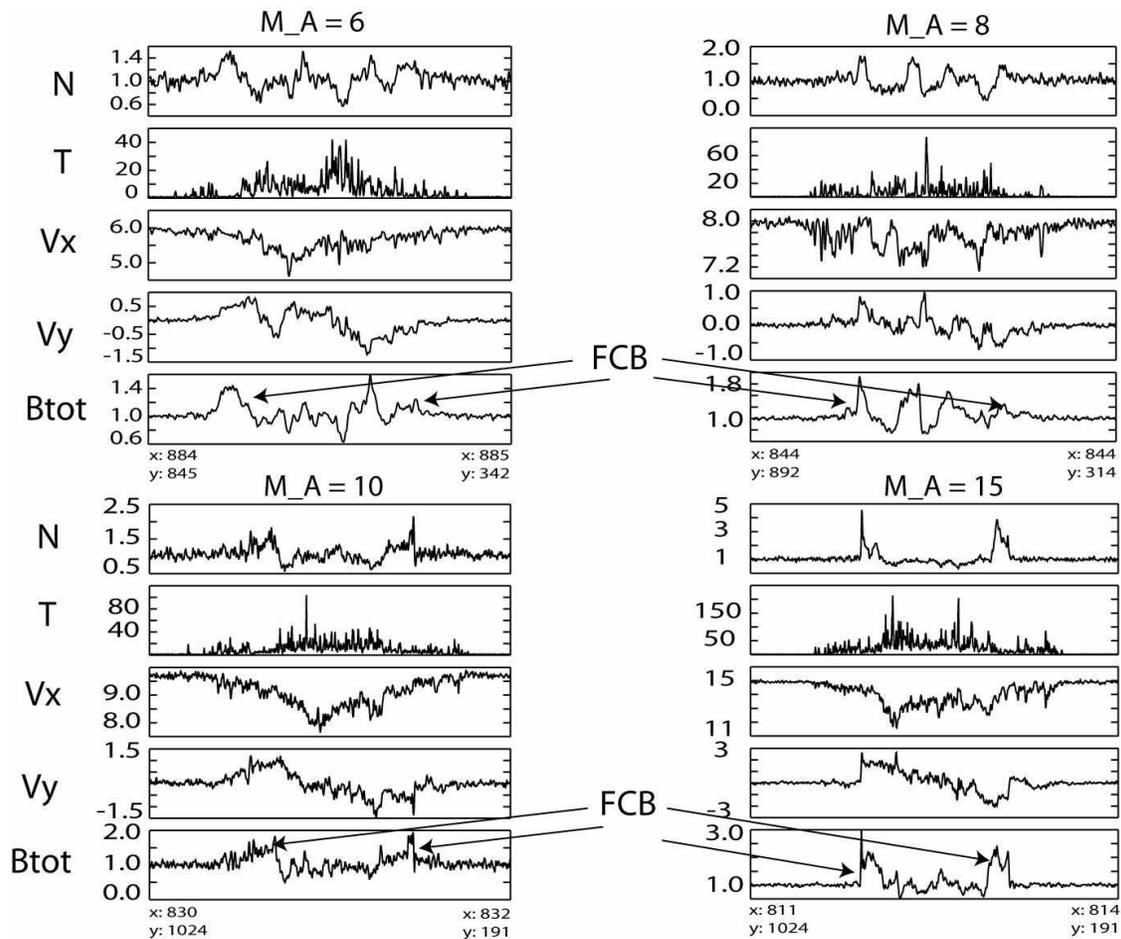


Figura 1.26: Cortes transversales de simulaciones híbridas globales para densidad, temperatura de iones, velocidad del flujo en las direcciones x y y y campo magnético para las cuatro corridas con diferente Número de Mach Alfvénico. Al pie de cada gráfica se indica las coordenadas de inicio y término de cada corte que se tomó de la simulación, la trayectoria correspondiente es una línea recta. Tomada de Omidi et al. (2009).

1.6. Fronteras compresivas del antechoque

temperaturas de 20 veces la temperatura del viento solar pues no se encontraron diferencias importantes en las simulaciones para haces con temperaturas entre 2 y 20 veces la temperatura del viento solar.

La Figura 1.27 muestra la densidad y campo magnético total de tres corridas en donde los iones rebotados tienen densidades del 1% de la densidad del viento solar y velocidades de 10, 20 y 30 V_A relativas al viento solar, lo que corresponde a números de Mach de 5, 10 y 15 respectivamente. Para estas velocidades es posible que ocurran diversas inestabilidades resonantes y no-resonantes en el plasma asociadas con una tasa máxima de crecimiento a lo largo del campo magnético. Los autores encontraron teóricamente que debían estar presentes ondas con propagación paralela y además ondas magnetosónicas rápidas con propagación oblicua que son inestables con tasas de crecimiento comparables a las tasas de las ondas con propagación paralela. Estas ondas no son más que las ondas magnetosónicas rápidas, altamente oblicuas y linealmente polarizadas (ROL) observadas en la simulación.

En la Figura 1.27(a) se observan aumentos en la densidad y el campo magnético en la interfaz entre el viento solar puro y el viento solar que incluye iones rebotados. Tal como para la FCA, estos aumentos están correlacionados indicando un modo magnetosónico rápido. Las intensidades de los saltos en N y B de alrededor del 20% de los valores ambientes son consistentes con lo esperado para un choque con $M_A = 5$. Al aumentar la velocidad del haz a 20 V_A la FCA se muestra mucho más intensa con saltos de entre 40%-50% de los valores ambientes, Figura 1.27(b). La Figura 1.27(c) muestra que la FCA formada para un haz con velocidad de 30 V_A tiene saltos de 100% o más de los valores ambientes. De estas figuras es claro entonces que aumentar la velocidad del haz de iones conduce a una FCA más fuerte.

La Figura 1.27(d) corresponde a una corrida para un haz de iones con 2.5% de la densidad del viento solar y una velocidad de 10 V_A . Comparando ésta figura con 1.27(a), la cual considera un haz con 1% de la densidad del plasma ambiente se puede observar que al aumentar la densidad los saltos en densidad de la FCB también crecen de un 20% a un 40% sobre el valor de la densidad del viento solar. Entonces, tal como sucede en el caso de la velocidad, al aumentar la densidad del haz de iones resulta en un fortalecimiento de la frontera compresiva. Comparando los cambios debidos a velocidad y densidad del haz se sugiere que los cambios en velocidad producen más empujamiento en la FCA, es decir una frontera más

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

intensa, que los cambios debidos al aumento en la densidad de iones rebotados.

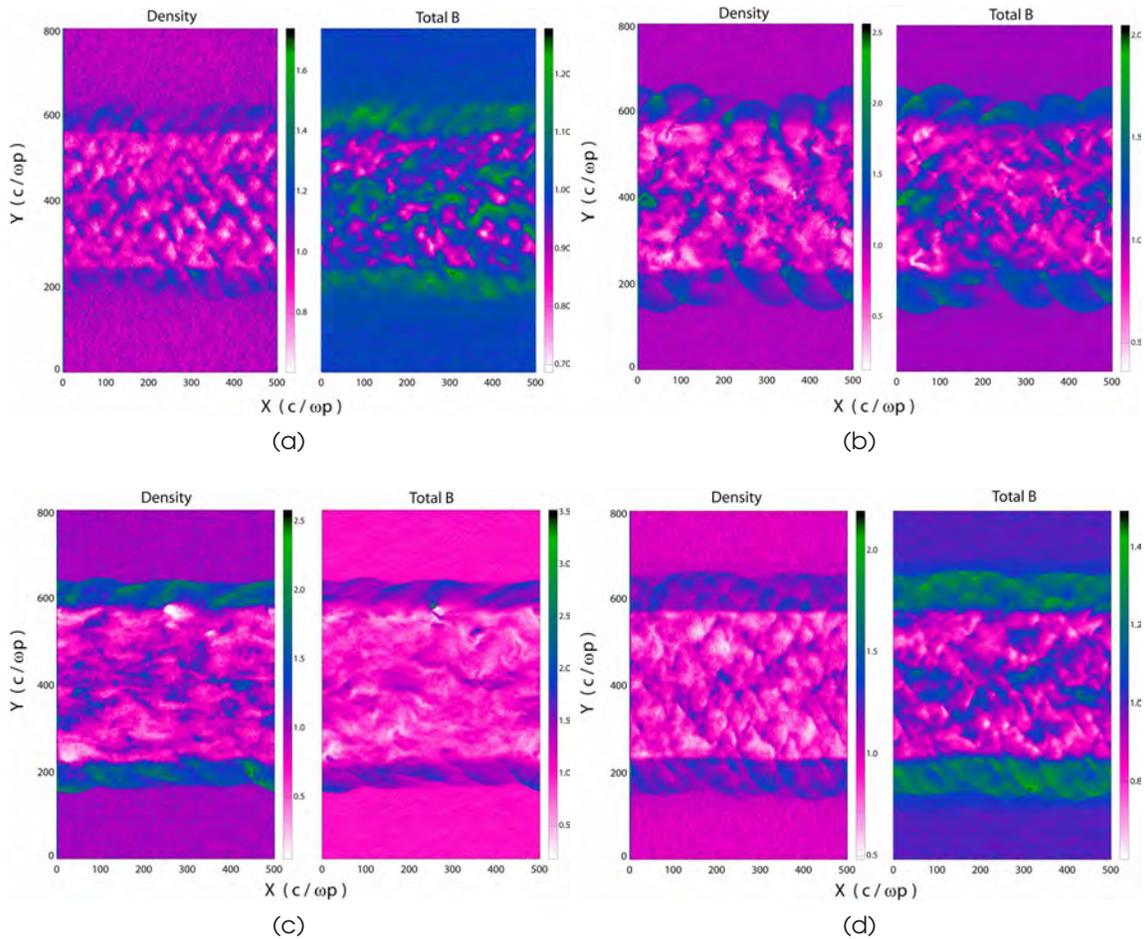


Figura 1.27: Gráfica de densidad y campo magnético total de tres corridas de la simulación híbrida local correspondiente a un haz con densidad igual al 1% de la densidad del viento solar y velocidad (a) $10 V_A$, (b) $20 V_A$ y (c) $30 V_A$. La imagen en (d) corresponde a un haz con 2.5% la densidad del viento solar ambiente y una velocidad de $10 V_A$. Tomada de Omidi et al. (2009).

Efecto del ángulo de cono del viento solar sobre la FCA

Otro punto reportado por Omidi et al. (2009) es la influencia de la configuración del CMI en la formación de las fronteras compresivas. Lo que hallaron los autores es que las FCA se forman para un amplio rango de ángulos de cono y que la variación del ángulo θ_{BV} tiene un efecto importante sobre la simetría de la frontera compresiva. La Figura 1.28 muestra tres corridas para $M_A = 12$ donde el parámetro variable fue el ángulo de cono con valores de 10° , 20° y 40° . En el caso en que $\theta_{BV} = 10^\circ$ se forman dos FCA, una a cada lado del antechoque, y la FCA que se forma en la región superior se encuentra al interior de las fronteras de iones y de ondas FUB. Esto se deduce pues las perturbaciones del campo y la densidad observadas se encuentran justo fuera del choque de proa y más allá de la frontera compresiva superior. Este ejemplo vuelve a mostrar que las fronteras de iones y de ondas de frecuencia ultra baja no siempre coinciden con la frontera compresiva. Esto se debe a que las regiones del antechoque conectadas a la región paralela del choque se forman más rápidamente que aquellas conectadas a regiones cuasi-paralelas del choque, las cuales se forman lentamente; entonces, la región del antechoque asociada con el choque paralelo se forma primero provocando la formación de las fronteras compresivas mientras que los haces de iones y ondas FUB asociadas con el choque cuasi-paralelo aparecen después y más allá de donde se forma la FCA. Este es el caso de la FCA superior, pues para la frontera inferior se tiene solamente viento solar puro debajo de ella.

En el caso en que $\theta_{BV} = 20^\circ$, Figura 1.28, se observa que solamente una FCA se forma en la parte baja de la región del antechoque de iones. La asimetría en la formación de las FCA es atribuida a la variación en las propiedades del haz de iones a lo largo de las regiones paralela y cuasi-paralela del choque de proa. Como fue mostrado en la sección anterior la formación e intensidad de las fronteras compresivas depende de la densidad y velocidad de los iones rebotados y por tanto las variaciones en las propiedades de los iones que han sido reflejados en distintas regiones del choque de proa, justamente por las diferentes configuraciones del CMI, son las responsables de esta asimetría. Dicha asimetría puede resultar en pares de FCA de diferentes intensidades o bien, puede eliminar por completo una de las FCA y entonces quedar restringida la FCA a un sólo lado del antechoque dependiendo del ángulo de cono (y de manera implícita del Número de Mach). Finalmente los paneles de la derecha de la Figura 1.28 muestran una FCA formada

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

para un $\theta_{BV} = 40^\circ$, lo que permite ver que las fronteras compresivas se forman para un amplio rango de ángulos de cono. En este caso la FCA se encuentra dentro de la frontera de iones.

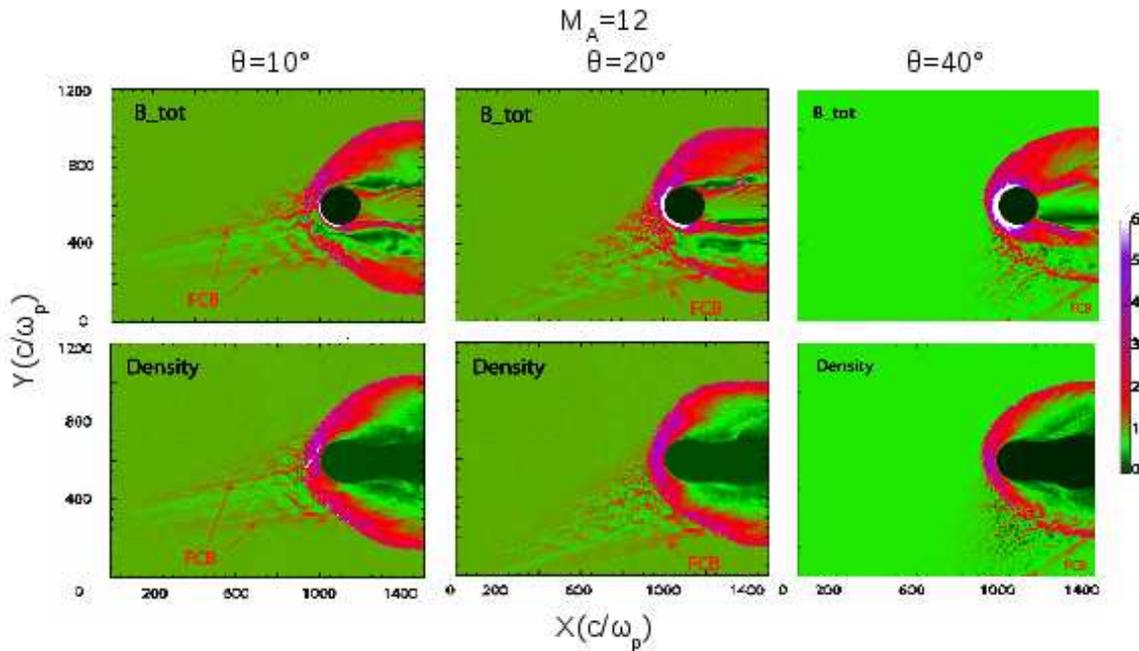


Figura 1.28: Gráficas de densidad y campo magnético total de tres corridas correspondientes a ángulos de cono de 10° , 20° y 40° para $M_A = 12$. Tomada de Omidi et al. (2009)

Ejemplo de una FCA observada por Cluster

Los autores, Omidi et al. (2009), muestran un ejemplo de una frontera compresiva observada por la nave Cluster-1 con el objetivo de mostrar las compatibilidades entre sus resultados numéricos y las observaciones. El evento fue observado el 18 de Febrero de 2002 durante un intervalo donde el ángulo de cono del CMI fue de $\sim 42^\circ$ y la velocidad del viento solar de $\sim 7V_A$. El perfil muestra que la FCA se cruzó a las 09:05:00 UT y que, de acuerdo a la Figura 1.26, antes de encontrar la frontera el antechoque está permeado de ondas compresivas de gran amplitud. La FCA se encuentra en un modo magnetosónico con los aumentos en campo y densidad correlacionados, los paneles de la velocidad indican que existe desviación del flujo alrededor del obstáculo y las ondas de alta frecuencia observadas en el panel del campo magnético después de que la FCA ha sido cruzada indican la existencia de partículas rebotadas así como del hecho de que la frontera compresiva no coincide con las fronteras de iones u ondas FUB. Las características observadas de

1.6. Fronteras compresivas del antechoque

este evento son consistentes con los resultados obtenidos por los autores para las simulaciones híbridas.

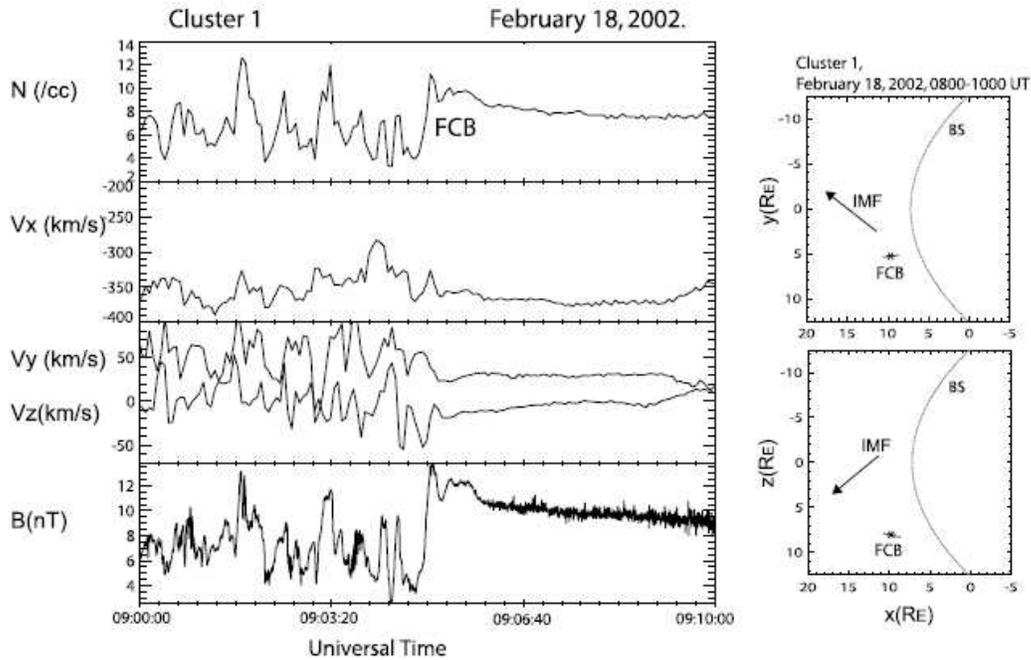


Figura 1.29: FCA observada por Cluster-1 el 18 de Febrero del 2002. Se grafican los paneles de densidad, componentes de la velocidad y magnitud del campo magnético donde se ilustra la estructura de la frontera compresiva observada. Los gráficos fueron generados con datos del magnetómetro a bordo de Cluster con una resolución de 5 vect/s y del instrumento CIS. Del lado derecho de la Figura se muestra la trayectoria de Cluster-1 entre las 08:00 y las 10:00 UT respecto al choque de proa nominal calculado según el modelo de Narita et al. (2004), la FCB está indicada por un asterisco. Tomada de Omidi et al. (2009).

1.6.3. Principales resultados de las FCA

Los resultados más importantes de las simulaciones híbridas globales muestran que los incrementos en campo y densidad de las FCA se encuentran correlacionadas indicando que el evento está en un modo magnetosónico rápido. Para analizar la dependencia de las FCA respecto al M_A se analizan las simulaciones locales de las propiedades de las fronteras compresivas en función de la densidad, velocidad y temperatura del haz de iones. La intensidad de esta nueva frontera aumenta con el Número de Mach de manera que las fronteras encontradas para corrientes rápidas de viento solar resultan ser más compresivas en los perfiles de densidad y campo magnético. Otro resultado importante de las fronteras es que las regiones de compresión de densidad y campo adquieren una forma de choque al aumentar el Número de Mach. En cuanto a la velocidad del flujo se reporta que existe dis-

1. Choque de proa y antechoque terrestres.

minución en su velocidad y es desviado de la dirección Sol-Tierra, en este sentido esta nueva frontera ayuda al choque de proa a procesar el plasma proveniente del viento solar. El efecto de la temperatura del haz mostrado indica que la tasa de crecimiento de las FCA no es afectada significativamente por las variaciones de este parámetro, lo que significa que la intensidad de la frontera compresiva es menos sensible a los cambios de temperatura de esta simulación. Aunque la formación de la FCA es un proceso cinético, se puede explicar este proceso considerando al plasma como un fluido simple al destacar que la presencia de iones rebotados aumenta la presión dentro de la región del antechoque lo que provoca la expansión de esta zona contra el viento solar resultando entonces la formación de la frontera compresiva. Sin embargo, el hecho de que la FCA no sea sensible a la temperatura del haz demuestra la limitación de un enfoque solamente de fluido para describir las propiedades de las fronteras compresivas.

Aunque las simulaciones no reportan que la formación de fronteras compresivas ocurran de manera preferencial para ciertas configuraciones geométricas del campo magnético interplanetario si se encontró que la forma de estas fronteras resulta ser simétrica para ángulos de cono pequeños del CMI, es decir, que las fronteras compresivas se observarán para ambos lados del antechoque mientras que para ángulos de cono oblicuos la FCA estará restringida a un sólo lado del antechoque.

Esta nueva frontera en general no coincide con las fronteras del antechoque de iones ni con la de ondas de Frecuencia Ultra Baja. La frontera compresiva no representa una zona de transición entre las regiones cuasi-paralela y cuasi-perpendicular del choque sino que su formación está asociada a la actividad de ondas FUB, en particular en zonas donde esta actividad es fuerte y logra formar las depresiones en campo magnético y densidad. Debido a la naturaleza dinámica tanto de la frontera compresiva como del antechoque y al hecho de que las propiedades del haz de iones (densidad y velocidad principalmente) son diferentes de acuerdo a la región del choque donde se hayan rebotado; no todas las regiones del antechoque están asociadas con fuerte actividad de ondas FUB. Es por esta razón que aunque la FCA se forma en el antechoque puede aparecer alejada de las fronteras de iones y de ondas FUB. Debido a que las regiones asociadas a mayor actividad de ondas FUB son las porciones paralelas y cuasi-paralelas al choque de proa, la FCA formada en estas zonas aparece inicialmente como una frontera que separa el antechoque del viento solar puro. Pero en intervalos de tiempo posteriores a la formación de la FCA, cuando ésta ha evolucionado, la estructura aparece después

1.7. Resumen

de éstas regiones del choque donde iones provenientes del choque que alcanzaron el viento solar hacen que la FCA aparezca detrás de la frontera del antechoque de iones. Entonces, en las primeras etapas de formación de las FCA se espera que separen el antechoque del viento solar puro y para etapas posteriores de la frontera se esperaría encontrar iones rebotados y ondas FUB una vez cruzada la FCA.

1.7. Resumen

En este capítulo establecimos un panorama general del antechoque terrestre por ser este escenario donde las estructuras de nuestro interés existen. Después se describieron estructuras cuyo perfil en campo magnético y densidad se asemeja al perfil generado en simulaciones híbridas globales para la nueva estructura del antechoque conocida como frontera compresiva. Presentamos los resultados generados por las simulaciones para esta estructura magnética con el fin de estar familiarizado con el concepto y posteriormente poder introducirnos en el análisis observacional del plasma del viento solar en búsqueda de la existencia real de la frontera compresiva que es el eje principal de esta investigación.

Capítulo 2

Datos de la misión Cluster y método de análisis

Las fronteras existentes en la magnetósfera han sido objeto de mediciones *in situ* desde el comienzo de la era espacial. Debido al constante movimiento de tales fronteras, el cambio en su orientación y su inherente evolución, resulta difícil distinguir entre cambios temporales y espaciales en las mediciones hechas por una sola nave espacial. Las fronteras son un objetivo ideal para ser estudiadas por un conjunto de naves que sean cercanas entre sí. En este sentido ya han existido algunos intentos por estudiar la magnetósfera y las regiones cercanas simultáneamente por dos naves, como fueron las misiones *ISEE* y *AMPTE*; sin embargo, con dos naves sólo se puede inferir variaciones a lo largo de la línea entre las naves, y con tres naves sólo se determina un plano. La misión *Cluster* está formada por cuatro naves formadas en una estructura tridimensional cuyas distancias de separación son variables. Los datos con los que trabajamos en esta tesis provienen de los experimentos a bordo de estas naves, por lo que en este capítulo daremos una descripción general de la misión así como de los instrumentos a bordo y los tipos de datos que generan y que son usados en esta investigación.

2.1. Breve panorama de la misión Cluster

La misión espacial Cluster es una misión no tripulada de la Agencia Espacial Europea (ESA) cuyo objetivo es estudiar estructuras de pequeña escala de la magnetósfera terrestre y su entorno en 3-D, para lo que usa cuatro naves idénticas orbitando en una formación de tetraedro, Figura 2.1. La historia de Cluster comienza en 1982 pero fue hasta el año 2000 que se lanzó exitosamente, pues en el primer lanzamiento hecho en 1996 dos de las cuatro naves se destruyeron al explotar el cohete Ariane

2.1. Breve panorama de la misión Cluster

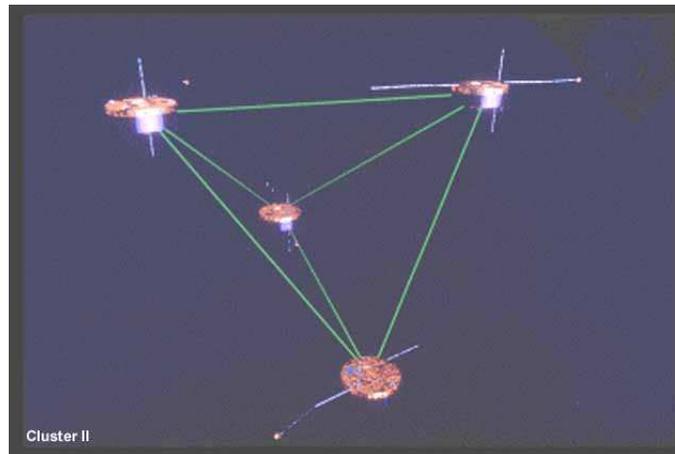
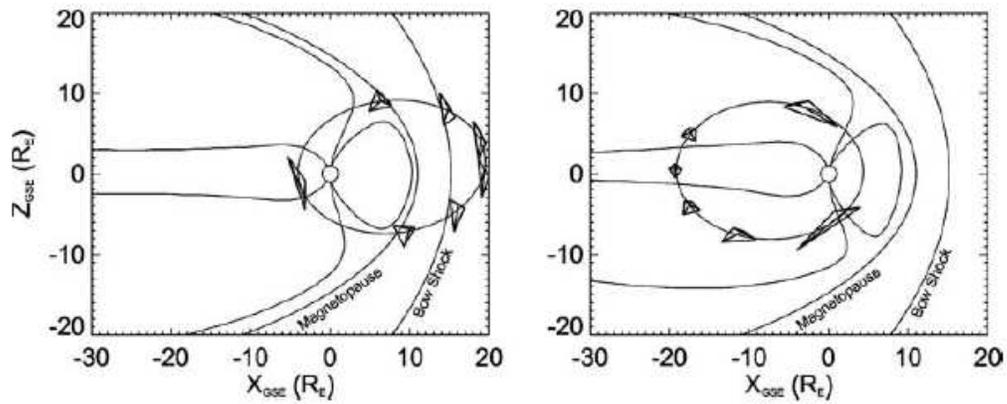


Figura 2.1: Las cuatro naves de Cluster en su formación tetraedral.

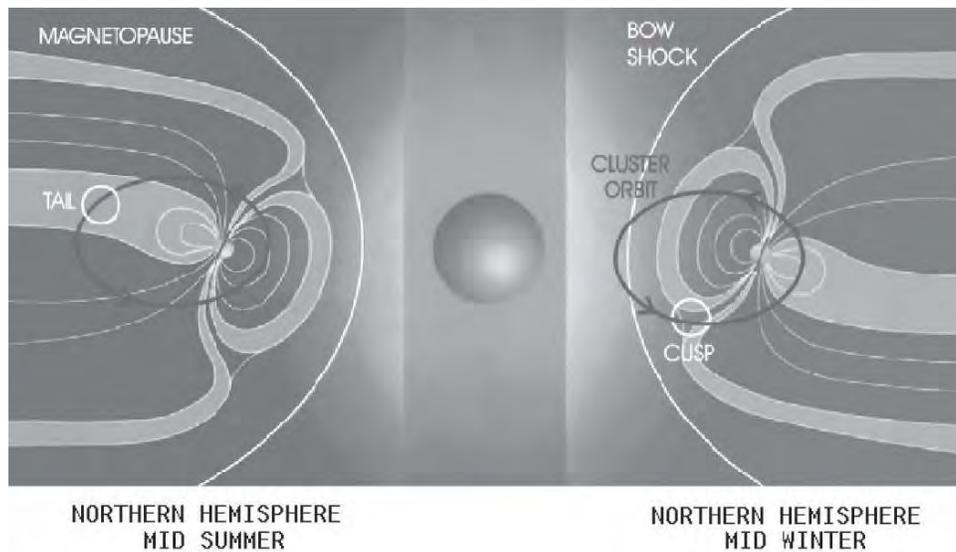
5 que las transportaba. La fase científica comenzó oficialmente en el 2001 cuando las naves alcanzaron la constelación tetraédrica. Las cuatro naves Cluster - Rumba (C1), Salsa (C2), Samba (C3) y Tango (C4) - han provisto a la comunidad científica de una única visión de los procesos en plasmas espaciales en ciertas regiones del viento solar y la magnetósfera; en esta última en particular en las regiones del choque de proa, magnetopausa, magnetocola, cuñas polares y zonas aurorales.

Después del lanzamiento, las naves fueron puestas en órbitas casi idénticas con alta excentricidad polar entre $19.6 R_E$ (apogeo) y $\sim 4 R_E$ (perigeo). Su periodo orbital es de 57 horas y la inclinación de la órbita es de aproximadamente 90° . La Figura 2.2(a) muestra la órbita sobrepuesta a un corte de la magnetósfera y se observa que Cluster se mueve hacia afuera sobre el casquete polar norte y luego cruza la magnetopausa y el choque de proa dirigiéndose hacia el viento solar, después vuelve a cruzar estas fronteras en sentido inverso moviéndose sobre el casquete polar sur hacia el perigeo de la órbita. El esquema de la izquierda se aplica a la primavera de cada año. Ya que el plano que contiene a la órbita es fijo respecto al sistema inercial la magnetósfera cruza este plano cada año debido a la rotación de la Tierra lo que proporciona un mapeo de 360° de la magnetósfera. Como resultado el apogeo de la órbita estará localizado en la cola geomagnética medio año después como se observa en el esquema de la derecha de la misma Figura. Es claro entonces que en el curso de la misión, Cluster se encontrará con las distintas regiones de la magnetósfera varias veces. Las órbitas están sintonizadas así que las cuatro naves están localizadas en los vértices de un tetraedro casi regular cuando cruza las principales fronteras. A lo largo de un año la ubicación del apogeo de

2. Datos de la misión Cluster y método de análisis



(a) La órbita de Cluster en primavera (izquierda) y en invierno (derecha) conforme se encuentran con las distintas regiones de la magnetósfera y sus fronteras. Las separaciones entre las naves están exageradas para mayor claridad del esquema. Paschman et al. (2005).



(b) La órbita de Cluster proyectada en el plano meridional en Agosto (izquierda) y Febrero (derecha). Frutos-Alfaro et al. (2004).

Figura 2.2: Órbitas de Cluster.

2.1. Breve panorama de la misión Cluster

Cluster varía con las estaciones de manera que en primavera y verano las regiones de estudio son el viento solar, choque de proa, magnetopausa, capa frontera y cuñas; mientras que en otoño e invierno las regiones de interés son la magnetocola, la hoja de plasma, la capa frontera de la hoja de plasma y las cuñas polares.

La configuración de Cluster no siempre es fija a lo largo de toda la órbita, se va optimizando según las regiones de plasma en las que se encuentra. En Agosto cuando la órbita cruza la magnetocola se optimiza la configuración a casi un perfecto tetraedro cerca de la hoja neutra y ya casi en el apogeo de la órbita. A altitudes medias sobre las cuñas y cerca del perigeo las naves se forman una detrás de otra sobre la misma órbita. En Febrero el tetraedro perfecto se sitúa sobre las cuñas y la constelación se comprime en las regiones del viento solar y la magnetofunda. Cerca del perigeo las naves se alinean lo que permite estudiar variaciones temporales en la zona auroral. Figura 2.2(b).

Las distancias de separación entre las naves son ajustadas de ~ 100 km a ~ 10000 km durante la misión, lo que permite estudiar los fenómenos presentes en esas regiones a un número importante de escalas espaciales.

La Figura 2.3 muestra una gráfica de la separación de las naves en función del tiempo previstas para la misión. La maniobra de separación es posible porque cada nave carga 650 kg de combustible desde el lanzamiento, del cual 75% fue usado para alcanzar la órbita operacional. Las cuatro naves de Cluster portan conjuntos idénticos de 11 experimentos diseñados para medir los campos electromagnéticos ambientes y las poblaciones de partículas en un amplio rango de frecuencias y energías. Los instrumentos y las naves se describen a detalle en Escoubet et al. (1997).

Una de las peculiaridades de las observaciones del viento solar es el aparente éxito de las ecuaciones de fluidos o magnetohidrodinámicas (MHD) para describir muchas de las propiedades macroscópicas de éste plasma. Esto sin considerar el hecho de que el tiempo de colisiones entre protones es de $\approx 4 \times 10^6$ s lo cual implica que el viento solar es esencialmente un plasma sin colisiones (los electrones en el centro de la función de distribución no son no-colisionales sin embargo tienen tiempos de colisión protón-electrón que corresponderían a unas pocas colisiones en el trayecto entre la corona solar y una distancia de 1UA). Cluster, con su capacidad para determinar estructuras tridimensionales y con el gran complemento que implican los instrumentos de ondas y partículas, es capaz de investigar la relación entre las propiedades tanto cinéticas como de fluido del plasma especialmente en las fronteras de estructuras cuyas escalas sean del orden de la distancia de separación

entre las naves. Estas estructuras incluyen el choque de proa, la hoja de corriente heliosférica, hoyos magnéticos y discontinuidades.

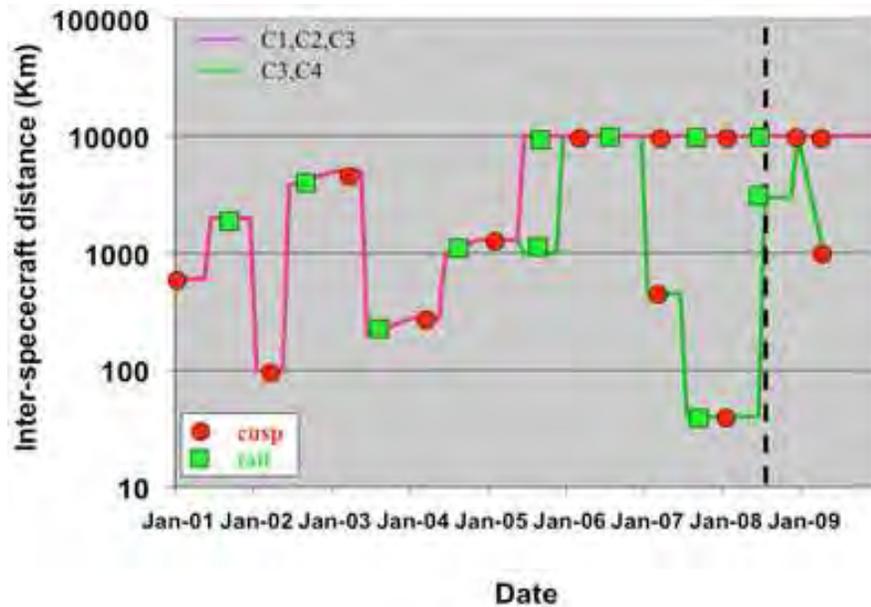


Figura 2.3: Distancia de separación entre las naves de Cluster como función del tiempo. Tomada de la página del CSDS.

2.2. Instrumentos de Cluster

Como se mencionó antes las cuatro naves cuentan con idénticos equipos que constan de once instrumentos, una descripción detallada de las naves y sus instrumentos puede encontrarse en Escoubet et al. (1997). A continuación se enlistan y se mencionan brevemente sus funciones, Frutos-Alfaro et al. (2004):

ASPOC (Active Spacecraft Potential Control) Mediciones de las funciones de distribución del plasma ambiente.

CIS (Cluster Ion Spectrometry) Análisis de la composición y dinámica de las iones magnetosféricas en el rango de energía de 0 - 40 keV. Consiste de dos diferentes instrumentos: **CODIF (Composition and Distribution Function Analyzer)** y **HIA (Hot Ion Analyzer)**.

DWP (Digital Wave Processor) Controla los experimentos para ondas: **EFW, STAFF, WHISPER** y **WDB** e interpreta las correlaciones entre partículas y onda-partícula.

2.2. Instrumentos de Cluster

EFW (*Electric Field and Waves*) Mediciones del campo eléctrico y de las fluctuaciones de densidad.

EDI (*Electronic Drift Instrument*) Mediciones de la deriva de haces de electrones causados por el campo eléctrico del plasma.

FGM (*Fluxgate Magnetometer*) Mediciones magnéticas dentro de la magnetósfera y en el medio interplanetario.

PEACE (*Plasma Electron and Current Analyzer*) Mediciones de la distribución de velocidad tridimensional y distribuciones de flujo más energía de electrones con energías entre 0.67 eV y 30 keV.

RAPID (*Research with Adaptive Particle Imaging Detectors*) Espectrómetro avanzado para analizar electrones y composición con canales de energías desde 20 keV hasta algunos MeV.

STAFF (*Spatio-Temporal Analysis of Field Fluctuations*) Mediciones de las fluctuaciones rápidas electromagnéticas en las regiones de interacción entre el viento solar y la magnetósfera.

WHISPER (*Waves of High Frequency and Sounder for Probing of Density by Relaxation*) Mediciones de la densidad del plasma en la magnetósfera.

WBD (*Wide Band Data*) Proporciona mediciones del campo eléctrico y espectrogramas de las ondas así como de emisiones en radio.

En este trabajo usamos datos provenientes del magnetómetro FGM, del analizador electrostático de partículas CIS y del detector de partículas de estado sólido RAPID, de los que a continuación se da una pequeña descripción.

2.2.1. Magnetómetro: FGM

El instrumento FGM es usado para tomar mediciones precisas del vector de campo magnético en tres dimensiones a lo largo de las órbitas de las cuatro naves de Cluster. Cada uno de los cuatro FGM consiste de dos sensores de campo magnético triaxiales y una unidad electrónica en la plataforma principal del equipo, los sensores están situados a una distancia de 5m de la nave para evitar interferencias. Cualquiera de los dos sensores puede ser el sensor primario que detecte el flujo de datos principal. El FGM puede tomar mediciones de alta resolución con hasta 67

muestras por segundo. Cada magnetómetro tiene una memoria de 192 Kbytes para almacenar datos de alta resolución. El instrumento es altamente tolerante a fallas con redundancia completa de todas sus funciones vitales. El magnetómetro funciona en cuatro modos operacionales. El modo para el viento solar nominal cubre campos magnéticos en el rango de ± 64 nT con una resolución de 8 pT. (Balogh et al., 2001; French et al., 2008).

2.2.2. Analizador electrostático: CIS

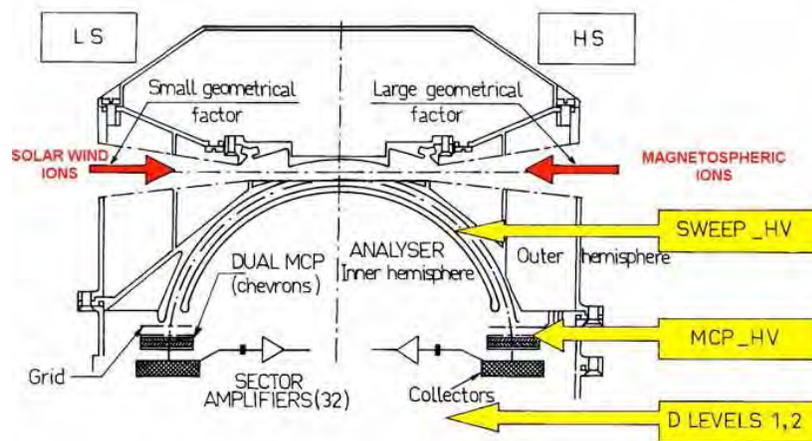
Las cuatro naves Cluster están equipadas con dos analizadores electrostáticos diseñados para medir distribuciones de partículas en la magnetósfera y en la región de plasma del viento solar cercana a la Tierra. El experimento PEACE mide electrones en el rango de energías de 0.6 eV a 26 eV. Por otro lado, los instrumentos CIS utilizan dos sensores para cubrir un amplio rango de energía y para analizar la composición y dinámica de los iones magnetosféricos. Los dos sensores son CIS-1 o CODIF y CIS-2 o HIA. CODIF es usado para obtener las distribuciones de iones tridimensionales de entre 0 a 40 keV de las principales especies (H^+ , O^+ , He^+ , He^{++}) con un alto tiempo de resolución (1 vector cada 4s) además de obtener la razón carga-masa. Un analizador del potencial de retardo (RPA) también es usado para los iones de bajas energías (0-30 eV). El sensor HIA está diseñado para un rango de energías entre 5 eV y 30 keV y tiene una alta y flexible resolución de muestreo ($5.6^\circ \times 5.6^\circ$), lo cual es importante para evitar la saturación del instrumento, su resolución también es de 1 vector cada 4s; sin embargo este instrumento no puede diferenciar entre distintas especies de iones. Dandouras et al. (2009).

La Figura 2.4(a) muestra una sección del analizador HIA que tiene un diseño tipo *sombrero de copa* el cual está caracterizado por una amplio campo de visión y un ángulo de giro de menos de 90° a través del cual las partículas son desviadas. El colimador y sistema deflector cubren la apertura de entrada actuando para definir la respuesta angular del instrumento y detectar a los flujos de luz solar ultravioleta (UV) y partículas de alta energía. Cuentas no deseadas pueden registrarse asociadas a electrones secundarios producidos por fotones UV o partículas energéticas y directamente por cualquier fotón UV que logre alcanzar la placa de microcanal (MCP, del inglés *Microchannel Plate*).

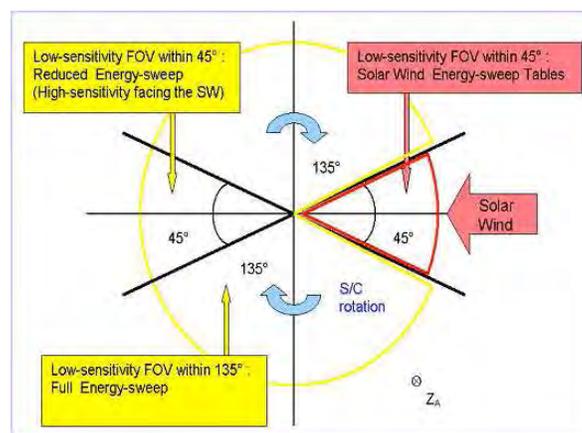
Una diferencia de potencial aplicada entre las placas de deflexión exterior e interior selecciona partículas en función de su energía por carga, en la imagen

2.2. Instrumentos de Cluster

se le llaman a estas placas: hemisferios. Aquellas con la razón energía-carga correcta pasan a través del sistema e impactan la MCP que amplifica la señal de la partícula incidente a niveles que puedan ser registrados por el sistema electrónico de cuentas. Cambiando el voltaje entre las placas o hemisferios se puede seleccionar partículas con diferentes energías. En el modo nominal de CIS, el instrumento HIA barre todo un rango de energía en 62.5 ms dando una resolución angular máxima de $\sim 5.6^\circ$, como se había mencionado previamente. Para el campo de visión de 360° que proporciona el diseño de sombrero de copa, al instrumento le lleva medio giro de la nave cubrir todos los ángulos azimutales.



(a)



(b)

Figura 2.4: La imagen (a) muestra una vista de la sección cruzada del instrumento HIA, la imagen (b) es un esquema que ilustra el barrido de energía de HIA como función de la orientación del campo de visión del instrumento en el plano del giro de la nave, para los modos de viento solar 0-5. Tomadas de Dandouras et al. (2009).

2. Datos de la misión Cluster y método de análisis

La resolución del ángulo polar es proporcionada por un arreglo de ánodos separados en cada cabeza del sensor. El sensor de HIA está dividido en dos secciones con sensibilidades en la relación $\sim 1/25$; cada uno tiene un campo de visión polar de 180° , Figura 2.4(b). La sección de baja sensibilidad (*low-g*) está diseñada para medir el haz de viento solar con $8 \times 5.625^\circ$ ánodos rodeados por 8 ánodos de resolución gruesa (11.25°). La sección con mayor sensibilidad (*high-G*) está compuesta por 16 ánodos de 11.25° y se optimiza para la observación de flujos de iones que sean menos intensos que el viento solar.

Así como los ánodos están divididos en sectores, las partes *low-g* y *high-G* de HIA también difieren en sus factores geométricos. Este factor geométrico puede ser pensado como una parametrización de qué tan abierta es la apertura en un instrumento. Por ejemplo, la sección *high-G* tiene un factor geométrico más grande que el de la sección *low-g*; esto significa que la primera sección es capaz de medir poblaciones más enrarecidas pero puede ser saturada por flujos intensos. El barrido de energía del sector *high-G* está construido de manera tal que el haz del viento solar (~ 1 keV) se excluye del instrumento cuando éste apunta hacia el Sol para evitar la saturación del instrumento.

Las distribuciones completas en 3-D portan información importante y en gran cantidad del plasma. Los momentos de la distribución angular completa son calculados por el instrumento y transmitidos por cada giro de la nave. Estas distribuciones pueden estar dadas en función del ángulo de paso entre la velocidad de la partícula y la dirección del campo magnético. La temperatura puede ser calculada en dirección paralela y perpendicular a la dirección del campo magnético y también se obtiene del tensor de presión en el sistema de referencia del plasma.

Modos de operación de CIS

Los instrumentos de CIS tienen una gran flexibilidad tanto en la selección del modo de operación como en la reducción de los datos para ajustarse al ancho de banda disponible para la telemetría. El instrumento puede estar en un modo indicado para mediciones magnetosféricas aunque la nave se encuentre en la región del viento solar o del antechoque. CIS puede operar en cualquier combinación de los 6 modos de telemetría de la nave y los 16 modos operacionales CIS; estos últimos se enlistan en el cuadro 2.1.

Los 16 modos operacionales mostrados en el Cuadro 2.1 pueden agruparse en:

2.2. Instrumentos de Cluster

- (a) Modos de seguimiento del viento solar
- (b) Modos de estudio del viento solar con prioridad sobre los iones río arriba del choque de proa
- (c) Modos magnetosféricos
- (d) Modos de magnetofunda
- (e) Modo RPA
- (f) Modo de prueba y calibración

El cambio de modo operacional es ejecutado para tiempos específicos que han sido previamente establecidos dependiendo del tipo de poblaciones que se espera medir para la ubicación de la nave en ese tiempo. Desde el año 2003 los modos más comúnmente usados son el modo 8 (MAG-1) y 13 (MAG-C1) en la magnetósfera, modo 12 (MAG-5) y 14 (MAG-C2) en la magnetofunda y modo 3 (SW-4) y 5 (SW-C2) en el viento solar, Dandouras et al. (2009).

Los modos magnetosféricos permanecen relativamente simples, en ellos todos los rangos de energía son cubiertos para la máxima distribución angular disponible. Los modos de seguimiento del viento solar permiten mediciones rápidas y precisas de los parámetros del flujo de iones (H^+ , He^{++}). Para esto, en el viento solar, el rango de barrido de energías del HIA se reduce automáticamente cuando la sección de baja sensibilidad del sensor está orientado en la dirección del viento solar. El rango de barrido se ajusta para cada giro de la nave (o *spin*) lo que permite obtener una mayor resolución para los datos del haz del viento solar. En cuanto a los modos de viento solar con prioridad en los iones que van río arriba (Modos 1,3 y 5) el modo de seguimiento de viento solar es ejecutado sólo una vez cada 16 giros; mientras no es ejecutado se tiene un barrido de energía en rangos más amplios para el viento solar usando el sector de baja sensibilidad mientras que el sector de alta sensibilidad detecta los iones río arriba pues se encuentra orientado en dirección contraria al Sol. Finalmente los modos de magnetofunda son como los modos magnetosféricos.

Es importante atender a los modos operacionales de CIS al estudiar los parámetros del plasma pues dependiendo del modo en el que se encuentra CIS los datos incluirán distribuciones de iones del antechoque de alta energía o sólo la distribución del viento solar.

2. Datos de la misión Cluster y método de análisis

Modos de CIS		Nombre del Modo
0	SW-1	Solar Wind / SW tracking - Mode 1
1	SW-2	Solar Wind / 3-D upstreaming ions - Mode 2
2	SW-3	Solar Wind / SW tracking - Mode 3
3	SW-4	Solar Wind / 3-D upstreaming ions - Mode 4
4	SW-C1	Solar Wind / SW tracking - Data Compression -Mode 1
5	SW-C2	Solar Wind / 3-D upstreaming ions - Data Compression-Mode 2
6	RPA	RPA Mode
7	PROM	PROM Operation
8	MAG-1	Magnetosphere - Mode 1
9	MAG-2	Magnetosphere - Mode 2
10	MAG-3	Magnetosphere - Mode 3
11	MAG-4	Magnetosphere / Magnetosheath - Mode 1
12	MAG-5	Magnetosheath - Mode 2
13	MAG-C1	Magnetosphere - Data Compression - Mode 1
14	MAG-C2	Magnetosheath - Data Compression - Mode 2
15	CAL	Calibration / Test Mode

Cuadro 2.1: Modos operacionales de CIS.

2.2.3. Detector de partículas: RAPID

El instrumento RAPID es un detector de partículas para el análisis de distribuciones de partículas supertérmicas. RAPID puede medir electrones con energías en el rango de 20-400 keV y iones pesados con energías desde 10 keV por nucleón hasta 1500 keV, e hidrógenos con energías de 40 keV hasta 1500 keV. Este instrumento utiliza dos sistemas detectores independientes para la detección de núcleos y electrones: el *Imaging Ion Mass Spectrometer* (IIMS) y el *Imaging Electron Spectrometer* (IES);Daly y Kronberg (2009).

El instrumento se divide en 16 sectores azimutales y mide el tiempo que le toma a una partícula atravesar una distancia conocida dentro del detector, calculando así la velocidad de la partícula. Una medición independiente de la energía de la partícula es proporcionada por el detector de estado sólido. La masa de la partícula puede calcularse a partir de las mediciones para tiempo de vuelo y energía. La identificación de las especies de iones se basa en un análisis bidimensional de la velocidad de la partícula y la energía. Así los electrones son identificados por su energía, Daly (2008).

Al igual que CIS, RAPID es sensible a contaminación por altos flujos de partículas de bajas energías (como las del haz del viento solar) o por fotoionización por flujos

2.3. Tipo de datos generados por CLUSTER

de radiación solar UV. Un deflector electrostático lineal protege al instrumento de ser saturado por las partículas de bajas energías.

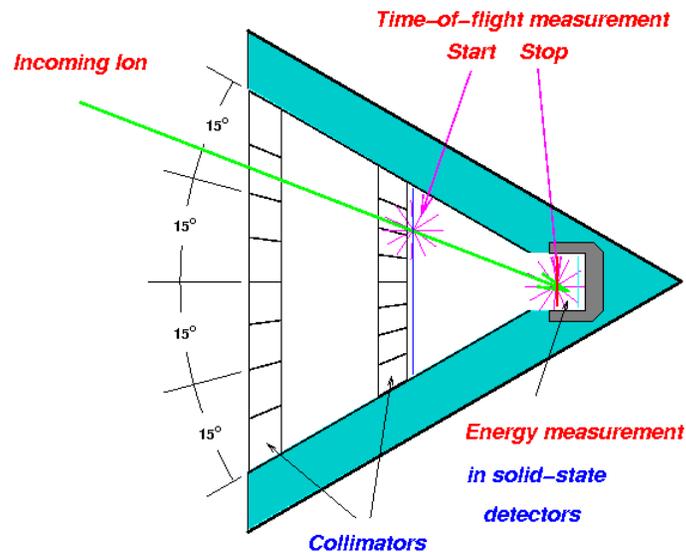


Figura 2.5: Uno de los sub-instrumentos de RAPID es el IIMS, su funcionamiento básico se ilustra en el esquema. Se observa un ion incidente que activa un señal de entrada al cruzar una hoja de aluminio, que también sirve para determinar la dirección de la partícula, una señal de parada se activa cuando el ion entra al detector de estado sólido donde es medida su energía. Tomada de Daly (2008).

2.3. Tipo de datos generados por CLUSTER

El *Cluster Science Data System*, (CSDS), se estableció para el procesamiento de los datos crudos de la misión en parámetros que pudieran interpretarse físicamente y para satisfacer los requerimientos de información de los usuarios científicos. El grupo de expertos del CSDS recomendaron el uso de un sólo formato para el intercambio de los datos entre los equipos de los distintos experimentos de Cluster. Este formato está diseñado como un formato de intercambio que permita traducir los datos de la misión en datos que puedan ser usados por las herramientas científicas disponibles así como entre las bases de datos de los equipos de la misión. Este formato, conocido como CEF (*Cluster Exchange Format*), fue desarrollado por el *Cluster Archiving Working Group* para almacenar y distribuir archivos entre los equipos de Cluster y los usuarios externos de manera accesible y eficiente, esto último a través del *Cluster Active Archive* (CAA). Los archivos CEF contienen especificaciones sobre la sintaxis usada para los datos y un encabezado en el que se describe el contenido de cada uno de ellos, Allen et al. (2008).

2.3.1. Herramientas de cómputo

IDL

Como es sabido en los últimos años se han desarrollado herramientas de cómputo capaces de leer y operar los datos obtenidos por las misiones espaciales, en particular de Cluster. La mayoría de estas herramientas están desarrolladas en IDL (*Interactive Data Language*), el cual es un lenguaje de programación que puede usarse para el análisis de datos y visualizaciones gráficas. Es utilizado especialmente en los campos de la astronomía y el procesamiento de imágenes médicas. Se trata de un lenguaje interpretable, es decir, que existe un programa "intérprete" que procesa el código escrito en este lenguaje.

IDL además posee numerosas rutinas de análisis numérico y estadístico que evita al programador tener que estarlas programando o usando librerías externas. IDL también soporta varios formatos tanto de imágenes (bmp, gif, jpeg) como de almacenamiento de datos científicos (cef, cdf, hdf, netcdf).

IDL ha sido ampliamente aplicado en la ciencia espacial. La Agencia Espacial Europea utiliza IDL para procesar casi todas las imágenes del cometa Halley tomadas por la nave espacial Giotto. El equipo de reparación del Telescopio Espacial Hubble utiliza IDL para ayudar a diagnosticar anomalías en el espejo principal. En la actualidad, entre otras aplicaciones, IDL se utiliza para la mayoría de los análisis del experimento SECCHI de la misión *STEREO* en el *Naval Research Laboratory* (NRL), en Estados Unidos, y en el *Rutherford Appleton Laboratory* en Reino Unido.

CEF_PLOT

Un valor añadido de la función del CAA es proporcionar herramientas para que el usuario pueda manipular y representar los datos provistos por ellos mismos. El equipo del CAA generó el programa CEF_PLOT en IDL capaz de leer archivos CEF y generar gráficos simples de los parámetros incluidos en los archivos. El código se encuentra disponible para cualquier usuario de la base de datos de Cluster a través de la página de internet del CAA.

El código usado para el análisis de los datos de esta investigación se desarrolló en IDL y también fue usada la herramienta CEF_PLOT para generar espectros de energía de los iones.

2.4. Resumen

En este capítulo presentamos en términos generales a la misión espacial Cluster y a tres de los instrumentos a bordo de cada una de las naves. Estos tres instrumentos - FGM, CIS y RAPID - se describieron con cierto detalle pues justamente los datos utilizados en esta investigación provienen de ellos. En el siguiente capítulo se presentarán los resultados obtenidos en nuestra investigación.

Capítulo 3

Análisis de datos y Resultados

Este capítulo presenta los resultados de un estudio observacional del antechoque terrestre cuyo objetivo fue determinar si las fronteras compresivas que se predicen en las simulaciones híbridas de Omidi et al. (2009) existen o no en el antechoque terrestre. Para esto se usaron datos de campo magnético y de los momentos del plasma de la misión Cluster medidos entre los años 2001 a 2005. Los datos usados del vector de campo magnético provienen del magnetómetro FGM a bordo de Cluster 1 con resoluciones de 5 vectores por segundo y 1 vector cada 4s, Balogh et al. (2001). Los datos de los momentos del plasma: densidad, temperatura y velocidad obtenidos del instrumento HIA tienen una resolución de 1 vector cada 4s.

3.1. Criterio de selección de los eventos

Para comenzar con la selección de eventos se tomaron fechas reportadas en la literatura como días donde el antechoque fue cruzado por alguna de las naves Cluster. Los parámetros estudiados para confirmar una FCA fueron: magnitud del campo magnético, densidad, velocidad y la temperatura medidos por Cluster 1. Las regiones de interés fueron preseleccionadas como aquellas regiones de transición entre viento solar quieto y plasma perturbado con parámetros de campo magnético y densidad que correspondieran al antechoque; el perfil buscado era del tipo generado en las simulaciones (ver sección 1.6), de manera que los perfiles buscados debían tener una configuración antechoque-FCA-viento solar o al revés dependiendo de hacia qué región se movía la nave.

En términos simples la morfología de la FCA puede pensarse como la de una oscilación completa: comienza en una región de viento solar quieto a partir de la cual se empina hasta alcanzar el máximo en su cresta (que correspondería a la compresión de B y n), le sigue la disminución de la oscilación hasta alcanzar el mínimo del

3.1. Criterio de selección de los eventos

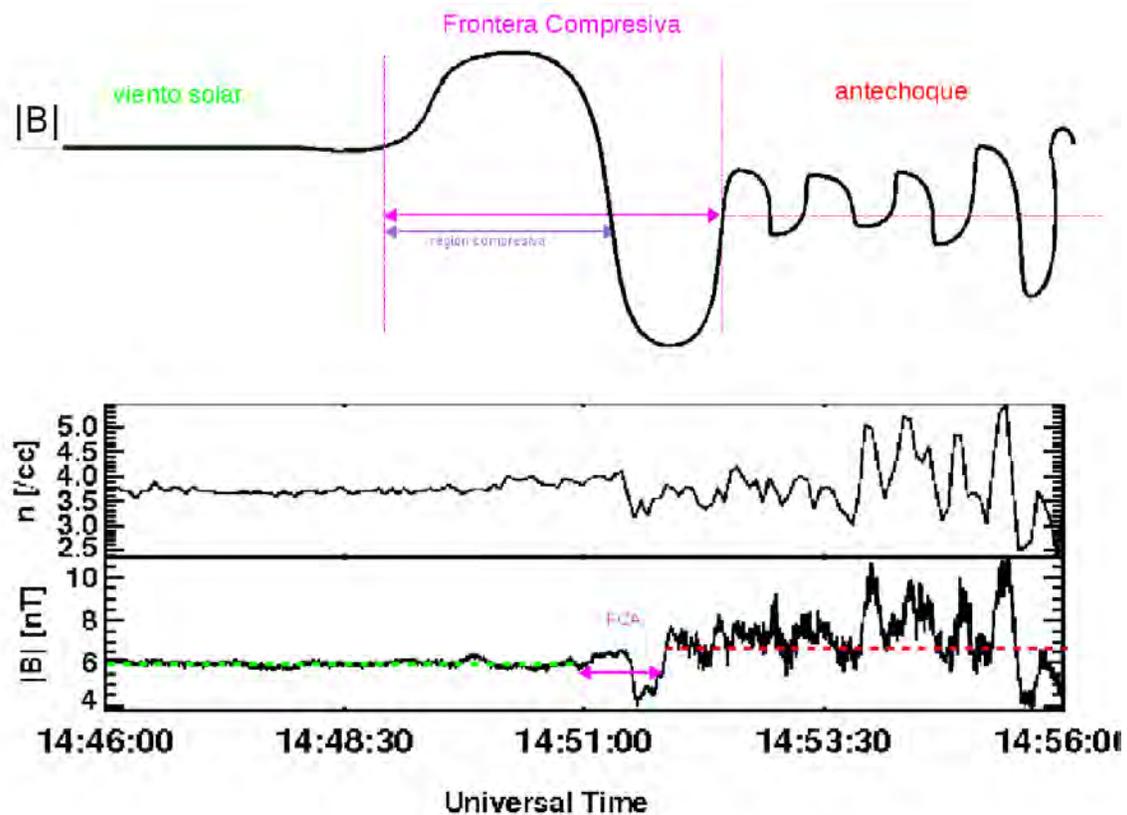


Figura 3.1: En la imagen se ilustra cómo se identificaron las regiones de frontera compresiva en un registro de campo magnético con el objetivo de poder calcular la duración de los eventos como el tamaño (imagen superior). La imagen inferior corresponde al registro de la intensidad de campo magnético y la densidad para un evento observado el 02 de Marzo del 2003 por Cluster 1.

valle (depresión de B y n) y de nuevo el crecimiento paulatino hasta alcanzar ahora la región del antechoque. El esquema superior de la Figura 3.1 ilustra lo anterior: la línea verde indica un promedio aproximado del parámetro (campo o densidad) en viento solar prístino y la línea roja a un promedio del mismo valor en el antechoque. La zona delimitada por líneas magenta es la considerada como la extensión de la FCA. La imagen inferior de la misma Figura muestra un ejemplo de un perfil típico de una frontera compresiva, éste evento se observó el 02 de Marzo del 2003 por Cluster-1 a las 14:51:17 UT mientras CIS operaba en un modo magnetosférico (MAG-C2). Los paneles del gráfico corresponden a la densidad y a la intensidad del campo magnético; en el segundo panel se superponen líneas con el mismo esquema de colores del esquema superior con el fin de mostrar la consideración hecha para cada evento observado para hallar la región correspondiente a la FCA y entonces

poder calcular su duración y extensión.

Es importante recalcar que aunque la firma buscada es muy parecida a la de otras estructuras comunes en el antechoque como las cavidades, cavitones y anomalías de flujo caliente; la principal diferencia entre una firma de alguna de estas estructuras y la de las FCA es que los perfiles de las fronteras compresivas se encontrarán en las regiones de transición entre viento solar quieto y plasma perturbado del antechoque, tal y como lo muestra la Figura 3.1. De ahí que si, por ejemplo, encontráramos el perfil de decremento de campo y densidad en una región de viento solar prístino tendríamos entonces que el perfil se trata de un hoyo de densidad y no de una frontera compresiva. En los acercamientos a estas regiones de transición efectivamente se descubrió un perfil similar al esperado por las simulaciones, constituido por zonas de compresión y depresiones correlacionadas en la intensidad del campo magnético y en la densidad. Sin embargo no todas las firmas con depresiones eran posibles fronteras compresivas pues debían analizarse cada una de ellas pues si por ejemplo el evento presentaba una disminución del campo muy grande correlacionada con una depresión en densidad moderada en una región de transición entre el viento solar puro y el antechoque entonces podía tratarse de una AFC, una cavidad o un hoyo de densidad.

La Figura 3.2 muestra un ejemplo de un evento que descartamos y que no es una frontera compresiva. Las observaciones son del 15 de Febrero del 2001, de arriba a abajo se grafica la magnitud de la velocidad, las componentes y y z (línea discontinua) de la velocidad, la componente V_x , las componentes y y z (línea discontinua) del vector campo magnético, la componente B_x , temperatura paralela (línea sólida) y perpendicular (línea punteada) de iones medidos cuando CIS operaba en un modo de viento solar (SW-4), la densidad y en el panel inferior la magnitud del campo magnético. En este ejemplo se observa una zona de transición entre viento solar y antechoque y alrededor de las 02:52:20 UT la nave entra al antechoque, justo antes la intensidad del campo magnético muestra el perfil de una posible FCA: existe una pequeña región de compresión seguida por una disminución del campo sin embargo aunque la densidad muestra pequeñas variaciones permanece alrededor de un valor constante y aunque al mismo tiempo que el campo tiene una disminución, ésta no es significativa respecto al plasma ambiente. La magnitud de la velocidad tampoco muestra una firma clara pues la disminución del parámetro se da gradualmente en una región muy grande. Es por los perfiles de densidad y velocidad que el evento no es considerado una frontera compresiva y de acuerdo

3.1. Criterio de selección de los eventos

a lo expuesto en el capítulo 2 pensamos se trata de una cavidad del antechoque.

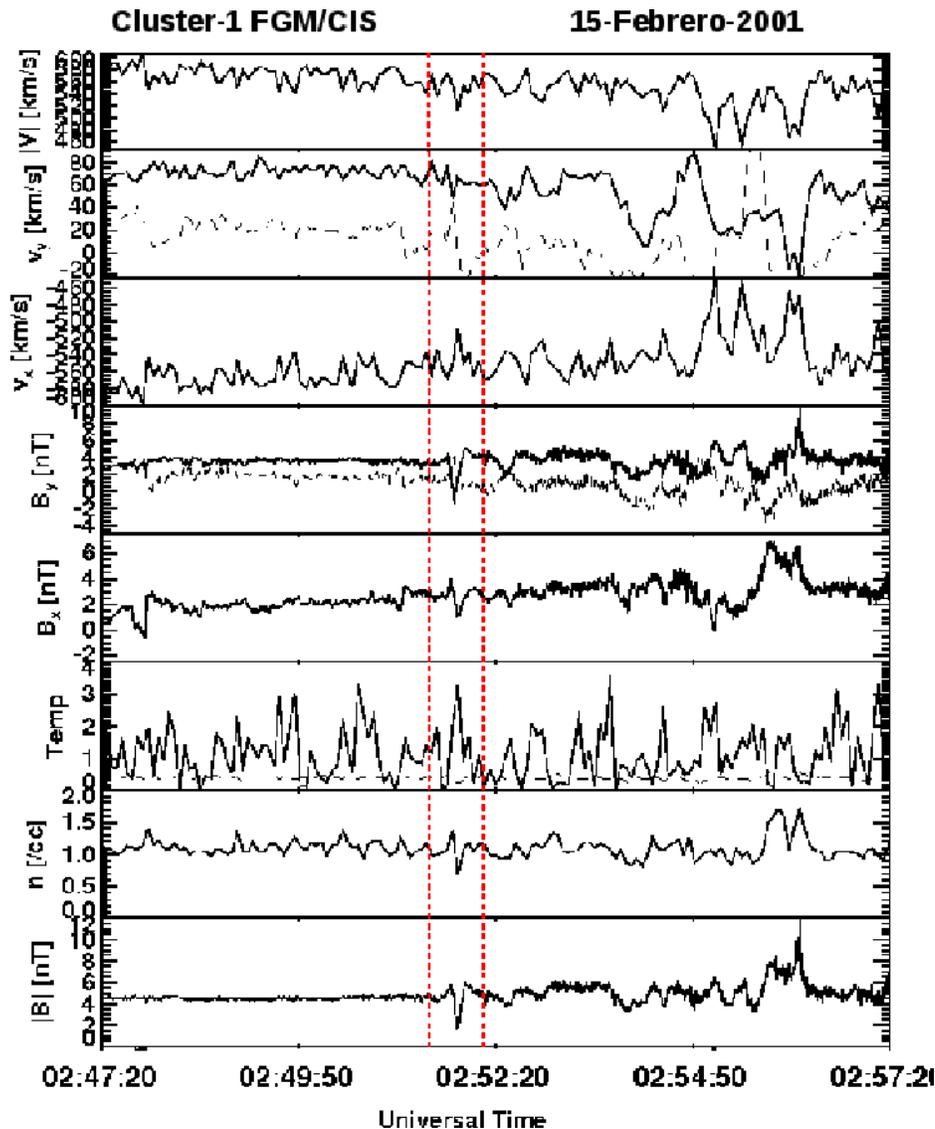


Figura 3.2: Observaciones del 15 de Febrero del 2001 entre las 02:47:20 UT y las 02:57:20 UT. El evento muestra entre líneas verticales rojas una perfil preseleccionado como una FCA. El análisis de los parámetros concluyó que no se trata de una frontera compresiva sino de una cavidad pues el perfil de densidad parece mantenerse alrededor de un valor constante con sólo pequeñas fluctuaciones.

De los eventos seleccionados con este primer examen de campo magnético y densidad se hizo ahora un análisis más detallado para depurar la muestra. En este segundo examen se observó el comportamiento de la magnitud de la velocidad y sus componentes, pues de acuerdo a las predicciones de simulaciones se esperaba que la velocidad del flujo cambie al cruzar la frontera y entonces exista desaceleración y desviación del flujo al cruzar la frontera compresiva.

La temperatura de iones medida por el instrumento HIA no distingue entre dife-

rentes especies de iones y no se utilizó como parámetro de selección de los eventos, pues como se indicó en la sección 2.2.2, el instrumento CIS opera bajo distintos modos dependiendo de la región del antechoque donde se localice la nave. Para los distintos modos de operación los datos pueden incluir las distribuciones completas de iones de energías entre 5 eV y 30 keV, o bien enfocarse sólo en la distribución del viento solar. Para los eventos considerados los modos de operación de CIS fueron MAG-C2, SW-C2 y SW-4, el primero está diseñado para medir distribuciones correspondientes a magnetofunda asociadas a mayores energías que las distribuciones asociadas a los iones del viento solar. Los otros dos modos miden distribuciones de viento solar con prioridad en los iones rebotados. Esta diferencia de modos de operación produce que el perfil de temperatura no se pueda comparar de igual forma para todos los eventos pues mientras los modos de magnetofunda si muestran aumentos bien marcados en la temperatura asociados a las fronteras compresivas, en los modos de viento solar no se observaron incrementos similares o bien el aumento no era claro.

Finalmente la muestra de eventos seleccionados de acuerdo al criterio basado en los resultados de las simulaciones está formada por 38 eventos observados con Cluster 1 en 15 días seleccionadas para analizar, estas fechas están entre los años 2001 a 2005. En el Cuadro 3.1 se muestra una lista de los eventos considerados en este estudio, la fecha de observación y el modo de operación de CIS.

Seguido a la identificación de las FCA correspondió establecer la región correspondiente a la frontera y entonces poder discriminar la FCA de las regiones adyacentes del antechoque y del viento solar puro. Como el perfil de la FCA comienza con una región compresiva se consideró el inicio de la frontera como el punto donde el plasma deja de tener los valores propios del viento solar quieto, es decir, donde inicia el empinamiento de la intensidad del campo y a la par el aumento en la densidad. El otro extremo de la frontera, que sería la interfaz ahora con el antechoque, se determinó como el punto donde los valores de campo y densidad adquirirían valores promedio de antechoque.

3.1. Criterio de selección de los eventos

Fecha (dd/mm/aa)	Hora (TU) (hh:mm:ss)	Modo CIS
15/02/01	00:15:15	SW-4
15/02/01	00:37:00	SW-4
02/02/01	22:32:22	SW-4
02/02/01	22:47:00	SW-4
02/02/01	22:57:15	SW-4
11/02/02	16:12:26	SW-C2
11/02/02	20:35:07	SW-C2
11/02/02	20:41:20	SW-C2
11/02/02	23:03:05	SW-C2
12/02/02	11:18:20	SW-C2
12/02/02	04:20:35	SW-C2
12/02/02	05:11:20	SW-C2
12/02/02	06:20:44	SW-C2
12/02/02	06:44:10	SW-C2
12/02/02	09:37:12	SW-C2
12/02/02	15:48:35	SW-C2
13/02/02	15:33:14	MAG-C2
13/02/02	15:49:50	MAG-C2
13/02/02	16:11:26	MAG-C2
13/02/02	21:29:28	MAG-C2
18/02/02	09:04:26	MAG-C2
18/02/02	10:33:31	MAG-C2
20/02/02	10:35:13	SW-C2
20/02/02	17:52:18	MAG-C2
21/02/02	21:15:00	SW-C2
27/03/02	07:25:25	SW-C2
01/03/03	10:34:00	SW-C2
02/03/03	14:51:17	MAG-C2

continúa en la página siguiente. . .

... continúa de la página anterior		
Fecha (dd/mm/aa)	Hora (TU) (hh:mm:ss)	Modo CIS
13/03/03	06:10:26	MAG-C2
13/03/03	09:50:38	SW-C2
13/03/03	19:17:36	SW-C2
02/04/04	19:43:52	SW-C2
01/03/05	06:26:35	SW-C2
01/03/05	06:46:22	SW-C2
01/03/05	06:26:35	SW-C2
02/03/05	08:41:35	MAG-C2
02/03/05	10:31:03	MAG-C2
02/03/05	10:56:59	MAG-C2
02/03/05	12:14:00	SW-C2

Cuadro 3.1: En la lista aparecen la fecha en la que se observaron las FCA analizadas en este estudio (columna izquierda) en el formato día/mes/año, en la columna central se muestra el momento en el que fue detectada la FCA por la nave (en tiempo universal hh:mm:ss) y finalmente en la columna de la derecha se muestra el modo de operación de CIS cuando se observó la frontera compresiva correspondiente. Todos los eventos se observaron con Cluster-1.

Como hemos venido mencionando tanto en el capítulo anterior como en éste, la frontera compresiva se caracteriza por una región donde el campo magnético y la densidad se incrementan seguida de una región de disminución de ellos, esto en las simulaciones. En todas las FCA observadas podemos notar que esta zona de aumento o compresión existe y su extensión es variable, pues puede ocupar una gran porción de la estructura donde la compresión sea paulatina y ser más grande que la región de decremento o bien puede ser una región pequeña donde el salto de intensidad sea abrupto como en un choque. Esta zona la llamaremos simplemente como *región de compresión* y en la Figura 3.1 correspondería a la zona marcada con la línea morada. La FCA entonces comienza justamente en la región de compresión y termina donde los valores de campo magnético y densidad sólo fluctúan alrededor de los valores correspondientes en el antechoque.

3.1. Criterio de selección de los eventos

3.1.1. Cálculo de amplitudes de campo magnético y parámetros del plasma

El uso de los promedios tanto de campo magnético como de los momentos del plasma son indispensables en el cálculo de las amplitudes correspondientes a los incrementos y decrementos de los mismos parámetros. Los promedios de los parámetros en condiciones previas y posteriores a la FCA se tomaron para distintos intervalos de tiempo, pues en ocasiones al cruzar la frontera compresiva la nave permanecía pocos minutos en el antechoque*. Los periodos promediados se extendían más en casos donde las condiciones estaban muy perturbadas y eran periodos cortos en casos donde existían otros eventos en las cercanías de las FCA. Los intervalos de tiempo fueron considerados lo más cercano posible a la frontera sin considerar sus orillas ni la región central de depresión. Estos intervalos de tiempo fueron lo más extendidos posible en cada caso a fin de tener promedios confiables y fueron desde ~ 2 minutos hasta ~ 30 minutos.

Las cantidades calculadas a partir de los datos fueron las amplitudes de la magnitud del campo magnético, densidad y magnitud de la velocidad: $\delta B/B$, $\delta n/n$, $\delta V/V$ normalizadas respecto a los valores ambientes, las presiones del plasma y magnética, y finalmente el ángulo entre el CMI y la dirección del viento solar θ_{BV} . Las amplitudes del campo magnético y la densidad fueron calculadas considerando los valores máximos del parámetro en la FCA pues nos interesa saber qué tan grande es el salto en el parámetro o sea, qué tan intensa o fuerte es la frontera compresiva; la expresión usada para los cálculos de las amplitudes es

$$\frac{\delta X}{X} = \frac{X_{max} - \langle X_{vs} \rangle}{\langle X_{vs} \rangle} \quad (3.1)$$

donde X es B , B_x , B_y , B_z o n y el subíndice vs indica que ese valor está considerado en la región del viento solar prístino. Dado que nos interesa conocer qué tan desacelerado es el flujo del viento solar al encontrarse con la FCA, la amplitud de la magnitud de la velocidad se calcula usando el valor mínimo de éste parámetro al interior de la frontera, de manera que

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{\langle V_{vs} \rangle - V_{min}}{\langle V_{vs} \rangle} \quad (3.2)$$

*Recordemos que el antechoque, el choque y la magnetósfera no son estáticos y su extensión espacial es variable debido a los cambios que sufre el viento solar.

Las cantidades que involucraron datos tanto de campo magnético como de plasma se calcularon usando una resolución de 4 vectores por segundo; éstas cantidades fueron las presiones del plasma y magnética así como el ángulo entre el CMI y la dirección del viento solar, θ_{BV} .

La presión del plasma se calculó a partir de la Ecuación A.3 del Apéndice A

$$p_{gas} = nk_B(T_p + T_e)$$

y la temperatura de los iones se calculó según Hubert y LeBlanc (2005)

$$|T| = \frac{1}{3}T_{\parallel} + \frac{2}{3}T_{\perp} \quad (3.3)$$

por otro lado la presión magnética se calcula con la Ecuación A.4 del Apéndice A

$$p_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

El Número de Mach Alfvénico se calculó según lo descrito en el Apéndice A en la Ecuación A.11.

Por último el ángulo θ_{BV} se calculó como el ángulo entre dos vectores, vector de campo magnético y vector de velocidad, para lo que primero se calcularon los promedios de las componentes de ambos vectores en la región del viento solar.

3.2. Ejemplo de una FCA

Las gráficas de todos los eventos que presentaremos a lo largo de este capítulo tienen el siguiente esquema en sus paneles (de arriba a abajo): el promedio de la magnitud de las componentes de la velocidad del viento solar V_y (línea sólida) y V_z (línea punteada), la componente V_x , todas en kilómetros por segundo (km/s); las componentes del campo magnético B_y (línea sólida) y B_z (línea punteada), la componente B_x , en nanoTeslas (nT); el ángulo θ_{BV} en grados ($^{\circ}$); la presión total (del plasma más la magnética) en nanoPascuales (nPa), la magnitud de la velocidad del viento solar, $|V|$, en kilómetros por segundo (km/s); las temperatura paralela (línea sólida) y/o perpendicular (línea punteada) de iones en millones de Kelvin, (MK); densidad en partículas por centímetro cúbico (part/cm³) y finalmente el promedio de la magnitud del campo magnético también en nanoTeslas (nT). El tiempo de graficación para todos los eventos es de 10 minutos, centrando la FCA con el objetivo de poder observar cualquier cambio en el plasma de las vecindades de la frontera.

3.2. Ejemplo de una FCA

La Figura 3.3 muestra un ejemplo de una frontera compresiva observada por Cluster 1 el día 11 de Febrero del 2002 alrededor de las 16:12:26 UT cuando Cluster se encontraba río arriba del choque de proa antes de la región del mediodía en el punto (16.60, 7.13, 3.76) R_E GSE. Antes de encontrar la FCA el viento solar llevaba un velocidad promedio de 582.983 km/s con un campo magnético promedio de 8.16 nT. El viento solar se muestra prácticamente quieto en el perfil de $|B|$ y el CMI tenía una configuración bastante oblicua con un ángulo de cono de $\sim 76^\circ$. En este primer ejemplo se observa una firma de poca amplitud pero bien definida de la frontera con una región compresiva seguida de la zona de depresión en campo magnético mientras que en la densidad la firma no es tan clara porque el plasma muestra mayores perturbaciones en este parámetro, sin embargo la firma se alcanza a observar. El evento tuvo una duración de 14 s y una longitud de 186.68 longitudes inerciales (c/ω_p) y la correspondiente región compresiva tuvo una extensión de 70.63 c/ω_p . Durante el evento el instrumento CIS operó en un modo de viento solar donde los momentos del plasma se encuentran bien determinados lo que implica que en los datos de temperatura no se observe algún cambio significativo en la frontera compresiva. En el caso de la presión total sucede lo mismo. La amplitud del campo magnético fue de $\delta B/B = 0.21$ indicando que es una FCA con una firma que aunque es clara es poco empinada; al interior del evento el campo disminuyó hasta 6.63 nT lo que representa una disminución del 19% del valor ambiente. Sólo las componentes y y z del campo magnético muestran la firma de la FCA bien definida y en la componente B_x aunque la firma también se distingue, la región del viento solar exhibe algunas perturbaciones. Esta misma componente del campo y $|B|$ muestran algunas ondas compresivas en la región del antechoque. Las ondas en la densidad tienen una amplitud $\delta n/n_0 \sim 0.15$ mientras que las ondas en B_x tienen una amplitud de $\delta B_x/B_0 \sim 0.2$ y en la magnitud del campo $\delta B/B_0 \sim 0.15$. La densidad tuvo una amplitud de 0.45 que concuerda con la firma tan pronunciada que exhibe ese perfil en la FCA. La magnitud de la velocidad muestra claramente que el flujo es desacelerado en un 13% y alcanza un valor mínimo al interior de la frontera de 509.34 km/s. En amplitud la componente y de la velocidad es la que reporta una desviación más grande con una depresión del 82% del valor ambiente, pues pasa de 21.43 km/s en el viento solar a 3.79 km/s al interior de la frontera. El ángulo de cono mostró una variación importante cambiando de $\sim 76^\circ$ en el viento solar a $\sim 46^\circ$ en el antechoque, lo que significó un cambio del 40% del ángulo de cono del CMI. El Número de Mach Alfvénico de este evento fue de 6.05.

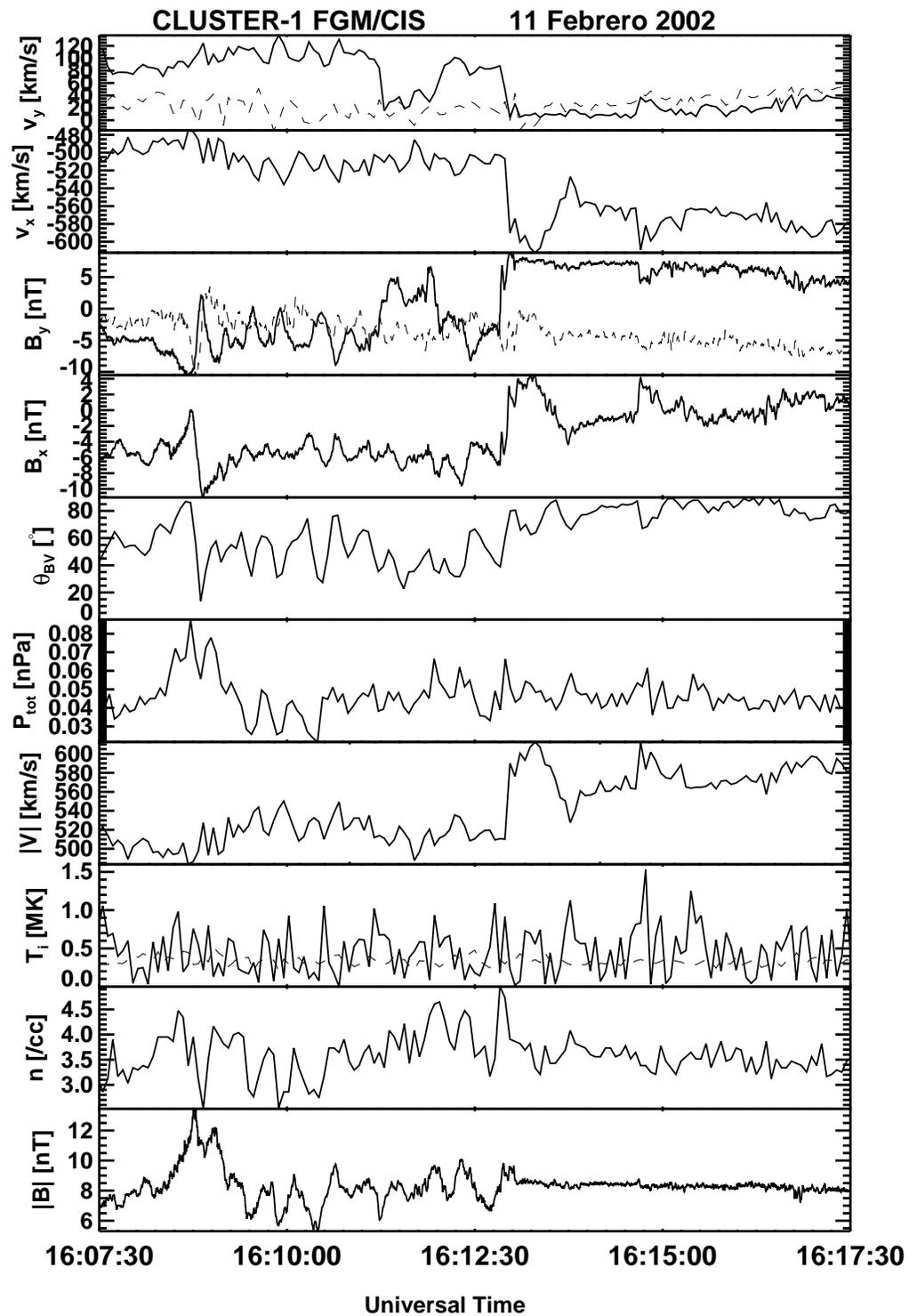
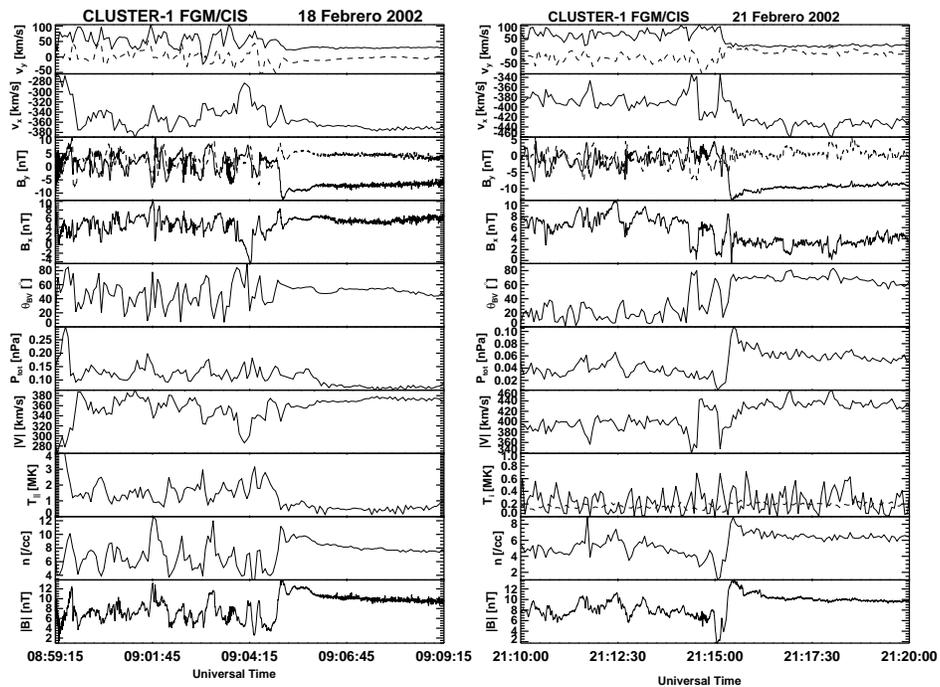


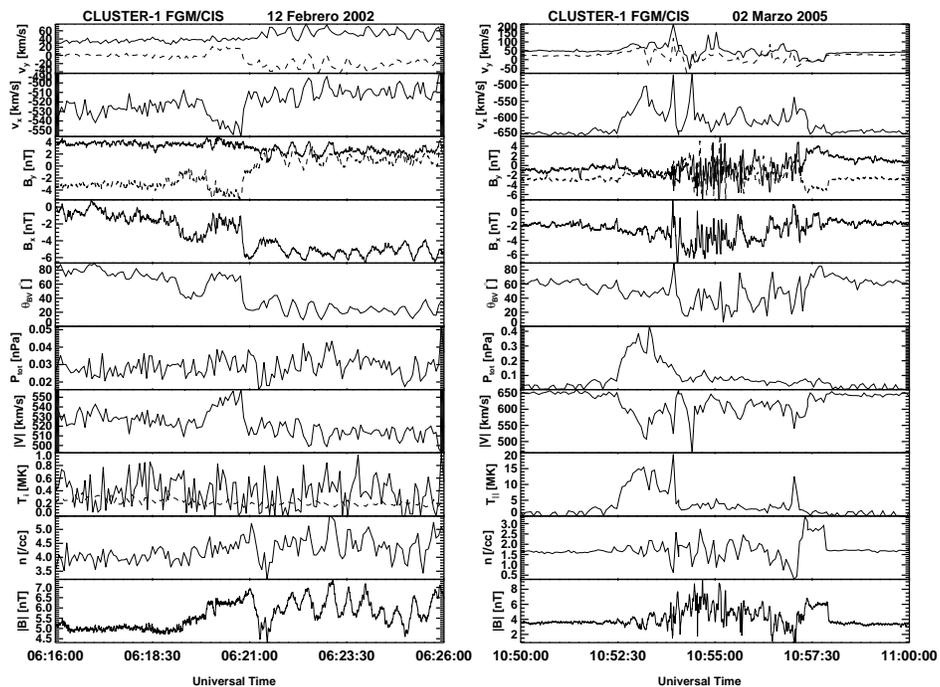
Figura 3.3: FCA observada el 11 de Febrero del 2002 alrededor de las 16:12:26 UT por Cluster 1 que se encontraba en $(16.60, 7.13, 3.76)R_E$ GSE. Los perfiles de campo magnético y momentos del plasma muestran una firma típica de las fronteras compresivas que se estudian en este trabajo. Al observarse este evento, el instrumento CIS operaba en un modo de viento solar.

3.2. Ejemplo de una FCA



(a) $V_{vs} = 366.58 \text{ km/s}$, $\theta_{BV} = 52^\circ$
 $M_A = 5.04$

(b) $V_{vs} = 427.56 \text{ km/s}$, $\theta_{BV} = 58^\circ$
 $M_A = 5.15$



(c) $V_{vs} = 527.79 \text{ km/s}$, $\theta_{BV} = 65^\circ$
 $M_A = 9.65$

(d) $V_{vs} = 640.99 \text{ km/s}$, $\theta_{BV} = 58^\circ$
 $M_A = 11.19$

Figura 3.4: En la figura se observan cuatro eventos de fronteras compresivas que son casos de estudio para el caso en que la velocidad del viento solar varía entre 300 y 600 km/s.

3. Análisis de datos y Resultados

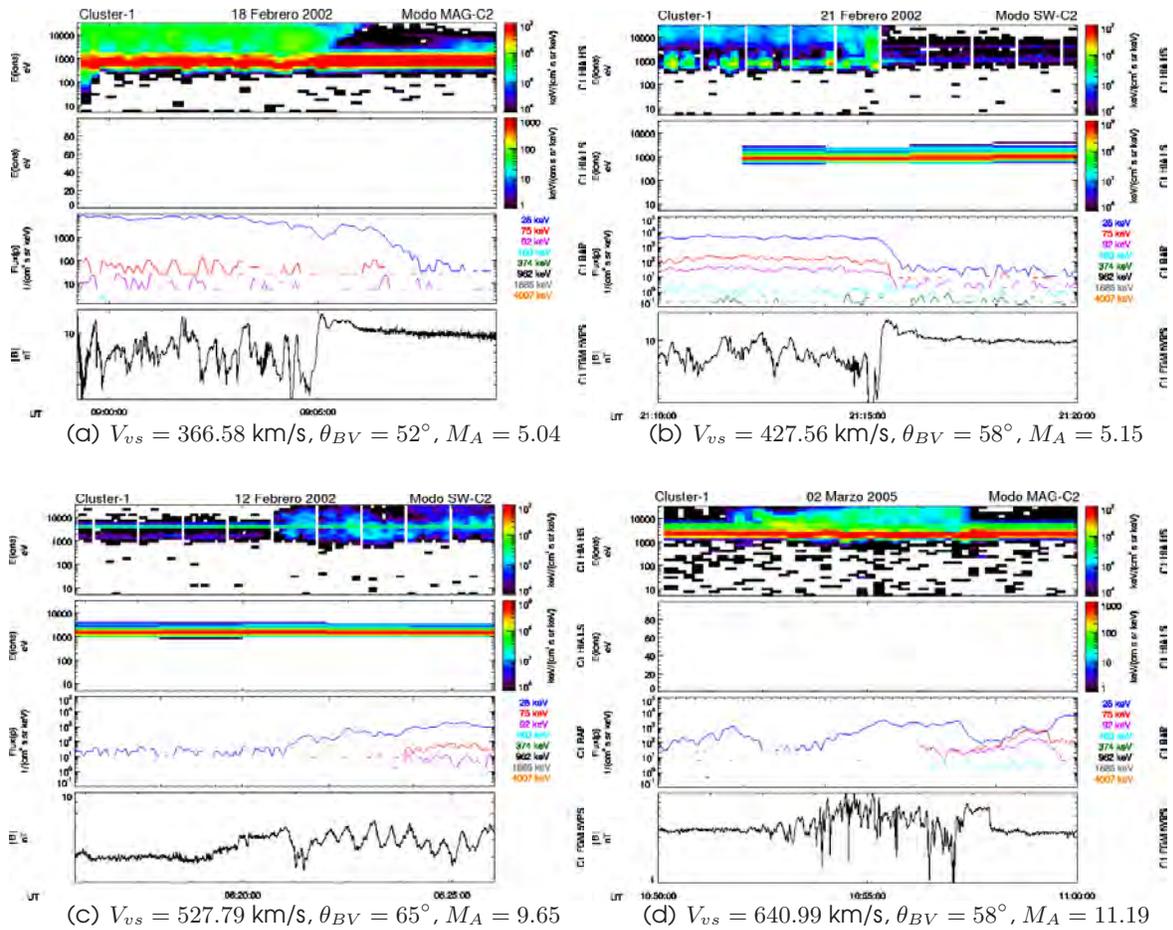


Figura 3.5: En la figura se observan los cuatro eventos de la figura anterior ahora con los espectros de energía de los instrumentos HIA (para ambos sectores geométricos) y RAPID.

3.3. Casos de estudio

A continuación se presentan algunos ejemplos observados por Cluster 1 que han sido clasificados de acuerdo a la velocidad con la que el viento solar alcanza el antechoque y de acuerdo al ángulo θ_{BV} . En la primera clasificación se tomaron cuatro ejemplos de la muestra que fueron formados bajo distintas velocidades del plasma del viento solar con el objetivo de estudiar las características de las FCA y verificar si las fronteras observadas reproducen los resultados que han arrojado las simulaciones los cuales indican que la intensidad de la FCA depende de la velocidad del viento solar. Dado que las simulaciones estudian casos donde varía la velocidad del viento solar bajo una misma geometría del CMI en estos primeros cuatro casos de estudio se consideró un ángulo θ_{BV} similar para acotar variaciones debidas al cambio del ángulo de cono, el intervalo en el que se consideró el ángulo de cono para estos casos de estudio fue $[52^\circ, 65^\circ]$.

Para la clasificación según el ángulo θ_{BV} se escogieron otros eventos formados a diferentes geometrías del IMF para estudiar como cambia la estructura FCA con la geometría de θ_{BV} , de igual manera si hay una dependencia de su intensidad.

3.3.1. Casos de estudio según la velocidad del viento solar

La Figura 3.4 muestra cuatro fronteras compresivas del antechoque y en el Cuadro 3.2, al final de esta sección, se presentan valores calculados para algunas de las características de las FCA. La Figura 3.4(a) presenta un evento ocurrido en Febrero 18 del 2002 a las 09:04:26 UT, Cluster 1 se encontraba en $(9.83, 5.31, 8.10)R_E$ GSE; esto es en la zona del atardecer río arriba del antechoque y durante esta órbita la nave venía de la magnetofunda donde estaba antes de las 08:59:03 UT. La velocidad promedio del viento solar (V_{vs}) fue de 366.581 km/s que corresponde a un viento solar lento que tiene un campo magnético promedio de 9.21 nT, el ángulo θ_{BV} fue de 52° . En este evento el instrumento CIS estuvo operando en el modo MAG-C2 que mide poblaciones supertérmicas con el factor geométrico de alta sensibilidad y aunque también mide el haz del viento solar esto lo hace con menor definición, Rème et al. (2001). Este modo operacional permite observar el aumento en las componentes de la temperatura en la distribución supertérmica en la frontera compresiva; sin embargo el máximo de temperatura se encuentra casi al final de la FCA (en la transición con el antechoque) donde alcanza un valor máximo de $|T| = 1.03$

MK. Se pueden observar ondas de alta frecuencia en la región del viento solar y la estructura de la FCB está bien definida en la magnitud del campo magnético y en la componente B_y . Considerando el promedio de la velocidad del viento solar se estimó una duración del evento de 54 s y un tamaño de $240.91 c/\omega_p$, la correspondiente región compresiva* tuvo una duración de 28.1s y un tamaño de $125.36 c/\omega_p$. El campo magnético tuvo una amplitud de $\delta B/B = 0.5$ lo que significa que B se incremento en un 50% del valor ambiente en la región inicial de la FCA pasando de 9.21 nT a 13.82 nT. La componente B_y del campo magnético tuvo una rotación al cruzar la frontera y ya en el antechoque oscila entre los valores -5 nT y 5 nT. En las componentes x y y del campo magnético se observan ondas de alta frecuencia. La amplitud de la densidad fue de $\delta n/n = 0.47$ indicando que hubo bastante compresión en este parámetro (se eleva hasta 11.19 part/cm^3 en la zona compresiva de la frontera) y además la depresión de la densidad dentro de la frontera tuvo un valor similar (disminuyó $\sim 48\%$). Sí hubo desviación en el flujo y el decremento calculado para la magnitud de la velocidad fue $\delta V/V = 0.1$. La presión total del plasma siguió un comportamiento similar al de la temperatura paralela de los iones, que es la que se grafica en este caso y dado que el modo de CIS era de magnetofunda (que operaba básicamente igual a un modo magnetosférico) tanto la temperatura como la presión del plasma son aproximadas. El CMI cambió su configuración de 52° en el viento solar a 45° en el antechoque. El Número de Mach Alfvénico para este evento fue de 5.04. En los gráficos de la Figura 3.5 se muestran cuatro paneles que indican, de arriba a abajo: el espectro omnidireccional de energía de iones medido por HIA con el sector de alta sensibilidad (HS**), el espectrograma omnidireccional de iones medido por HIA con el sector de baja sensibilidad (LS), el flujo de protones medido por RAPID para los canales de energía de 28 keV, 75 keV, 92 keV, 160 keV, 374 keV, 962 keV, 1885 keV y 4007 keV; finalmente el panel inferior muestra la intensidad del campo magnético. Cabe mencionar que en aquellos gráficos donde el panel de HIA-LS aparece en blanco es porque el instrumento no tenía operando ese factor geométrico. Esto ocurre en el caso de los modos de operación magnetosféricos de CIS. En el espectro de energía de HIA-HS de la Figura 3.5(a) se observan iones supertérmicos en la región del antechoque (09:00:00 UT – 09:05:00 UT) y el haz del viento solar se observa en aproximadamente 1 keV aunque éste se halla mal re-

*Que la denotaremos por el subíndice c en los parámetros de que se trate.

**Como se indicó en el capítulo 2, los factores geométricos de CIS son *high-G* y *low-g* que también se conocen como *HS* y *LS*, respectivamente.

3.3. Casos de estudio

suelto por el sector HS; recordemos que el sector de alta sensibilidad de HIA mide tanto iones supertérmicos como la distribución del viento solar aunque ésta última con mala resolución. Lo que si es apreciable es el gran aumento en la intensidad de los iones supertérmicos en la región compresiva de la FCA, $\sim 09:05:00$ UT, pues a la población con energías cercanas a los 1 keV se le sumaron iones calientes de entre 1 keV y 3 keV. Dado que se están midiendo poblaciones supertérmicas en MAG-C2 sí se observa un aumento en la temperatura pero recordemos que este parámetro, como los otros momentos del viento solar, es sólo una aproximación cuando se está en un modo magnetosférico. El flujo de protones de RAPID muestra información importante en el canal de menor energía, 28 keV, pues justamente es alrededor de los 30 keV la mayor energía que alcanzan los iones supertérmicos de HIA-HS. En el rango de los 28 keV el flujo permanece constante en la región del antechoque y cuando cruza la FCA el flujo comienza a disminuir hacia la zona del viento solar. RAPID muestra un resultado importante y es que el flujo disminuye tiempo después de haber cruzado la FCA, en una región todavía dentro de la frontera de iones de donde se concluye entonces que la frontera compresiva se encuentra al interior de la frontera de iones. Por otro lado, como las ondas que se observan en el antechoque están más evolucionadas y el viento solar está permeado de oscilaciones de alta frecuencia el resultado obtenido con RAPID se refuerza y además podemos decir que la FCA se encuentra también dentro de la frontera de ondas FUB.

En la Figura 3.4(b) se presenta una FCB observada en Febrero 21 del 2002 a las 21:15:00 UT, momento en el que la posición de Cluster 1 era $(16.67, 0.2, -5.5828, 8.10)R_E$ GSE de manera que se encontraba en el antechoque al sur de la zona del mediodía. El viento solar se movía hacia el choque de proa con $V_{vs} = 427.560$ km/s y al igual que el ejemplo anterior se formó bajo condiciones de viento solar lento. En este caso el viento solar es puro (sin perturbaciones) y el campo magnético promedio que se calculó para dicha región es de 9.52 nT con un $M_A = 5.15$ y un ángulo de cono de $\theta_{BV} = 57^\circ$ hasta las 21:15:00 UT donde se formó la FCA. El modo de operación de CIS fue SW-C2 que mide principalmente el haz del viento solar con el factor geométrico de LS, este modo es capaz de incluir iones supertérmicos al entrar en funcionamiento el sector de alta sensibilidad HS. Sin embargo, vale la aclaración de que los momentos del viento solar en este modo están medidos con el sector LS y quedan completamente bien definidos y como en este sector no se incluyen iones calientes entonces el perfil de la temperatura del viento solar no muestra ningún cambio. A comparación del caso de estudio anterior

donde la temperatura total incluía la distribución supertérmica, en este caso CIS-LS detecta principalmente el haz del viento solar por lo que no se observan cambios importantes en la temperatura lo que sugiere que la distribución supertérmica es la responsable de los incrementos en este parámetro, es decir, el viento solar no es calentado en la frontera sino que la presencia de iones supertérmicos aumenta la temperatura. El antechoque muestra ondas menos evolucionadas que en el caso de estudio anterior, esto es, las ondas que se observan junto a la FCA tienen una amplitud menor que en el caso anterior indicando que son ondas menos desarrolladas, lo que puede significar que la FCA se encuentra más lejos de la región de crecimiento de ondas, es decir, del antechoque de ondas FUB. El perfil de la FCA se observa claramente en la densidad y el campo magnético. La duración y el tamaño calculados fueron de 43.5 s y $201.39 c/\omega_p$, mientras que para la región compresiva fueron de 24 s y $111.11 c/\omega_p$. La densidad sufre un salto del 42 % sobre el valor ambiente alcanzando un valor de 8.86 part/cm^3 en el interior de la FCA para luego disminuir y tomar un valor medio en el antechoque. La intensidad del campo tuvo un incremento del 44 % en la parte compresiva de la frontera y la depresión asociada bajó un 80 % del valor ambiente; estos cambios hacen que la firma de esta estructura sea una firma muy bien marcada en el perfil de la intensidad del campo magnético. La componente B_x no muestra un cambio abrupto al encontrarse con la FCA y el cambio de valores entre las regiones de viento solar y antechoque es paulatino. Por otro lado la componente B_y tiene una rotación importante al interior de la frontera compresiva pasando de -13.51 nT a 6.34 nT en el antechoque después de lo cual oscila entre -5 nT y 5 nT . El perfil de este evento indica que después de la FCA la magnitud del campo magnético y la densidad toman valores típicos del antechoque y permanecen por debajo de los valores de viento solar. Se observan claramente desviaciones de flujo en todas las componentes de la velocidad, la velocidad se ve disminuida en el antechoque en alrededor de un 7 % del valor correspondiente en el viento solar, pasando de 427.56 km/s en el viento solar a 397.82 km/s en el antechoque. La componente V_y presenta una amplitud $\delta V_y/V_{y,sw} B=2.85$ en la FCA lo que implica que ésta componente aumentó su valor por ese factor. La presión total en este caso siguió el comportamiento de la magnitud del campo en respuesta a que no se observaron cambios en la temperatura del viento solar, y lo que se observa es que ésta aumenta al pasar del antechoque al viento solar. El ángulo de cono tuvo una gran variación a través de la frontera compresiva pasando de una configuración oblicua, 57° , a una configuración casi radial de 21° ,

3.3. Casos de estudio

esto corresponde a una disminución del 63% del ángulo de cono. El Número de Mach Alfvénico calculado para este evento fue de 5.15. En el espectro de iones de HIA-HS de la Figura 3.5(b) muestra principalmente dos poblaciones de iones, una población de iones con energías entre 400 eV y 1keV que corresponden a un remanente de la distribución del viento solar que este sector alcanza a medir; y luego una población de iones supertérmicos (posiblemente difusos) de entre 2 keV y 30 keV. En ambas poblaciones se observan incrementos de intensidad en la zona de depresión del campo magnético de la FCA y luego disminuyen drásticamente en la región del viento solar. Este espectro también muestra algunos iones supertérmicos atrapados justo en la depresión de la FCA, que se ven como una región ancha en tono verde con la parte inferior un tono amarillo. El espectro de energías de CIS-LS muestra el haz del viento solar a partir de las 21:12:00 UT aproximadamente, pues antes de ese tiempo el modo de CIS era magnetosférico donde no opera el factor de baja sensibilidad. El haz del viento solar se muestra básicamente alrededor de 1 keV. Los protones medidos por RAPID muestran una disminución en el flujo de ellos que ocurre al mismo tiempo que la FCA; esto en los canales de 28 keV, 75 keV, 92 keV. Por ejemplo, el flujo de protones de 28 keV muestra una disminución de 2.5×10^3 $\text{part/s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$ a 30 $\text{part/s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$. A diferencia del ejemplo anterior, en este caso el flujo de protones está correlacionado con la FCA disminuyendo al mismo tiempo que el campo magnético y no más allá de la FCA; además las ondas vistas en el antechoque están menos desarrolladas. En este caso, al cruzar la frontera compresiva nos encontramos directamente con el viento solar prístino, a diferencia del caso anterior donde aún habiendo cruzado la FCA todavía nos encontramos en una región del antechoque de iones (de acuerdo a los espectros de RAPID).

En la Figura 3.4(c) se presentan observaciones del 12 de Febrero del 2002. A las 06:20:44 UT se forma la FCA cuando las coordenadas de Cluster 1 eran $(17.43, 3.90, -4.19)R_E$ GSE y se encontraba río arriba del choque después de la región del mediodía por arriba de la eclíptica. En estas observaciones la nave venía de la región del viento solar hacia el antechoque moviéndose hacia la magnetósfera. Antes de encontrarse a la frontera compresiva el viento solar tenía una velocidad promedio de $V_{vs} = 527.799$ km/s, que es un valor promedio para el viento solar a la altura de la órbita de la Tierra, y un ángulo de cono $\theta_{BV} = 64^\circ$. Se observan ondas compresivas con amplitudes $\delta B_x/B_0 \sim 0.27$ en la componente x , $\delta B_y/B_0 \sim 0.37$ en la componente y y las más compresivas resultaron en la componente z con $\delta B_z/B_0 \sim 1.16$,

para $|B|$ las ondas mostraron amplitudes de $\delta B/B_0 \sim 0.20$; todas en la región correspondiente al antechoque. De igual forma la densidad mostró algunas ondas pero poco compresivas con amplitudes $\delta n/n_0 \sim 0.10$. Por otro lado el viento solar se observa ligeramente perturbado con un promedio de la magnitud del campo magnético de 4.91 nT. El modo en el que operó CIS fue SW-C2 y como dijimos antes, debido a que los momentos del viento solar quedan definidos por el sector LS, no se observan aumentos en la temperatura total de los iones en la frontera compresiva ni un comportamiento específico. El cambio en la magnitud del campo magnético al iniciar la FCA es gradual y se da en un intervalo de tiempo mayor que en los ejemplos anteriores formando una estructura de mayor extensión: $292.98 c/\omega_p$ y duración de 61 s. La región de compresión asociada tiene una duración de 23.5 s y un tamaño de $112 c/\omega_p$. Las amplitudes de campo magnético y densidad no cambian drásticamente respecto a los casos 3.4(a) y 3.4(b), en este caso $\delta B/B = 0.42$ y $\delta n/n = 0.36$, indicando que se comprimió más el campo magnético que la densidad y el resultado es una FCA de mediana intensidad. A diferencia de los dos casos anteriores ahora es la componente B_z la que sufre una rotación al cruzar la FCA pasando de -2.43 nT a 1.43 nT en el antechoque después de lo cual oscila entre ~ 0 nT y 4 nT. Otra variación notable del campo es en la componente B_x que disminuye su valor en casi la mitad (44%) al cruzar la frontera. La componente del campo B_y es la que experimenta la menor perturbación pues no varía mucho de una región a otra; en el viento solar tiene un valor promedio de 3.39 nT y en el antechoque de 3.08 nT. Durante este evento la velocidad dentro de la FCA decreció hasta un 4% del valor ambiente y la mínima velocidad alcanzada fue de 508.715 km/s; una vez en el antechoque el flujo sólo alcanzó una velocidad un poco menor que la medida en el plasma prístino del viento solar lo que correspondió a una desaceleración del 3% respecto a éste flujo. La componente radial de la velocidad V_x pasó de -526.353 km/s en el viento solar a -507.264 km/s en el antechoque que se traduce en una disminución del 4%, recordemos que el signo negativo en el sistema GSE nos está indicando que el flujo se mueve hacia la Tierra. El Número de Mach Alfvénico para este caso es de $M_A = 9.65$. El ángulo de cono cambió en un 60%, pasando de una configuración de $\theta_{BV} = 64^\circ$ a $\theta_{BV} = 25^\circ$. El espectro de iones de HIA-HS de la Figura 3.5(c) muestra iones de alrededor de 2 keV que son parte del viento solar medido por este sector del instrumento; luego se observa un aumento de iones supertérmicos al comenzar la FCA con energías desde 1 keV hasta 30 keV. Esta última población de iones parece tratarse de partículas menos procesadas que en el caso de estudio ante-

3.3. Casos de estudio

rior, esto puede verse en el espectro de HIA-HS pues hay una menor intensidad de iones y estos alcanzan principalmente energías menores a 2 keV; además las ondas exhibidas en el campo en esta región tienen una forma muy sinusoidal. El haz del viento solar detectado por HIA-LS se mantuvo entre 1 y 3 keV. El flujo de protones de RAPID sólo alcanza mostrar incremento en el canal de 28 keV y este incremento se da a partir de la frontera compresiva, pasando de $10 \text{ part/s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$ en promedio en el viento solar a $9 \times 10^3 \text{ part/s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$.

Finalmente la Figura 3.4(d) muestra un evento observado en Marzo 02 del 2005 a las 10:56:59 UT (9.75, 4.87, 3.82) R_E GSE, esto es río arriba del choque en la parte norte pasando la región del mediodía donde los instrumentos de CIS operaron en el modo MAG-C2. La velocidad del viento solar en la región del viento solar (10:57:56 UT – 11:03:00 UT) fue de $V_{vs} = 640.995 \text{ km/s}$ que es un viento solar rápido con un promedio en la magnitud del campo magnético de 3.44 nT. En este evento tenemos que la nave entró al antechoque y salió después de algunos minutos. Esta FCA se caracteriza particularmente por una estructura tipo choque justo como lo predicen las simulaciones de Omidi et al. (2009) para M_A altos, aquí $M_A = 11.19$. Esto implicó una fuerte compresión en el campo magnético y la magnitud del mismo casi se duplicó al iniciar la frontera. Análogamente la densidad aumentó en un factor ~ 2 , 1.71 part/cm^3 a 3.36 part/cm^3 . En contraparte los valores mínimos de campo magnético y densidad fueron: 0.91 nT y 0.29 part/cm^3 . Por otro lado, se observan rotaciones en las componentes y y z del campo magnético. La magnitud de la velocidad decrece hasta 540.06 km/s, esto es una amplitud $\delta V/V = 0.16$ aunque la mayor desviación se muestra en la componente V_x pues pasó de -639.21 km/s en el viento solar a -537.14 km/s esto es una disminución en valor absoluto del 16%. Las componentes y y z también sufren decrementos. La duración de la frontera compresiva fue de 57 s con una extensión de $242.19 c/\omega_p$. La configuración del viento solar en ese momento reporta un ángulo de cono de $\theta_{BV} = 58^\circ$ para luego cambiar a un valor de $\theta_{BV} = 40^\circ$ lo que significó un cambio de $\sim 30\%$. El modo de operación de CIS nos permite observar un aumento importante en la temperatura paralela de los iones alcanzando los 13 MK y justo en la zona de depresión de B y n en la FCA, la temperatura paralela y estos dos parámetros se encuentran anticorrelacionados lo que nuevamente nos indica como en el evento (a), el viento solar no es calentado en la frontera sino que son los iones supertérmicos presentes en el antechoque los responsables del incremento en la temperatura total del plasma. Aunque la presión del plasma sigue un comportamiento muy similar al de la temperatura paralela, co-

no puede observarse en los paneles correspondientes, la presión no muestra ningún cambio importante en la FCA. En el cruce del antechoque de las 10:52:30, previo a la FCA, la presión total siguió el mismo comportamiento que la temperatura paralela la cual se incrementó gradualmente de en promedio 1 MK a 15 MK; análogamente la presión total aproximada se incrementó de en promedio 0.03 nPa a ~ 0.43 nPa también de forma gradual. Este evento también muestra ondas en el campo magnético y la densidad con amplitudes de $\delta B_x/B_0 \sim 0.69$ en la componente x , $\delta B_y/B_0 \sim 2.42$ en la componente y y las más compresivas resultaron en la componente z con $\delta B_z/B_0 \sim 2.87$, para $|B|$ las ondas mostraron amplitudes de $\delta B/B_0 \sim 0.61$ y para la densidad se observaron algunas ondas con amplitudes $\delta n/n_0 \sim 0.47$. Como podemos darnos cuenta al comparar las amplitudes de las ondas vistas en este evento y en el caso anterior, 06:20:44 UT del 12 de Febrero del 2002, las ondas en este cuarto caso resultan ser mucho más compresivas que en el caso anterior. Habíamos mencionado al principio de este caso de estudio que la frontera compresiva fue formada por un viento solar rápido lo que implicó que fuera un evento más intenso que aquellas fronteras reportadas para un viento solar lento. En el espectro de energía de iones de HIA-HS de la Figura 3.5(d) se observa, aunque con poca definición, el haz correspondiente al viento solar (en rojo) y un aumento en los iones supertérmicos en la región donde la nave permanece en el antechoque. El mayor incremento de iones supertérmicos, que muy posiblemente se tratan de iones difusos pues están bastante procesados, se encuentra justo donde la firma del campo magnético exhibe la depresión de la FCA (antes de cruzarla); en este punto se tienen iones difusos que van de 3 keV a 30 keV mientras que a lo largo de los 10 minutos de observación el haz del viento solar mantuvo energías menores (1keV –3 keV). Debido a que este evento se observó en un modo magnetosférico el sector LS de HIA no estaba en funcionamiento y por lo tanto no hay espectro de energía de este sector. El flujo de protones medido por RAPID también muestra el incremento que mencionamos en el espectro de HIA-HS, este incremento corresponde a cuando cruza el antechoque cerca de las 10:54:00 UT y luego donde vuelve a cruzar y se encuentra a la FCA. Estos incrementos son observables sólo en el canal de los 28 keV.

Efecto de la velocidad del viento solar

En el Cuadro 3.2 se enlistan las cuatro FCA descritas previamente, las columnas corresponden a (de izquierda a derecha): fecha, velocidad del viento solar,

3.3. Casos de estudio

tamaño de la estructura completa x_t y de la región compresiva x_c , ángulo de cono; amplitud del campo, la densidad y la velocidad, Número de Mach Alfvénico. La última columna indica la amplitud de velocidad entre las zonas de viento solar y antechoque normalizada a valores de viento solar prístino.

Al aumentar la velocidad del viento solar, y por tanto el Número de Mach del choque, se observa una tendencia a que la FCA se hace más intensa, es decir, las amplitudes de la densidad y el campo magnético se vuelven más grandes por que hay una mayor compresión del plasma. Aunque no hay una relación lineal al respecto. Lo que si es concluyente de los casos de estudio expuestos aquí es que la firma de la frontera compresiva si sufre cambios específicos con la velocidad observándose que para velocidades altas la FCA aparece más empinada y como en el cuarto caso se presenta más como un pequeño choque.

Por otro lado, para los cuatro casos aquí expuestos la extensión de la frontera compresiva no tiene una tendencia clara en cuanto a que aumente al incrementarse la velocidad del viento solar tal y como muestran los resultados de simulación, Omidí et al. (2009). Lo mismo sucede con la región de compresión de la FCA. Hay que señalar que el hecho de no obtener una clara tendencia lineal al respecto depende de varios aspectos; uno de ellos es que debemos considerar que la nave no necesariamente cruzó la FCA por donde ésta es más ancha o bien la nave cruzó en una trayectoria no transversal sino más bien diagonal provocando que la nave tenga sobreestimada su duración, en resumen, el no cruzar la frontera por su parte central o por donde es más ancha puede modificar que las observaciones no sean exactamente igual a las predicciones de simulaciones. Otro aspecto importante es que tenemos regiones mucho más dinámicas que las planteadas en las simulaciones. En las observaciones el plasma del viento solar cambia frecuentemente el valor de sus momentos o bien la configuración del ángulo de cono mientras que en las simulaciones se inyecta un viento solar con parámetros, como la velocidad, que permanecen constantes o bien la interacción entre el viento solar y el plasma magnetosférico se da bajo condiciones de un ángulo de que no varía o de un Número de Mach constante. También habría que considerar que la FCA tendría un grosor variable dependiendo de que tan lejos se ha cruzado la frontera respecto al choque de proa, pues es claro en las simulaciones (ver Figura 1.25 del capítulo 1) que la FCA se va ensanchando en las regiones más cercanas al choque. En conclusión, existen muchos parámetros abiertos que provocan que la relación entre la extensión de la FCA y la velocidad del viento solar no sea lineal como resulta en las

simulaciones.

Para velocidades muy altas (>600 km/s) cuando la frontera se asemeja a un choque la zona de transición se acorta, es decir, la FCA y su correspondiente región compresiva tienen una menor extensión; esto al considerar la región compresiva respecto al tamaño de la estructura completa. Esta afirmación es válida aún cuando la FCA no haya sido cruzada por su parte más ancha, pues de ser éste el caso la firma se vería igualmente como un choque y en todo caso lo que se tendría es una duración y extensión subestimadas.

FCA	V_{vs} (km/s)	x_t (c/ω_p)	x_c (c/ω_p)	θ_{BV} ($^\circ$)	$\frac{\delta B}{B}$	$\frac{\delta n}{n}$	$\frac{\delta V}{V}$	M_A	$\frac{\delta V}{V}$ (vs-ac)
18-Febrero-2002	366.58	240.91	125.36	52	0.50	0.47	0.1	5.04	0.03
21-Febrero-2002	427.56	201.39	111.11	57	0.44	0.42	0.19	5.15	0.07
12-Febrero-2002	527.79	292.98	112.87	64	0.42	0.36	0.04	9.65	0.03
02-Marzo-2005	640.99	242.19	167.83	58	0.99	0.96	0.16	11.19	0.07

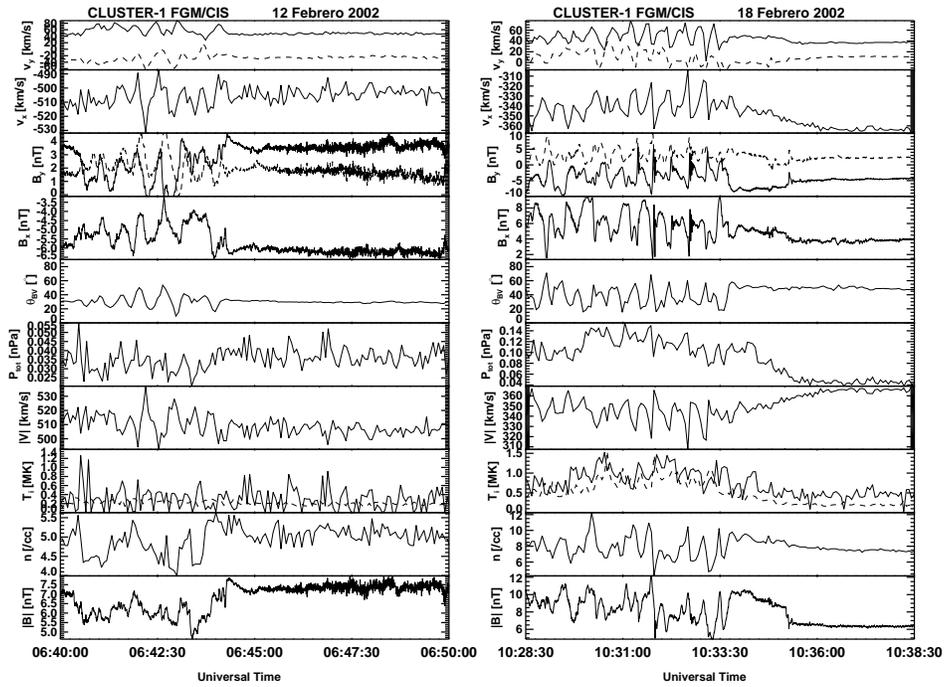
Cuadro 3.2: Valores para velocidad de viento solar, tamaño, ángulo del CMI, amplitudes de campo magnético, densidad y velocidad, Número de Mach Alfvénico y la variación de la velocidad de la región del viento solar (vs) al antechoque (ac) pasando por la FCA; todo para los cuatro casos de estudio de la Figura 3.4.

3.3.2. Casos de estudio según el ángulo θ_{BV}

La Figura 3.6 muestra cuatro eventos que corresponden a distintas geometrías del CMI en el rango de 0° a 90° .

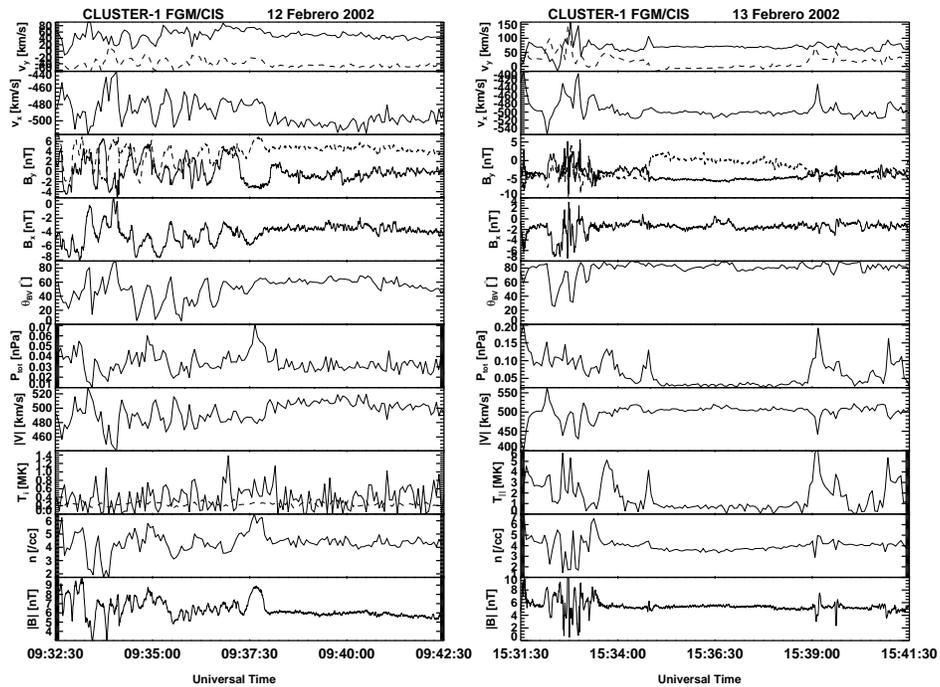
La Figura 3.6(a) muestra una frontera compresiva ocurrida el 12 de Febrero del 2002 a las 06:44:10 UT cuando la posición de la nave era $(17.30, 3.7716, -4.3964)R_E$ GSE río arriba del choque de proa en la zona sur después del mediodía. La frontera tuvo una duración de 16 s y su extensión total fue de $81.97 c/\omega_p$ mientras que su correspondiente zona compresiva duró ~ 10 s y su extensión fue de $51.23 c/\omega_p$; por lo que podemos decir que se trata de un evento de tamaño pequeño. La configuración del CMI previa a la FCA era de 34° y el viento solar tenía una velocidad promedio de 508.079 km/s y un campo magnético promedio de $|B| = 7.21$ nT. El campo magnético en el viento solar presenta perturbaciones de alta frecuencia a lo largo de ~ 16 minutos en sus tres componentes y en la magnitud total. Por simple

3.3. Casos de estudio



(a) $\theta_{BV} = 34^\circ$, $V_{vs} = 508.079$ km/s
 $M_A = 7.19$

(b) $\theta_{BV} = 49^\circ$, $V_{vs} = 365.11$ km/s
 $M_A = 7.16$



(c) $\theta_{BV} = 67^\circ$, $V_{vs} = 507.344$ km/s
 $M_A = 7.85$

(d) $\theta_{BV} = 82^\circ$, $V_{vs} = 506.531$ km/s
 $M_A = 8.24$

Figura 3.6: Casos de estudio de fronteras compresivas formadas bajo cuatro diferentes geometrías del CMI.

3. Análisis de datos y Resultados

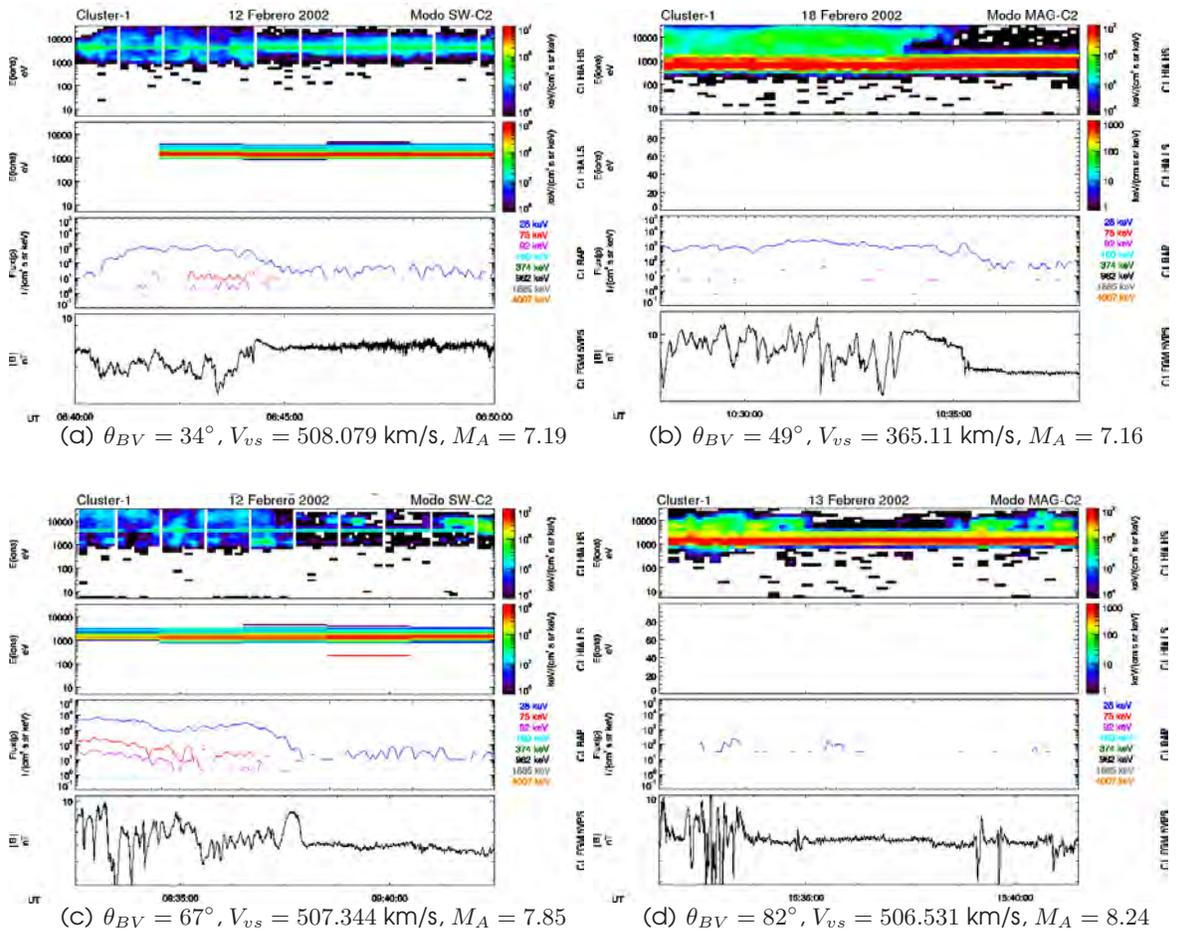


Figura 3.7: Mismos casos de estudio que en la figura anterior ahora con espectros de energía de HIA y RAPID.

3.3. Casos de estudio

inspección la FCA se identifica con facilidad en $|B|$ aunque en la densidad y en la magnitud de la velocidad es ligeramente más complicado pues el viento solar exhibe ondas en dichos parámetros. Esto último implica que este evento se localizó más adentro del antechoque de ondas FUB y del antechoque de iones. Al inicio de la FCA la magnitud del campo se comprime en un 9% respecto al viento solar, alcanzando su valor máximo dentro de la frontera en los 7.85 nT y después en el antechoque disminuye su valor hasta un promedio de 6.09 nT. En este evento no hay cambios de signo en las componentes del campo y por tanto no hay rotaciones. Las componentes B_y y B_z muestran claramente la frontera compresiva y la primera fue la que mostró más compresión al interior de la FCA, $\sim 28\%$. Como se decía identificar la FCA en el perfil de densidad es menos simple que en otros ejemplos que ya se han visto no sólo por toda la variación presente en el viento solar sino que también si observamos el cambio en la densidad que se encuentra *enmascarado* por las perturbaciones del viento solar nos daremos cuenta que el cambio es muy pequeño pues pasa de una densidad promedio de 4.94 part/cm³ en el viento solar a 4.77 part/cm³ en el antechoque lo que significa un cambio de apenas un 2%. Algo similar al comportamiento de la densidad pasa con la magnitud de la velocidad y la componente radial x que decrecen tan sólo en 2% y 1% respectivamente. Son las componentes transversales de la velocidad, V_y y V_z las que perfilan muy bien a la frontera compresiva mostrando un viento solar puro en esas direcciones aunque también los cambios de estas componentes de una región a otra son pequeños. El ángulo de cono para este evento es de los más pequeños de los 38 eventos estudiados y el cambio del θ_{BV} hacia el antechoque es de $\sim 8\%$ alcanzando los 3° , lo cual era de esperarse pues tanto el campo magnético como la velocidad variaron poco. Por otro lado el instrumento CIS estuvo operando en el modo SW-C2 por lo que no vemos una tendencia específica en los perfiles de la temperatura paralela y perpendicular. A diferencia, la presión total si muestra un ligero decremento de 0.037 nPa a 0.032 nPa de la zona del viento solar al antechoque, aunque esta firma muestra muchas y pequeñas variaciones. El Número de Mach Alfvénico calculado fue de 7.19. El espectro de iones medido con HIA-HS de la Figura 3.7(a) muestra la presencia de iones supertérmicos en los 10 minutos de observación, en el antechoque los iones difusos presentes tienen energías que van de 2 keV hasta los 15 keV y sólo hay algunos iones de mayor energía. Entre las 06:43:45 UT y las 06:50:00 UT, aún hay una presencia importante de ondas de alta frecuencia por lo que se trata de una región todavía dentro del antechoque de iones donde también se observan

iones supertérmicos aunque su distribución abarca una banda de energía menos extendida, la mayoría está entre 2 y 10 keV. Justo donde ocurre la FCA se diferencian en su energía la dos poblaciones que acabamos de mencionar. El espectro de HIA-LS comenzó a operar después de las 06:41:00 UT aproximadamente, lo que significa que previo a eso el modo de CIS fue magnetosférico. El haz del viento solar en este espectro está bien resuelto y la mayor intensidad se tiene en una energía de ~ 2 keV. También hay iones con energías un poco mayores e inferiores, pero el grueso de la población está en la energía mencionada. El flujo de protones de RAPID muestra que el mayor cambio en los iones de 28 keV ocurre en la frontera compresiva donde el flujo disminuye; además es en la FCA donde aparecen protones de mayores energías (de 75 keV y 92 keV). Finalmente mencionaremos que este evento también está dentro del anteochoque de iones pues el plasma exhibe oscilaciones de alta frecuencia y en los espectros de energía se observan iones supertérmicos, poco procesados, en esa región.

En la Figura 3.6(b) se presenta una FCB observada el 18 de Febrero del 2002 a las 10:33:31 UT, momento en el que la posición de Cluster 1 era (11.34, 5.45, 7.70) R_E GSE de manera que se encontraba en el anteochoque después de la zona del mediodía y por encima de la eclíptica. El viento solar se movía hacia el choque de proa con $V_{vs} = 365.11$ km/s de manera que ocurrió bajo condiciones de viento solar lento. En este caso el viento solar es puro (sin perturbaciones) y el campo magnético promedio que se calculó para dicha región es de 6.42 nT con un ángulo de cono de $\theta_{BV} = 49^\circ$. El modo de operación de CIS fue MAG-C2 de manera que los momentos del plasma son aproximados y dado que detecta iones supertérmicos es posible ver cambios en la temperatura del plasma. El anteochoque muestra la existencia de ondas, las cuales ya se ven bastante desarrolladas e incluso se observan algunos trenes de onda de alta frecuencia. El perfil de la FCA se observa claramente en la densidad y el campo magnético aunque no de la misma manera; mientras que en el campo la firma parece más la de un choque con una gran zona de compresión, en la densidad tenemos una firma más suave. Dado que el modo de CIS fue magnetosférico durante la observación de este evento tenemos que los momentos del viento solar son aproximados lo que influye directamente en el perfil observado para la densidad y eventualmente puede no observarse con todo detalle la firma de la FCA en la densidad o en otro de los momentos del viento solar, como ocurre en este caso. Lo que si muestran ambas firmas y de manera correlacionada es la zona de depresión de la frontera. La duración y el tamaño calculados fueron de

3.3. Casos de estudio

102 s y $480.42 c/\omega_p$ lo que la hace uno de los eventos de mayor duración que se observaron, mientras tanto la región compresiva duró 93 s y calculamos una extensión de $438.03 c/\omega_p$. La densidad tuvo una compresión del 30% del valor promedio en el viento solar alcanzando un valor de 9.78 part/cm^3 en el interior de la FCA. La intensidad del campo tuvo un incremento del 64% en la parte compresiva de la frontera y la depresión previa al cruce de la FCA fue de un 73%, ambos porcentajes respecto al valor ambiente del campo. Estos cambios hacen que la firma de esta estructura sea una firma muy marcada en el campo magnético. Los cambios en las componentes del campo, al menos en las componentes B_x y B_z , son menos drásticos y son las que muestran un perfil claro y bien delineado de la FCA mientras que en la componente B_y el cruce de la frontera es un poco más abrupto. Por otro lado la componente B_y sufre rotaciones consecutivas en la zona del antechoque donde aparecen los trenes de ondas de alta frecuencia, la componente ahí oscila entre 3 nT y -6 nT. Se observan desviaciones de flujo en todas las componentes de la velocidad cuando la nave cruza la FCA, pasando de una velocidad en el viento solar de 365.11 km/s a 349.267 km/s en el antechoque, es decir, hubo una disminución del flujo del 3% del valor ambiente. El ángulo de cono tuvo una gran variación a través de la frontera compresiva pasando de una configuración de 49° a 38° del viento solar a el antechoque. El Número de Mach Alfvénico calculado para este evento fue de 7.16. En el espectro de iones de HIA-HS de la Figura 3.7(b) se observan iones supertérmicos en la región del antechoque y el haz del viento solar se encuentra mal resuelto debido a que en este modo de CIS sólo opera el sector de alta sensibilidad. En la zona de decremento de la FCA aparece una población de iones supertérmicos bastante difusa (lo sabemos pues las ondas en esta región ya están evolucionadas y los rangos de energía van desde los 300 eV y hasta los 25 keV). Si observamos en el perfil de campo la región correspondiente a el viento solar, vemos que el espectro de energía en esa misma región muestra la distribución del viento solar con energías de entre 300 y 1 keV medida por el instrumento aunque mal resuelta; como es evidente el haz del viento solar de este evento tuvo una menor energía que en otros casos pues su velocidad fue considerablemente menor, ~ 365 km/s. En base al espectro y al panel de $|B|$, donde el antechoque está bastante perturbado, podemos decir que esta frontera ocurrió más cerca del antechoque de ondas FUB. El espectro de HIA-HS también exhibe pequeñas zonas de iones atrapados que corresponden justo a los intervalos donde las componentes B_x y B_y del campo muestra los trenes de ondas de alta frecuencia. El panel del espectro de

HIA-LS se encuentra en blanco pues como hemos mencionado en varias ocasiones no se encuentra en operación éste factor geométrico para ningún modo magnetosférico. Finalmente los protones medidos por RAPID muestran una disminución en el flujo de los iones con energía de 28 keV poco después de haber cruzado la frontera, el flujo muestra una disminución de $1 \times 10^3 \text{ part/s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{keV}^{-1}$ en promedio en el antechoque a $300 \text{ part/s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{keV}^{-1}$ en el viento solar.

El tercer caso de estudio que presentamos a continuación corresponde al observado el 12 de Febrero del 2002 hacia las 09:37:12 UT, ver Figura 3.6(c). Tuvo una duración de 21.5 s y una extensión de $223.24 c/\omega_p$ y su región compresiva fue de aproximadamente la mitad de la estructura: 111.62 longitudes inerciales. Al encontrar la FCA la nave se encontraba en el punto $(16.07, 2.74, -5.83)R_E$ GSE. El viento solar se movía con una velocidad de 507.344 km/s hacia la magnetósfera terrestre, la dirección entre éste y el CMI era de 67° , el plasma estaba poco perturbado y tenía un campo magnético promedio de $B_{vs} = 6.05 \text{ nT}$. La magnitud del campo magnético muestra una firma muy pronunciada de la frontera observándose una especie de joroba en el campo, dentro de la frontera alcanza un valor máximo de 8.86 nT y en el antechoque oscila alrededor de un valor promedio de 7.08 nT por aproximadamente 20 minutos, la amplitud calculada fue de $\delta B/B = 0.46$. Las componentes del campo se muestran ligeramente más perturbadas en la región del viento solar y sólo la componente B_z presenta la misma joroba que $|B|$, las otras dos componentes B_x y B_y muestran de manera más marcada un decremento y no la región de compresión. La componente B_y exhibe un cambio de signo al interior de la FCA y se mantiene oscilando entre valores de -4 y 6 nT en el antechoque. La magnitud de la velocidad muestra muchas variaciones aunque es posible distinguir la firma de la frontera y además que la magnitud de la velocidad del viento solar disminuye al entrar al antechoque* pues pasa de un promedio de 507.344 km/s en el viento solar a 483.649 km/s en el antechoque, lo que se traduce en un decremento del 5%. Las componentes transversales de la velocidad varían poco de una región a otra y es la componente radial (x) donde se observa mejor la disminución de la velocidad pese a presentar tantas variaciones. El panel de la densidad muestra un comportamiento peculiar durante el evento observándose dos picos en la zona compresiva que en $|B|$ se observa como una "joroba", estos dos picos de la densi-

* Aunque en este evento la nave detectó primero el antechoque y luego el viento solar es conveniente describir el comportamiento de manera inversa, pues en realidad es el viento solar el que se mueve hacia el antechoque.

3.3. Casos de estudio

dad corresponden a los dos valores más grandes que alcanza éste parámetro tanto en el viento solar como en el antechoque. Las componentes de la temperatura no muestran un comportamiento característico en vista de que el modo de operación de CIS fue de viento solar SW-C2 . La presión total del plasma sin embargo sí exhibe un cierto comportamiento, pues se alcanza a ver que en la región donde hay viento solar puro se mantiene en promedio en 0.031 nPa, luego justo después de las 09:37:30 UT muestra un pico máximo en 0.07 nPa, o sea que dobla el valor que tenía, y luego en el antechoque adquiere un valor promedio de 0.038 nPa. La variación de la presión de una región a otra es pequeña pero observable; en el panel correspondiente se nota un aumento en la presión donde se observa la FCA en los perfiles de densidad y campo magnético. El ángulo de cono tuvo una variación de 38% entre el viento solar y la región del antechoque. El Número de Mach Alfvénico calculado fue de 7.85. De acuerdo a las variaciones en los parámetros podemos decir que es un evento de mediana intensidad. El panel superior de la Figura 3.7(c) que corresponde al espectro de iones de HIA-HS muestra una población de iones supertérmicos con energías superiores a los 3 keV en la región del antechoque donde el ángulo de cono fue de aproximadamente 57° . Como mencionamos en la sección 1.4 los iones alineados al campo se observan típicamente en regiones del antechoque para las que $40^\circ \leq \theta_{Bn} \leq 70^\circ$, por lo que podemos decir que los iones vistos por Cluster en este evento se tratan de iones alineados al campo con energías de entre 1 keV y 30 keV. CIS-HS muestra también una porción del haz del viento solar aunque mal resuelto, entre 1 y 3 keV, que se ve diferenciado de los iones supertérmicos por una delgada línea en azul turquesa. En la región entre las 09:38:00 UT y las 09:42:30 UT el espectro de HIA-HS muestra algunos iones supertérmicos indicando nuevamente que nos encontramos dentro de la frontera de iones. A lo largo de los diez minutos de observación se observa el haz del viento solar ocupando una banda de energía de entre 1 keV y 3 keV en el panel de HIA-LS, ahí mismo el haz del viento solar tiene una mayor cantidad de iones con energía aproximada de 1.5 keV que se notan como la delgada banda roja. Finalmente en cuanto al flujo de protones de RAPID tenemos que en el antechoque se tenían aproximadamente $2 \times 10^3 \text{ part/s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$ en el canal de 28 keV y al cruzar la FCA los iones de esta energía sufren una disminución importante bajando su flujo hasta $20 \text{ part/s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{keV}^{-1}$ en el viento solar. En el antechoque también se observa flujo de partículas de energías de 75 keV, 92 keV y un flujo menor de partículas de 160 keV.

Por último el cuarto caso de estudio de esta sección corresponde al observado el 13 de Febrero del 2002 a las 15:33:14 UT, Figura 3.6(d), cuando la posición de Cluster 1 era $(10.03, 6.27, 7.96)R_E$ GSE de manera que se encontraba al norte del choque después del mediodía. La órbita de la nave cruzó desde la magnetofunda donde se encontraba antes de las 15:31:30, luego entro en el antechoque por alrededor de ~ 2 minutos y continuó hacia la región de viento solar puro. Las escalas de la gráfica se acortaron para poder observar a detalle la FCA pues si se graficaba desde la magnetofunda la escala no permitía ver la estructura de la frontera, por esta misma razón se grafica a partir de que la nave está en el antechoque y considerando los 10 minutos de observación que se hicieron para cada uno de los eventos de nuestra muestra ésta no aparece centrada en la gráfica. El viento solar se movía hacia el choque de proa con $V_{vs} = 506.531$ km/s que es una velocidad típica del viento solar a la altura de la órbita de la Tierra. En este caso el viento solar también muestra pequeñísimas perturbaciones y la magnitud del CMI calculado para dicha región es de 5.31 nT con un $M_A = 8.53$ y un ángulo de cono bastante oblicuo de $\theta_{BV} = 82^\circ$ hasta que se formó la FCA. Hacia las 15:39:00 UT se observa la firma de una cavidad. La duración y el tamaño de la frontera que se calcularon fueron de 18 s y $90.62 c/\omega_p$, mientras que para la región compresiva fueron de 15 s y $75.51 c/\omega_p$. La firma de la FCA se observa muy bien definida en la magnitud del campo magnético y la densidad. La compresión que sufre la densidad al comenzar la frontera tiene una amplitud grande de $\delta n/n = 0.73$ alcanzando un valor máximo de 6.59 part/cm³ en comparación con 3.80 part/cm³ que era su valor promedio para el viento solar puro reportaba una densidad de 3.81 part/cm³; la disminución de la densidad al interior de la frontera fue pequeña pues decreció en un 10% del valor en el viento solar puro. La intensidad del campo tuvo un incremento del 60% en la parte compresiva de la frontera y la subsecuente depresión fue de un 41% del valor ambiente promedio que era de 5.31 nT. La componente B_x no presenta una compresión importante y la componente B_y sólo exhibe un decremento pequeño. Ninguna de las componentes del campo muestra rotación alguna dentro de la FCA. La magnitud de la velocidad muestra una disminución en la velocidad del flujo pasando de 506.531 km/s que tenía el plasma del viento solar puro a un valor mínimo de 463.239 km/s al interior de la FCA y alcanzando luego una velocidad promedio en los pocos minutos que la nave estuvo en el antechoque de 485.128 que se traduce en una amplitud $\delta V/V = 0.09$ y un decremento del 4% de la velocidad del flujo el viento solar al antechoque. El modo de operación de CIS fue MAG-C2 que permite observar cambios

3.3. Casos de estudio

en la temperatura total del plasma importantes en la distribución supertérmica en la frontera compresiva. En este caso el incremento de la componente paralela está desfasado de la región compresiva de la FCA. La temperatura total aproximada de la distribución pasa de 0.62 MK en el viento solar puro a ~ 2 MK en promedio en el antechoque. La presión sigue el mismo comportamiento que la temperatura y cambia de 0.045 nPa en el viento solar a 0.1 nPa en promedio en el antechoque. El ángulo de cono tuvo una variación a través de la frontera compresiva del 20% pasando de una configuración muy oblicua, 82° a una configuración de 66° . El M_A fue de 8.53. Para este evento sólo se generó el espectro de energía de HIA-HS donde se observan los iones supertérmicos desde la magnetofunda, antechoque, FCA y aún después de pasada la frontera compresiva lo que indica que la FCA queda dentro de la frontera de iones. Aunque se alcanza a notar que justo donde está la FCA hay una firma de iones supertérmicos de mayor intensidad, en el espectro se observan dos regiones en amarillo en la parte compresiva de la frontera. El haz del viento solar no está bien resuelto y hacia las 15:40:00 UT se vuelven a detectar iones supertérmicos en las dos depresiones que se observan en $|B|$, siendo en la primera depresión donde hay una firma interesante pues parece haber iones supertérmicos atrapados (se ven como una pequeña mancha en rojo y amarillo) lo que podría sugerir junto con los perfiles de campo y densidad que se trata de un hoyo de densidad como los reportados por Parks et al. (2006). También vuelve a haber presencia de iones calientes hacia el final del intervalo de observación. Finalmente el flujo de protones de RAPID no contiene información suficiente como para decir algo de los protones.

FCA	θ_{BV} ($^\circ$)	x_t (c/ω_p)	x_c (c/ω_p)	V_{vs} (km/s)	$\frac{\delta B}{B}$	$\frac{\delta n}{n}$	$\frac{\delta V}{V}$	M_A	$\frac{\delta V}{V}$ (vs-ac)
12-Febrero-2002 A	34	81.97	51.23	508.07	0.09	0.12	0.02	7.19	-0.01
18-Febrero-2002	49	480.42	438.03	365.11	0.64	0.30	0.09	7.16	0.04
12-Febrero-2002 B	67	223.24	111.62	507.34	0.46	0.56	0.06	7.85	0.05
13-Febrero-2002	82	90.62	75.51	506.53	0.60	0.73	0.09	8.53	0.04

Cuadro 3.3: Valores de algunos parámetros característicos de las FCBs que son casos de estudio de acuerdo a la geometría del CMI.

Efecto del ángulo de cono

El Cuadro 3.3 reporta los mismos parámetros que el Cuadro 3.2 para los cuatro casos de estudio presentados donde varía el ángulo de cono del viento solar.

Los parámetros del Cuadro 3.3 no muestran una tendencia lineal clara en conjunto para afirmar que al aumentar el ángulo θ_{BV} las fronteras compresivas serán más intensas como predicen las simulaciones, Omidi et al. (2009). Sin embargo, de manera individual la amplitud de la densidad si muestra la tendencia esperada. Aunque las amplitudes del campo, la densidad y la velocidad si aumentan con una tendencia lineal en los casos de estudio (a), (b) y (c) la gran variación en los parámetros que determinan la formación de las fronteras compresivas hacen que se requiera extender más éste análisis, tanto en número de eventos como en condiciones de formación de estas estructuras, para conocer si ocurre o no la tendencia esperada por las simulaciones. Ni la morfología ni la duración, y por tanto extensión, de la FCA muestran comportamiento bien definido al variar el ángulo. Pero debemos recordar que tal como se mencionó en el efecto de la velocidad, esta interpretación está sujeta a muchos parámetros que no se pueden controlar.

Para concluir con la presentación de los ocho casos de estudio se muestra el Cuadro 3.4 donde se enlistan tamaño, velocidad, ángulo de cono, amplitudes y M_A . Los primeros cuatro son los estudiados según la velocidad del viento solar y por simplicidad los renombramos como V1, V2, V3 y V4; los eventos identificados por θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4 corresponden a los casos de estudio de acuerdo al ángulo de cono.

FCA	x_t (c/ω_p)	V_{vs} (km/s)	θ_{BV} ($^\circ$)	$\frac{\delta B}{B}$	$\frac{\delta n}{n}$	$\frac{\delta V}{V}$	M_A (vs-ac)	$\frac{\delta V}{V}$
V1	240.91	366.58	52	0.50	0.47	0.1	5.04	0.03
V2	201.39	427.56	57	0.44	0.42	0.19	5.15	0.07
V3	292.98	527.79	64	0.42	0.36	0.04	9.65	0.03
V4	242.19	640.99	58	0.99	0.96	0.16	11.19	0.07
θ_1	81.97	508.07	34	0.09	0.12	0.02	7.19	-0.01
θ_2	480.42	365.11	49	0.64	0.30	0.09	7.16	0.04
θ_3	223.24	507.34	67	0.46	0.56	0.06	7.85	0.05
θ_4	90.62	506.53	82	0.60	0.73	0.09	8.53	0.04

Cuadro 3.4: Parámetros de los ocho casos de estudio presentados en esta sección.

3.4. Características de las FCBs observadas.

En las siguientes secciones mostraremos los resultados obtenidos en la caracterización de las fronteras compresivas del antechoque. Los parámetros analizados para los 38 eventos observados fueron duración, tamaño, amplitudes de campo magnético, densidad, velocidad; valores de la velocidad del viento solar y ángulo de cono.

3.4.1. Condiciones del viento solar.

Previo a presentar los resultados encontrados para las FCA sería importante conocer cuales fueron las condiciones del viento solar durante los días de observación. La Figura 3.8 muestra los histogramas de los valores medidos en el viento solar para la magnitud del campo magnético, densidad, magnitud de la velocidad, los valores calculados para el ángulo de cono y el Número de Mach Alfvénico. Estos histogramas no hacen diferencia entre los datos medidos con los distintos modos de operación de CIS.

Primero mencionaremos que durante los días de observación el campo magnético del viento solar tuvo una mediana de 6.05 nT, para la densidad una mediana de 3.82 part/cm³ y la velocidad tuvo una mediana de 507.712 km/s. La mediana del ángulo de cono para las observaciones fue de $\sim 61^\circ$ y la correspondiente mediana de M_A fue de 7.27. Estos valores nos indican que en general las observaciones se hicieron para días con condiciones típicas del viento solar a la altura de la órbita de la Tierra, de acuerdo al Cuadro A.1.

Establecer las condiciones bajo las cuales se formaron las FCA, nos permitirá más adelante hacer una comparación entre estos valores y las condiciones existentes en el antechoque una vez que se ha cruzado la FCA y así conocer el efecto de las FCA en los cambios de los parámetros entre regiones vecinas del viento solar y el antechoque.

3.4.2. Duración y tamaño.

Como mencionamos en el criterio de selección de eventos la duración de la FCA está considerada a partir del tiempo en el que la nave comienza a detectar la compresión del campo magnético y la densidad en la región viento solar-FCA y la FCA termina donde el valor que ha alcanzado después de la depresión ya es

3. Análisis de datos y Resultados

típico del anteochoque, tal como ilustramos en la Figura 3.1. El Cuadro 3.6 muestra las extensiones máxima y mínima alcanzadas por las 38 FCA observadas en unidades de longitud inercial de protones. Se expresan en estas unidades pues son propias de las interacciones cinéticas en los plasmas* y para futura comparación con la literatura sobre otros eventos como los explicados en el Capítulo 1. Cabe mencionar que se calculó la longitud inercial para cada caso pues éste parámetro depende directamente de la densidad de partículas según la Ecuación A.21, de manera que varía dependiendo de las condiciones del viento solar presentes.

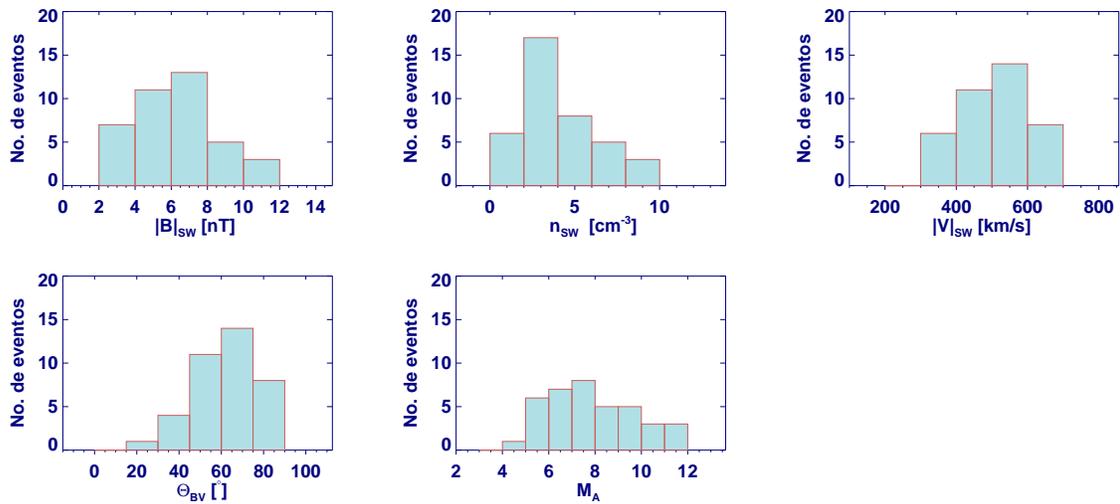


Figura 3.8: Histogramas de los parámetros del viento solar existentes durante las observaciones de las FCA.

Parámetro	Promedio	Mediana
$ B $	6.27 nT	6.05 nT
n_{sw}	4.26 part/cm ³	3.82 part/cm ³
$ V _{sw}$	503.163 km/s	507.712 km/s
θ_{BV}	60.54°	61.03°
M_A	7.66	7.27

Cuadro 3.5: Valores promedio y medianas calculadas para los parámetros del viento solar en los que se observaron las fronteras compresivas de este estudio.

*Ver Apéndice A para mayor detalle sobre la longitud inercial.

3.4. Características de las FCBs observadas.

	Valor Mín (c/ω_p)	Valor Máx (c/ω_p)	Promedio (c/ω_p)	Mediana (c/ω_p)
x_{total}	50.36	488.91	208.79 ± 123.68	166.81
$x_{compresiva}$	21.89	438.03	107.06 ± 89.57	74.25

Cuadro 3.6: Valores máximos y mínimos en los que oscilan la extensión de las FCA analizadas, se consideran también las regiones compresivas.

La duración de las fronteras compresivas observadas oscila entre 16s y 102s, pero el 86% de los eventos tiene una duración de entre 15s y 75s como se muestra en el histograma de la derecha de la Figura 3.9, este porcentaje equivale a 33 de los eventos analizados. En cuanto a la región compresiva, su duración oscila entre 5.2s y 93s y el 79% de las regiones compresivas de los eventos estudiados dura menos de 30s.

El promedio de la duración total de las FCA es de 46.14 ± 24.02 s y la mediana es de 43s, donde el error es la desviación estándar de la muestra. El correspondiente promedio de la duración de la región compresiva es de 23.73 ± 18.58 s.

Ninguna de las fronteras compresivas tiene una duración por debajo de los 15s lo que podría indicar que existe una duración mínima de los eventos; sin embargo no podemos decir nada concluyente al respecto ya que la duración la frontera depende del lugar por donde se ha cruzado la FCA, pues no necesariamente Cluster-1 cruzó las fronteras por donde la estructura tiene la mayor anchura.

Por otro lado las extensiones calculadas para las FCA observadas oscilan entre $50.36 c/\omega_p$ y $488.91 c/\omega_p$, (ver Cuadro 3.6). El tamaño de las regiones compresivas va desde $21.89 c/\omega_p$ hasta $438.03 c/\omega_p$. Del total de eventos, 31 (equivale al 81.5% de la muestra) tiene una extensión total por debajo de $300 c/\omega_p$. Nuevamente la extensión, al igual que la duración, de las FCA depende del lugar por donde se cruzó la frontera. Debido a esto sólo podemos reportar las duraciones y tamaños calculados en este estudio pero no podemos decir si en general las fronteras compresivas exhibirán esta misma tendencia en estas dos características.

Siguiendo con las extensiones de las fronteras, se obtuvo una mediana de 158.14 c/ω_p para la estructura completa y una mediana de la región compresiva de 75.51 c/ω_p .

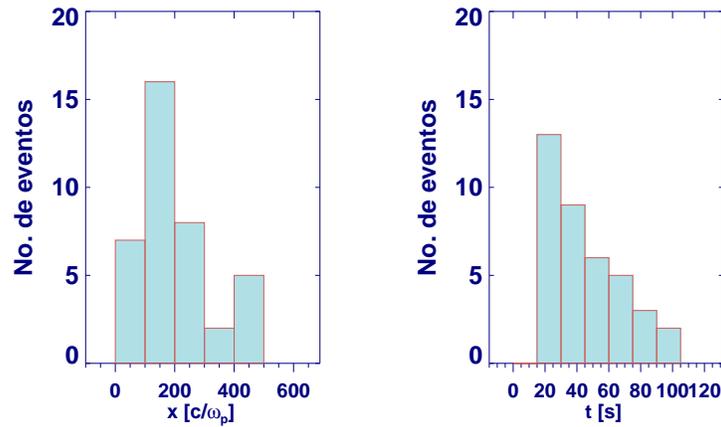


Figura 3.9: Histogramas para la extensión (izquierda) y duración (derecha) de las fronteras. Los intervalos del histograma de extensión son de $100 c/\omega_p$ mientras que para la duración son de 15 s.

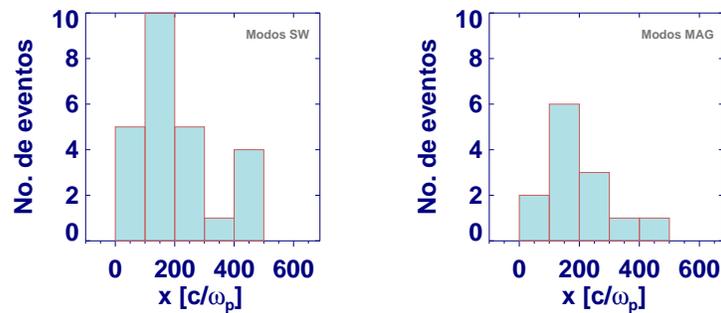


Figura 3.10: Histogramas para la extensión de las fronteras, el de la izquierda corresponde a los 25 eventos para los cuales el instrumento CIS operó en modos de viento solar y el histograma de la derecha es para los 13 eventos donde CIS operó en modos magnetosféricos. Los intervalos de los histogramas son de $100 c/\omega_p$.

Dado que al normalizar la extensión de las FCA a longitudes inerciales se considera la densidad promedio del plasma en el viento solar es conveniente analizar el comportamiento de la extensión de las fronteras compresivas de acuerdo al modo de operación de CIS. Los histogramas de la Figura 3.10 muestran 25 eventos los cuales correspondieron a un modo operacional de CIS para el viento solar (figura de la izquierda) y 13 eventos durante los que CIS operó en un modo magnetosférico (figura derecha); éstos gráficos para ambos modos de operación de CIS muestran que el grueso de los eventos tienen una extensión inferior a las $300 (c/\omega_p)$ en ambos modos. Estos gráficos tienen básicamente el mismo comportamiento que en la Figura 3.9.

3.4. Características de las FCBs observadas.

3.4.3. Amplitudes en campo magnético y densidad.

Los valores de la magnitud del campo magnético en el viento solar ambiente medido previo a encontrarse con las FCA consideradas en este estudio oscilaron entre ~ 3 nT y ~ 11 nT, mientras que la densidad fue variable entre 1.06 y 9.89 part/cm³, aunque cerca del 79% de los casos se mantuvo con una densidad menor a 6 part/cm³ (en esta última consideración no se hizo distinción en el modo de operación de CIS).

A continuación analizamos las diferencias entre los parámetros del plasma observados dentro de las fronteras compresivas y los observados en el viento solar prístino de los alrededores. La Figura 3.11 muestra las amplitudes calculadas de acuerdo a la Ecuación 3.1 para el campo magnético y la densidad. Encontramos que las amplitudes de $\delta n/n$ y $\delta B/B$ oscilan entre 0.07 y 0.96, 0.06 y 1.27 respectivamente y como habíamos mencionado previamente están normalizados a valores ambientes. De las 38 fronteras, 37 eventos tienen una $\delta B/B < 1$ y el único evento con $\delta B/B = 1.27$ es un caso donde la magnitud del campo magnético alcanza un valor muy grande respecto al promedio de $|B|$ en el viento solar. De toda la muestra el 84% tiene una amplitud en la magnitud del campo menor al 0.8, lo que implica que la mayoría de las fronteras ven incrementado el valor de $|B|$ en un 80% de su valor promedio en el viento solar, tal como lo muestra el histograma correspondiente de la Figura 3.11. Pero el dato más interesante del histograma es que justo la mitad de los eventos (19 casos) tienen una amplitud menor al 0.45, lo que podríamos establecer como una de las características que debería cumplir una firma de este tipo para ser considerada una FCA. La mediana de la amplitud $\delta B/B$ de los eventos estudiados es de 0.42 y el promedio es de 0.46 ± 0.29 .

Las componentes del campo magnético mostraron variaciones muy contrastantes en relación a la amplitud de la magnitud del campo calculada como se indica en el Cuadro 3.7. Para un 68% de los casos se tiene que la amplitud en la componente x del campo es negativa, lo que implica entonces que en la FCA ocurrió una rotación del campo en esa dirección; análogamente un 34% de los eventos estudiados muestra una rotación en la componente B_y y para la componente B_z poco más del 53% de los eventos mostró alguna rotación. Los valores que reportamos aquí para las amplitudes de las componentes del campo son los valores absolutos.

Dado que el instrumento CIS opera bajo distintos modos según la zona en la que se encuentre lo que se traduce en que mida iones pertenecientes a las dis-

3. Análisis de datos y Resultados

tribuciones típicas de viento solar y/o antechoque y esto modifique las mediciones tomadas, en lo que respecta a la densidad y a los demás momentos del plasma en este trabajo se incluirán los histogramas que dividen los eventos donde CIS operó en modos de viento solar y donde funcionó en modos magnetosféricos.

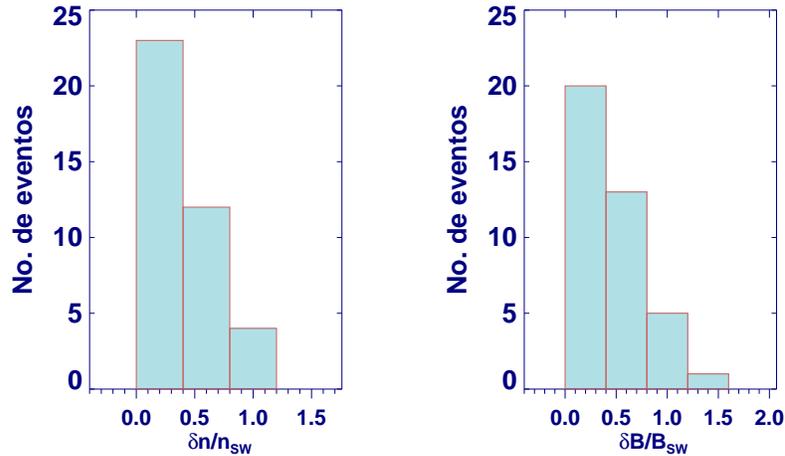


Figura 3.11: En esta imagen se observan las amplitudes del campo magnético y la densidad normalizadas a valores ambientes. En el caso de $\delta n/n$ se grafican todos los eventos sin distinguir entre los modos de operación de CIS. Los intervalos para la variación de $\delta n/n$ y $\delta B/B$ fueron de 0.4 en ambos casos.

Amplitud	Intervalo	Mediana	Promedio
$\delta n/n$	(0.07,0.96)	0.36	0.40 ± 0.24
$\delta B/B$	(0.06,1.27)	0.42	0.46 ± 0.29
$\delta B_x/B_x$	(0.05,10.52)	0.66	1.06 ± 1.78
$\delta B_y/B_y$	(0.05,8.35)	0.89	1.53 ± 1.93
$\delta B_z/B_z$	(0.13,76.62)	1.33	5.01 ± 13.90

Cuadro 3.7: Amplitudes para las componentes del campo magnético y la densidad. El error reportado corresponde a la desviación estándar de la muestra.

Como podemos revisar en la Figura 3.11 la tendencia, en general, que sigue $\delta n/n$ sin considerar la diferencia de modos de CIS es la misma que en los histogramas de la Figura 3.12. De acuerdo a este último histograma todas las FCA tienen amplitudes por debajo de 1 y el 61% de la muestra tiene una amplitud de $\delta n/n < 0.45$ lo que significa que la FCA incrementa la densidad de partículas en hasta casi la mitad de la densidad promedio que el viento solar tenía previo al encuentro con esta estruc-

3.4. Características de las FCBs observadas.

tura; esta amplitud también puede usarse como un valor de discriminación entre eventos con firmas parecidas a las de fronteras compresivas para diferenciar entre una FCA y otra estructura, tal y como lo dijimos antes con la amplitud del campo. Según los histogramas por modos, cuando CIS opera en alguno de los modos de viento solar (SW-4 y SW-C2), 16 de los 25 eventos tiene una amplitud menor a 0.45 lo que equivale al 64% de la muestra. Similarmente, cuando CIS opera en un modo magnetosférico (MAG-C2) 7 eventos de los 13 observados en este modo tiene la misma tendencia de la amplitud que en el caso anterior lo que es aproximadamente el 54%.

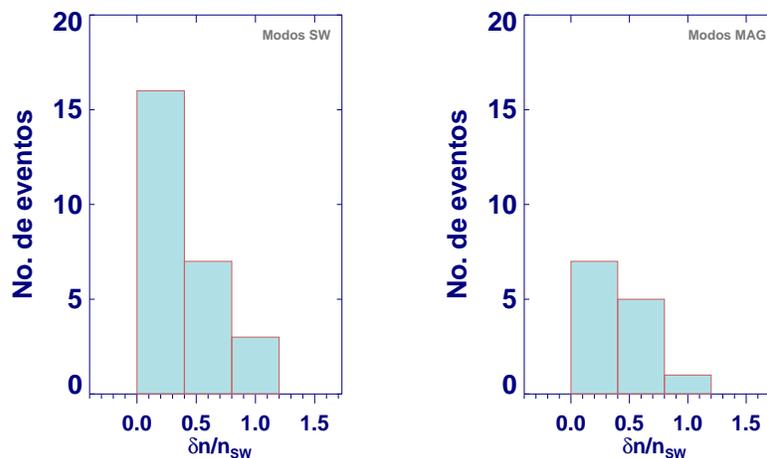


Figura 3.12: Los histogramas de la imagen corresponden a las amplitudes de la densidad de acuerdo al modo de operación de CIS, el intervalo para la variación de $\delta n/n$ fue de 0.4. El histograma de la izquierda corresponde a los eventos observados en un modo de viento solar y el histograma de la derecha corresponde a eventos observados en un modo magnetosférico.

Los tres histogramas que ilustran $\delta n/n$, Figuras 3.11 y 3.12 siguen la misma tendencia. Como ya dijimos en varias ocasiones, la exactitud de los momentos del plasma quedan determinados por el modo en el que opera CIS. Mientras que para los modos de viento solar todos los momentos quedan perfectamente bien determinados, para los modos magnetosféricos los momentos son aproximados. Cabe señalar que aunque en los modos magnetosféricos los momentos del plasma no están bien determinados, son la densidad y la temperatura las que sufren mayor variación entre un modo y otro, mientras que la velocidad no sufre una gran variación como se discutirá en la siguiente sección. Sin embargo, como estamos analizando la disminución relativa de los momentos el efecto que tiene sobre ellos el modo de CIS

es filtrado. Es por ello que en el análisis de $\delta n/n$, aunque la densidad n pueda estar subestimada en los modos magnetosféricos el comportamiento de su amplitud $\delta n/n$ es básicamente el mismo.

Para complementar los resultados analizemos nuevamente los histogramas de $\delta n/n$ pero considerando intervalos de 0.25 en 0.25, Figura 3.13. En estos histogramas la información muestra que para prácticamente la mitad de los eventos la amplitud $\delta n/n$ está entre 0.25 y 0.5, esto sin diferenciar modos de CIS. Cuando consideramos sólo los eventos con modo de viento solar resulta que 12 de los 25 eventos observados bajo este modo, lo que equivale a prácticamente la mitad de estos eventos, tuvieron una amplitud $0.25 < \delta n/n < 0.5$. En el caso de los 13 eventos observados en un modo magnetosférico, 6 de ellos exhibieron el mismo comportamiento en la amplitud: $\delta n/n$ está entre 0.25 y 0.5. Entonces los tres histogramas para la amplitud de la densidad tienen el mismo comportamiento pues aproximadamente la mitad de los eventos, en cada histograma, tiene una amplitud de la densidad de entre 0.25 y 0.5.

Como valores de referencia importantes para nuestro estudio se obtuvieron los promedios de las amplitudes de campo magnético y densidad que fueron $\delta B/B = 0.46 \pm 0.29$ y $\delta n/n = 0.40 \pm 0.24$. Estos valores están de acuerdo con las amplitudes reportadas para estos mismos parámetros por Omidi et al. (2009), quienes reportan que la variación del campo y la densidad en la FCA sobre los valores del viento solar es de entre 40% y 50%. El Cuadro 3.7 muestra las amplitudes con los principales valores del campo magnético y la densidad, sus medianas y promedios.

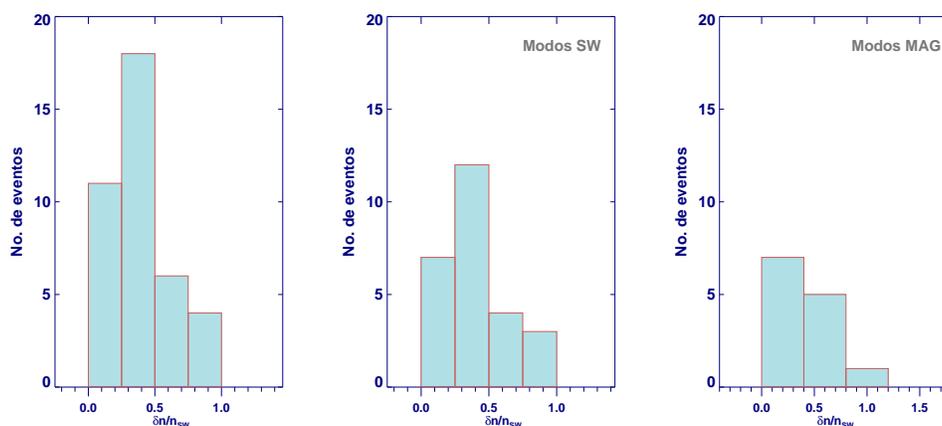


Figura 3.13: Histogramas de $\delta n/n$ para intervalos de 0.25. El histograma de la izquierda corresponde a los eventos observados sin distinguir el modo de CIS, el del centro considera eventos observados en un modo de viento solar y el histograma de la derecha corresponde a modos magnetosféricos.

3.4. Características de las FCBs observadas.

3.4.4. Amplitudes de la velocidad.

El promedio de la velocidad del viento solar medida por Cluster-1 a lo largo de los 15 días de observación fue desde 300 km/s hasta los 600 km/s aproximadamente, indicando que sí existieron corrientes rápidas de plasma del viento solar durante la formación de las 38 fronteras compresivas. La Figura 3.14(a) muestra tres histogramas correspondientes a la velocidad del viento solar, el histograma de la izquierda muestra las condiciones de la velocidad para las 38 fronteras compresivas mientras que los otros dos histogramas muestran las velocidades medidas según el modo de funcionamiento de CIS.

En los casos de estudio que se analizaron antes, los espectros dinámicos de energía mostraron que cuando CIS opera en un modo magnetosférico la distribución de los iones que mide el sector de alta sensibilidad (HS) aparece gráficamente como una región ensanchada y en su interior se observa el haz del viento solar cuya distribución de encuentra medida completamente pero con mala resolución. Cuando CIS funciona en un modo de viento solar el sector de baja sensibilidad (LS) muestra el haz del viento solar bastante colimado. El sector LS mide la distribución completa del haz por lo que sus momentos, incluida la velocidad, quedan perfectamente bien determinados; mientras que en estos mismos modos de viento solar el sector HS alcanza a medir sólo una pequeña parte de la distribución conformada por iones de uno de los extremos de la distribución, es decir, lo que mide HS son sólo algunos iones del viento solar o algo así como un remanente del viento solar. Entonces, queda claro que en ambos modos el haz del viento solar es medido por el sector HS aunque no en la misma parte de la distribución, pues mientras en los modos magnetosféricos HS mide toda la distribución del viento solar con mala resolución, en los modos de viento solar HS mide un remanente del viento solar y sólo el sector LS que funciona en modos de viento solar mide completa y correctamente la distribución del viento solar y sus momentos. Visualmente en los espectros de energía del sector HS la diferencia de como se ve el viento solar en uno y otro modo está ligado a qué tan ancho se observa el haz; en el modo magnetosférico el haz del viento solar aparece más grueso y con poca definición mientras que para el mismo sector en un modo de viento solar el haz aparece más delgado o bien sólo se ven algunas poblaciones de iones pertenecientes al viento solar. El sector LS que sólo opera en modos de viento solar siempre muestra el haz del viento solar colimado. Para concluir esta discusión, aunque el haz se observe más ancho en uno que en otro modo

el centro de la distribución debe coincidir y por ello la velocidad de bulto medida en distintos modos de CIS no debe variar por el modo mismo.

El histograma central de la Figura 3.14(a) muestra que 72% de las FCA observadas en un modo de viento solar reportaron velocidades de entre 400 km/s y 600 km/s esto equivale a 18 de los 25 eventos observados en estos modos. En cuanto a los modos magnetosféricos, el histograma de la derecha indica que 11 de los 13 eventos considerados tienen una velocidad en el intervalo entre 400 km/s y poco más de 600 km/s, que es un 85% de los casos con modos magnetosféricos. Esto se esperaba de acuerdo a lo discutido en el párrafo anterior y se incluyó la diferenciación de V_{sw} sólo como complemento del análisis.

De los tres histogramas mencionados, se puede inferir que aunque casi tres cuartas partes de las FCA observadas se formaron para corrientes de viento solar de entre 300 km/s y 600 km/s, es aproximadamente el 68% de eventos los que se forman entre 400 km/s y 600 km/s. Como habíamos mencionado al principio de la sección, esto significa que la frontera compresiva existe para condiciones típicas del viento solar (velocidad, campo magnético y densidad) por lo que es una estructura frecuente en el antechoque. La velocidad promedio medida para el viento solar fue de 503.163 ± 88.494 km/s.

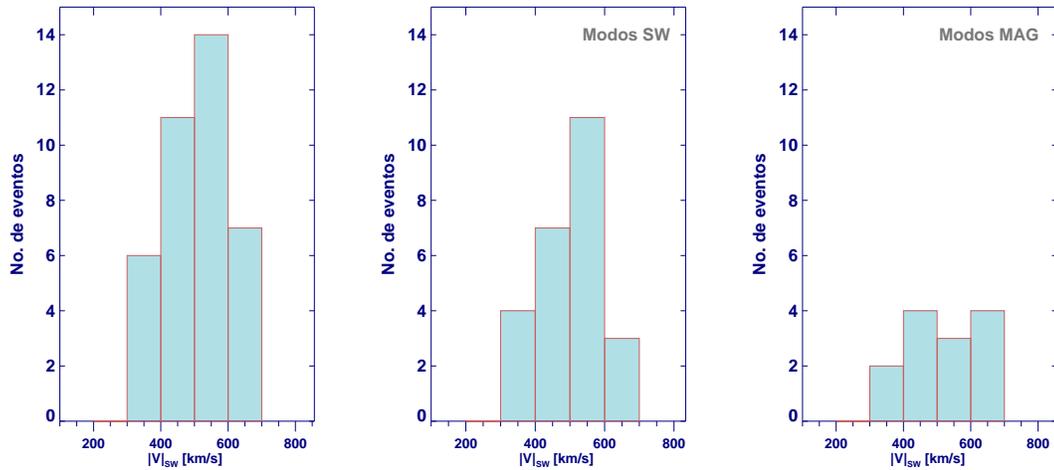
Por otro lado las velocidades más altas para las que se observaron fronteras compresivas en este estudio fueron de ~ 650 km/s durante los días 1 y 2 de Marzo de el año 2005.

Para la muestra de eventos observados se calculó que las amplitudes de la velocidad, $\delta V/V$, toman valores que van de 0.01 a 0.89. La gran desviación del flujo correspondiente al $\delta V/V = 0.89$ corresponde a un sólo caso, el cual es el mismo que muestra la mayor amplitud de la magnitud del campo magnético; todos los demás eventos tienen una amplitud menor a 0.3 para la amplitud de $|V|$. De los eventos observados, el 82% sufren una desaceleración de la velocidad del flujo menor al 3% de la velocidad media medida para el viento solar ambiente.

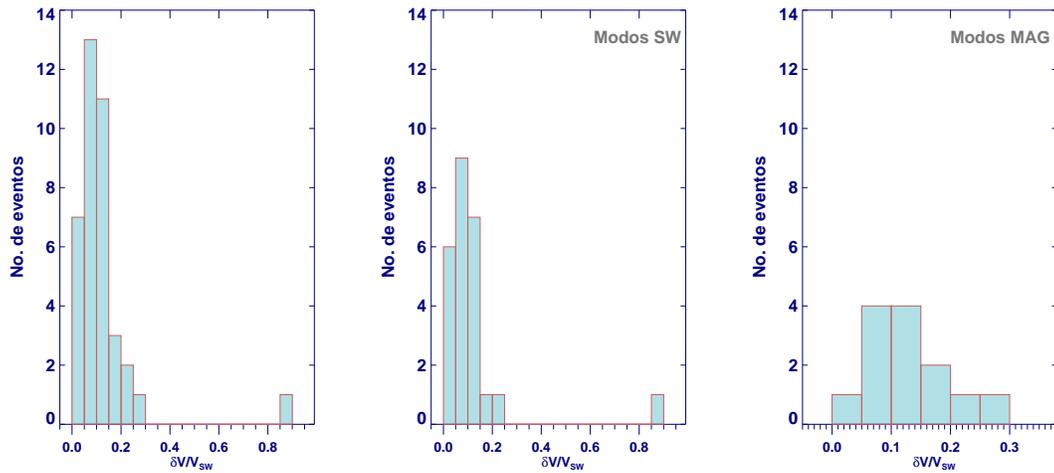
El promedio de la amplitud para la magnitud de la velocidad fue de $\delta V/V = 0.12 \pm 0.14$ y la correspondiente mediana fue de 0.09. Este último valor nos indica que aunque sí existe desaceleración del flujo en la frontera compresiva, esta desaceleración es pequeña. Ver Figura 3.14(b).

Al ser la FCA una de las fronteras internas del antechoque que el flujo tiene que atravesar en su paso hacia el choque de proa es de esperarse que las disminuciones del flujo no sean abruptas en sólo una de las fronteras internas sino que sea

3.4. Características de las FCBs observadas.



(a) Velocidad promedio del viento solar para los 38 eventos.



(b) Histogramas para la amplitud de las velocidades de las 38 FCA analizadas.

Figura 3.14: La distribución de los intervalos en el histograma de la derecha de la Figura (a) muestra que el grueso de los eventos se halla por debajo de los 600 km/s. Los otros dos histogramas de (a) contienen la misma información pero en ellos se diferencia el modo de operación bajo el cual CIS midió los momentos del plasma. En los histogramas de (b) también se incluyen los histogramas según el modo operacional del instrumento CIS. Los intervalos de los histogramas son de 100 km/s en todos los gráficos.

el conjunto de todas las fronteras que hay que cruzar además de la interacción del flujo con ondas y otras estructuras como cavidades, cavitones, SLAMS, etc., las responsables del procesamiento del plasma del viento solar.

Para las componentes de las velocidades V_x , V_y y V_z calculamos las medianas de sus amplitudes siendo 0.02, 0.38 y 1.74 respectivamente. De ahí podemos darnos cuenta que el flujo disminuye su velocidad principalmente en las direcciones y y z . Análogamente a lo encontrado en el caso de las componentes del campo magnético, en el caso de las componentes de la velocidad también resultan amplitudes negativas indicando entonces que en ellas ocurren desviaciones en la dirección con la que el flujo se movía, éstas desviaciones se observan principalmente en las direcciones transversales V_y y V_z y nos hablan de que hay una posible rotación del flujo.

En la Figura 3.14(b) nuevamente se dividió el histograma de $\delta V/V$ según los modos de operación de CIS. En el caso donde CIS se encontraba en un modo de viento solar la mediana de la amplitud $\delta V/V$ fue de 0.08 mientras que en el caso donde CIS operó en un modo magnetosférico se tuvo que la mediana fue de 0.11. En ambos casos el promedio fue de ~ 0.10 . Este comportamiento de la amplitud es lógico pues como ya dijimos es de esperarse que la velocidad de bulbo no tenga variaciones debido al modo CIS.

En los párrafos previos de esta sección hemos discutido el comportamiento que sigue la velocidad del flujo al encontrarse con la frontera compresiva y encontramos que en promedio la velocidad disminuye en un 9% del valor de la velocidad del viento solar durante el cruce de la FCA. Para complementar lo reportado para la amplitud de la magnitud de la velocidad convendría analizar qué le pasa al flujo una vez que ya ha cruzado la frontera compresiva y ha adquirido valores típicos del antechoque. En el histograma de la Figura 3.15 se observa que en el 89% de los eventos observados la magnitud de la velocidad del flujo disminuye su valor hasta en un 10% del valor de la velocidad que tenía el plasma en la región del viento solar prístino.

Los datos de Cluster entonces revelaron que el flujo de viento solar (velocidad total) puede ser desacelerado y desviado al cruzar la FCB, esto es en esta frontera el plasma del viento solar comienza a procesarse previamente a su encuentro con el choque de proa.

3.4. Características de las FCBs observadas.

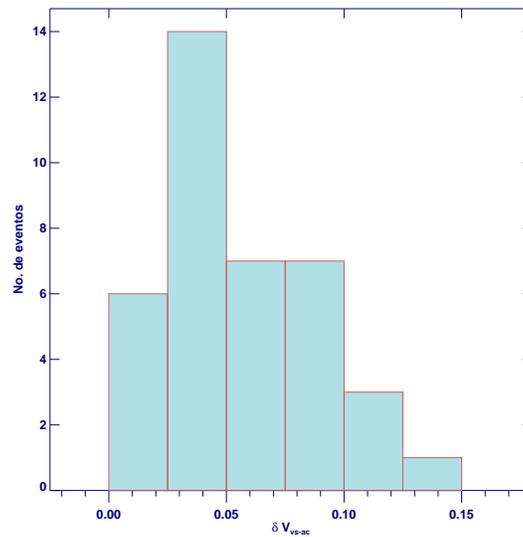


Figura 3.15: En este histograma se muestra el comportamiento de la desaceleración que sufre el flujo al cruzar a FCA y pasar a la región del antechoque. Esta desaceleración está normalizada a valores del viento solar.

3.4.5. Ángulo θ_{BV} y configuración preferencial para la formación de las FCBs.

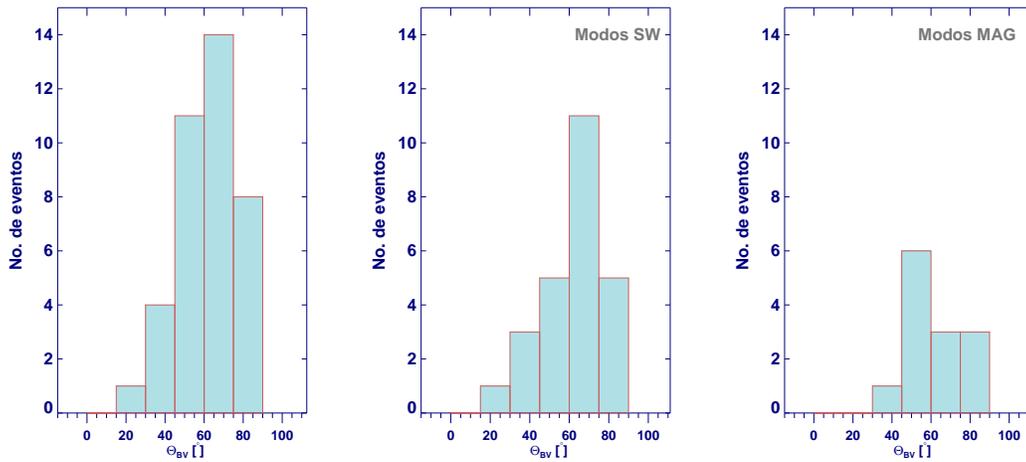
La configuración presente del CMI durante las observaciones mostró que las fronteras compresivas pueden formarse para un amplio rango de geometrías del ángulo de cono, desde un ángulo $\theta_{BV} \sim 20^\circ$ hasta una configuración oblicua de $\sim 83^\circ$.

Como se observa en la Figura 3.16(a) la observación de FCA es más frecuente para un $\theta_{BV} > 30^\circ$, pues para estas geometrías se observaron 37 fronteras mientras que para ángulos de cono menores sólo se observó una FCA. De la misma figura se ve que la distribución del ángulo θ_{BV} se encuentra concentrada en el intervalo entre 45° y 75° .

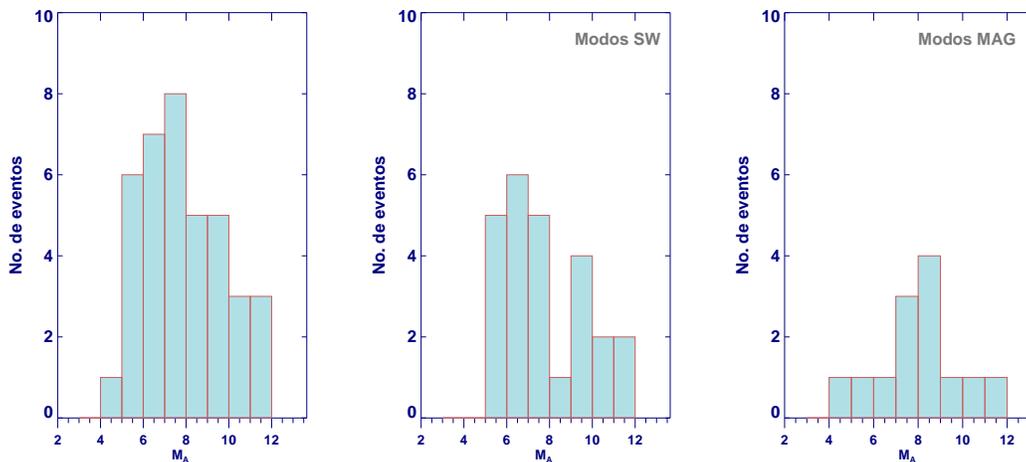
El campo magnético interplanetario tuvo en promedio un ángulo $\theta_{BV} = 61^\circ \pm 15^\circ$ y la mediana se halló en 61° . Cuando se consideró por separado los eventos según el modo de CIS, se obtuvieron medianas de 61° y 58° para los modos de viento solar y magnetosféricos respectivamente, pero como vemos la diferencia no es significativa lo que era de esperarse pues el campo magnético es medido con el magnetómetro FGM que no tiene distintos modos de operación y los cambios de modos en CIS no afectan sustancialmente a la velocidad del flujo. Sin embargo, nuevamente para completar esta discusión se incluyen los histogramas de acuerdo al modo de CIS. Cuando CIS se encontraba operando en un modo de viento solar

3. Análisis de datos y Resultados

el histograma correspondiente muestra que hubo un aumento súbito en el número de fronteras en el intervalo donde el ángulo de cono del viento solar prístino se encontraba entre 60° y 75° aunque como recién mencionamos la mediana tuvo un valor de 61° . En cambio en el histograma para CIS en modo magnetosférico el aumento de FCA observadas fue para ángulos de cono del viento solar prístino de entre 45° y 60° aunque en el intervalo $[60^\circ, 90^\circ]$ tuvo el mismo número de FCA.



(a) Ángulo θ_{BV} que indica la geometría del CMI durante la formación de cada uno de los 38 eventos observados.



(b) Número de Mach Alfvénico calculado para las 38 FCA.

Figura 3.16: Los histogramas de (a) y (b) muestran los parámetros θ_{BV} y M_A para los eventos aquí estudiados. El intervalo para el histograma del ángulo de cono es de 15° mientras que el intervalo para M_A fue de 1. Dado que en al calcular estos parámetros se consideraban algunos de los momentos del plasmas, nuevamente se dividen los histogramas según los modos de operación del instrumento CIS.

3.4. Características de las FCBs observadas.

Uno de los resultados de las simulaciones de Omidi et al. (2009) es que al considerar un Número de Mach Alfvénico constante y variar el ángulo de cono la formación de las fronteras compresivas pierde simetría. Los resultados de simulaciones muestran que bajo estas condiciones las fronteras compresivas se forman a ambos lados del antechoque para ángulos de cono pequeños ($\theta_{BV} = 10^\circ$) y luego al aumentar el ángulo la FCA queda limitada a un sólo lado del antechoque conforme aumenta el ángulo θ_{BV} . En nuestro estudio no encontramos ningún evento simétrico lo que no resulta ser una sorpresa pues en las simulaciones, que es donde aparecen eventos simétricos, las condiciones del viento solar son fijas y no queda ningún parámetro abierto mientras que los datos de Cluster nos presentan a un viento solar como es en realidad, es decir, un plasma altamente dinámico con parámetros que no podemos controlar sino sólo monitorear por lo que sería muy raro encontrar eventos simétricos como los reportados en las simulaciones.

3.4.6. Número de Mach Alfvénico para cada evento.

Durante la observación de las 38 FCA detectadas con Cluster 1 el viento solar tenía un Número de Mach Alfvénico que osciló entre valores de 4.01 y 11.64; el promedio calculado fue de $M_A = 7.66 \pm 1.89$ y la mediana fue de 7.34.

El primer histograma de la Figura 3.16(b) muestra que el mayor número de eventos por intervalo ocurre para el intervalo [7 – 8] y de acuerdo al apéndice A, el valor típico de M_A a la altura de la órbita de la Tierra es de 7. Esto corrobora lo observado previamente en el análisis de la velocidad del viento solar, donde mostramos que las FCA existen para condiciones típicas de viento solar y por lo tanto son un fenómeno frecuente en el antechoque.

El histograma central de la Figura 3.16(b) considera sólo los 25 eventos observados en un modo de viento solar del instrumento CIS, en él la mediana se encuentra en $M_A = 7.19$ y el 64% de los eventos tiene una Número de Mach Alfvénico entre 5 y 8. En este modo no se encontró ningún evento con $M_A < 5$ y aunque sólo hay un evento con $M_A = 8.14$. Para M_A mayores a 9 el número vuelve a incrementarse pero sin igualar los eventos.

En el caso del modo magnetosférico de CIS el mayor número de eventos ocurre para el intervalo [7, 9] y en los demás intervalos están cubiertos con un sólo evento por cada uno de ellos. En este histograma si hay eventos para M_A debajo de 5.

En general $1.5 < M_A < 10$ para el choque terrestre y es supercrítico y más intenso

en la nariz del choque que en sus flancos. Recordemos que sólo aquellos choques supercríticos son capaces de rebotar partículas del flujo que incide sobre ellos y dar pie a interacciones entre los iones reflejados y el viento solar. Si consideramos dicho intervalo, entonces $M_A = 1.5$ corresponde a un choque apenas supercrítico y muy poco intenso mientras que $M_A = 10$ representa un choque supercrítico y muy intenso. Lo que ocurre físicamente con un choque de menor intensidad en este rango es que, si nos restringimos a estudiar los iones rebotados existirían un menor número de estos iones presentes en el antechoque que con un choque de mayor intensidad, de manera que la intensidad del flujo de los iones rebotados o supertérmicos es menor para Números de Mach Alfvénico pequeños.

Por otro lado, la misión Cluster hace cruces del choque de proa terrestre en regiones cercanas a la nariz por lo que siempre que se observan estos cruces se tiene un choque supercrítico, lo que se ve reflejado en los datos usados para esta investigación. En nuestro estudio, el número de fronteras compresivas disminuyó considerablemente para $M_A < 5$ cuando no se diferencian los modos de CIS, esto podría indicar la existencia de un valor umbral de $M_A > 5$ por debajo del cual no se observa, o bien no ocurre la formación de FCA. Retomemos nuevamente el escenario de los iones rebotados en el choque cuando se varía la intensidad de éste último. Físicamente tenemos que para $M_A < 5$ se genera un choque de proa de menor intensidad por lo que existen menos iones rebotados en el antechoque que con cualquier $M_A > 5$, al haber menos cantidad de iones rebotados (o lo que es lo mismo, menos flujo de ellos) hay aún menos interacciones entre ellos resultando una menor actividad de ondas. Al tener menos actividad de ondas entonces el proceso de formación de FCA, que se debe a ondas FUB, comienza a tener problemas para alcanzar a formar las estructuras. De ahí que entonces las FCA formadas a bajos M_A sean débiles o eventualmente no se puedan formar.

Hasta aquí la existencia de un valor umbral para la formación de fronteras compresivas es una sugerencia que requiere de mayor investigación para determinar si en verdad ese umbral existe. Cabe mencionar que las FCA formadas en simulaciones, según lo reportado por Omidi et al. (2009), ocurrieron únicamente para $M_A \geq 5$.

La existencia de valores umbrales para la formación de estructuras en el antechoque ya se ha reportado, tal es el caso de Thomas y Brecht (1988) que reportan un valor umbral de $M_A = 2$ para que puedan formarse las cavidades.

3.4. Características de las FCBs observadas.

3.4.7. Orientación de las FCA respecto al choque de proa.

En este apartado mostraremos cual fue la posición en la que fueron observadas por Cluster 1 las 38 fronteras compresivas halladas.

En la Figura 3.17 se muestran las posiciones de cada una de las FCA en el sistema de coordenadas GSE. En este sistema la Tierra se considera en el origen, el eje $+x$ en dirección Sol a lo largo de la eclíptica, el eje $+y$ se encuentra en el plano de la eclíptica en dirección al atardecer (o sea en sentido contrario a la rotación de la Tierra) y finalmente, para completar el sistema derecho, el eje $+z$ está en dirección del polo norte terrestre. Las fronteras compresivas se ilustran usando cruces y rombos, los primeros corresponden a FCA observadas cuando CIS operaba en un modo de viento solar (SW-4 y SW-C2) y los rombos corresponden a fronteras detectadas cuando CIS se encontraba en el modo magnetosférico (MAG-C2).

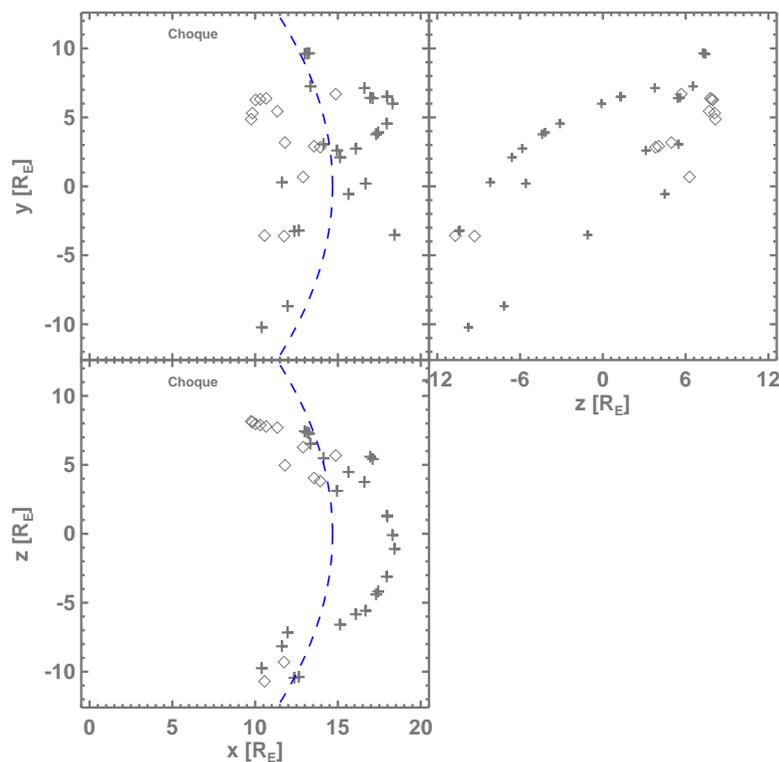


Figura 3.17: En este gráfico se muestran tres paneles correspondientes a los planos xz (abajo), xy (arriba izquierda) y zy (arriba derecha) en el sistema de coordenadas GSE. En azul se grafica el choque nominal con los parámetros calculados en este estudio según el modelo de Narita et al. (2004).

En su trabajo, Narita et al. (2004), determinan la configuración geométrica del choque usando datos de campo magnético y plasma de los instrumentos FGM y CIS de la nave Cluster 3. El modelo parabólico empírico del choque de proa que usan los autores está dado por la expresión:

$$X = a_s - b_s(Y^2 + Z^2) \quad (3.4)$$

donde a_s es la distancia de separación entre el choque de proa y la Tierra en radios terrestres y b_s es el parámetro "flaring" en R_E^{-1} . Se considera una geometría parabólica y para obtener los parámetros a_s y b_s se usan las siguientes relaciones:

$$a_s = a_{mp} \left[1 + 1.1 \frac{(\gamma - 1)M^2 + 2}{(\gamma + 1)(M^2 - 1)} \right] \quad (3.5)$$

$$b_s = 0.0223 \left(\frac{P_{sw}}{1.8} \right)^{\frac{1}{6}} R_E^{-1} \quad (3.6)$$

donde a_{mp} es la distancia de separación entre la magnetopausa y el choque (punto subsolar), γ es el índice politrópico que se asume igual a 5/3, M es el Número de Mach magnetosónico, P_{sw} es la presión dinámica del viento solar en unidades de nPa. Las ecuaciones 3.5 y 3.6 fueron propuestas por Farris et al. (1994) y Cairns et al. (1995), respectivamente. El parámetro a_{mp} que usan Narita et al. (2004) es calculado mediante el modelo para la magnetopausa de Shue et al. (1997). Finalmente, los valores que ellos obtienen son $a_s = 14.0 R_E$ y $b_s = 2.25 \times 10^{-2} R_E^{-1}$.

El modelo y los parámetros usados por Narita et al. (2004) reportan el choque de proa nominal para el 18 de Febrero del 2002 y esos mismos parámetros podrían usarse en este estudio pues lo que queremos es una aproximación del choque. Sin embargo, pensamos que es más conveniente calcular los parámetros indicados para las condiciones medias del viento solar que se registraron durante los días donde observamos las 38 fronteras compresivas de manera, que al obtener parámetros e introducirlos en el mismo modelo (Ecuación 3.4) obtengamos un choque nominal ajustado a las condiciones del viento solar que observamos para este estudio. Siguiendo este objetivo, en lugar de usar el modelo de la magnetopausa de Shue et al. (1997) usamos la expresión para la distancia de separación de la magnetopausa dada por Kivelson y Russell (1995):

$$a_{mp} = 107.4 \left(n_{vs} V_{vs}^2 \right)^{-\frac{1}{6}} \quad (3.7)$$

3.4. Características de las FCBs observadas.

donde n_{vs} y V_{vs} son la densidad de protones y velocidad del viento solar, respectivamente. Finalmente usamos el promedio de la presión dinámica del viento solar (0.02 nPa), el promedio del Número de Mach magnetosónico (4.88) y el promedio del parámetro a_{mp} (10.92) que obtuvimos de nuestra muestra de 38 FCA. Finalmente calculamos los valores $a_s = 14.68 R_E$ y $b_s = 1.06 \times 10^{-2} R_E^{-1}$. En el Cuadro 3.8 se muestran los parámetros usados para calcular el choque.

Dado que las desviaciones estándar de los parámetros calculados no muestran una gran desviación en los datos de casi todos los parámetros, podemos decir que éste choque nominal es una buena aproximación a nuestros días de observación. Por otro lado, el modelo del choque usando las medianas de los parámetros del modelo que estamos usando varía muy poco del choque usando valores promedios por lo que refuerza la afirmación de que el choque nominal presentado es una buena aproximación. El gran error calculado para la presión del plasma podría estar relacionada con el hecho de que la temperatura del plasma que mide Cluster no siempre está bien calculada.

$a_{mp} (R_E)$	M	P_{vs} (nPa)	$a_s (R_E)$	$b_s (R_E^{-1})$
10.92 ± 0.76	4.88 ± 0.6	0.04 ± 0.03	14.68 ± 2	$1.06 \times 10^{-2} (\pm 0.0013)$

Cuadro 3.8: Parámetros usados al calcular el choque de proa nominal según el modelo de Narita et al. (2004).

El choque modelado se superpone a la posición de las fronteras compresivas observadas, Figura 3.17. Como dijimos antes, en azul se muestra el choque nominal que calculamos basados en el modelo de Narita et al. (2004) donde se observa que 18 de las 25 FCA detectadas en modos de viento solar (cruces) efectivamente se encuentran en su mayoría río abajo del choque nominal y 12 de las 13 FCA observadas en modos magnetosféricos (rombos) se ubican dentro de la magnetósfera. El total de fronteras compresivas se encontró entre $13R_E$ y $20R_E$ y las posiciones mínimas y máximas que tuvieron a lo largo de los ejes (sólo las partes positivas) se enlistan en el Cuadro 3.9.

Una vez que conocemos la localización de las FCA observadas y usando como referencia el choque nominal buscamos si existe una localización preferencial para observar las fronteras compresivas. En el panel del plano xz de la Figura 3.17 se observa que la mayoría de las FCA (aquellas detectadas en modos de CIS para

viento solar) se localizan frente a la nariz del choque de proa en una distribución del tipo parabólica. Por otro lado en el plano xy se observa que el 79% de las FCB (sin diferenciar el modo de CIS) se encuentran en la región después del mediodía y un porcentaje parecido se encuentra al sur de la eclíptica.

De los resultados de las simulaciones, Omidi et al. (2009), se esperaría que las fronteras compresivas fueran más débiles al encontrarse más lejos del choque de proa. Sin embargo no podemos decir nada al respecto.

Un estudio posterior será necesario para establecer la localización de las FCA respecto a la frontera del antechoque de iones y la frontera de ondas FUB. Lo que hasta ahora nos ha mostrado este estudio en base a los espectros de RAPID es que la FCA se encuentra dentro de la frontera de iones.

Coordenada	Valor mínimo (R_E)	Valor máximo (R_E)
x	9.76	18.42
y	9.65	10.23
z	8.16	10.70

Cuadro 3.9: Los valores reportados delimitan los intervalos en cada eje coordenado positivo donde se observaron las fronteras compresivas.

3.5. Correlaciones entre las amplitudes de las FCA.

Al ser la magnitud del campo magnético y la densidad los dos parámetros principales que usamos para la identificación de las fronteras compresivas, analizamos las posibles correlaciones entre estos parámetros y aquellos que son claves en la formación de las estructuras en el antechoque como son la velocidad del viento solar, el ángulo de cono y el Número de Mach Alfvénico.

La primera correlación que se calculó fue entre los parámetros $\delta B/B$ y $\delta n/n$ respecto a la magnitud de la velocidad del viento solar, sin embargo los coeficientes de correlación lineal de Pearson calculados no mostraron la existencia de ninguna correlación.

El caso de la correlación de $\delta B/B$ y $\delta n/n$ con el ángulo θ_{BV} mostró un comportamiento en el que cuando se considera el total de eventos no se obtiene ningun-

3.5. Correlaciones entre las amplitudes de las FCA.

na correlación, sin embargo al tomar un subgrupo de eventos para los cuales el Número de Mach Alfvénico sea similar se encuentra que si existe una correlación entre las amplitudes de B y n con el ángulo de cono. En la Figura 3.18 se muestra la correlación considerando los 38 eventos y no se observa alguna correlación mientras que en el Figura 3.19(b) se considera un subgrupo de 8 eventos con M_A en el intervalo (7,8) y entonces obtenemos una buena correlación con coeficientes de correlación de Pearson de 0.87 para $(\delta n/n), \theta_{BV}$ y de 0.73 para la amplitud del campo y el ángulo de cono. Esta correlación nos indica que para choques de proa formados bajo condiciones donde M_A tiene un valor entre 7 y 8, como es el caso del choque de proa terrestre típico, el ángulo de cono si podría determinar la intensidad de la FCA formada; de manera, que para ángulos de cono oblicuos las FCA son más compresivas y por tanto las amplitudes de campo magnético y densidad aumentan. Este resultado no se había visto en las simulaciones. También se consideraron otros intervalos de M_A ; cuando se consideró $M_A = (5,6)$ no se obtuvo ninguna buena correlación entre $\delta B/B$ y $\delta n/n$ y el ángulo θ_{BV} pero para $M_A = (6,7)$ se tomaron 7 eventos para los cuales la correlación entre $\delta n/n$ y el ángulo θ_{BV} mostró un coeficiente de correlación de Pearson de 0.66 mientras que para la correlación de $\delta B/B$ y el ángulo θ_{BV} el coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.36.

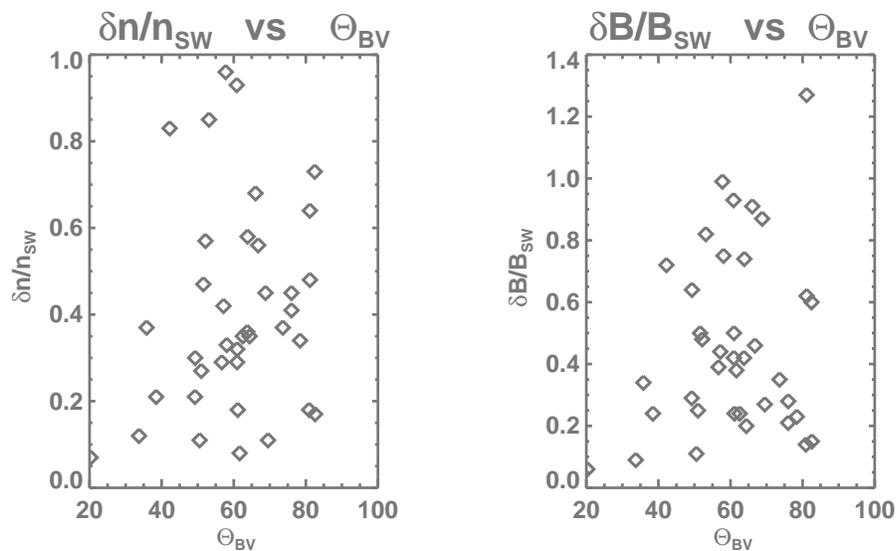
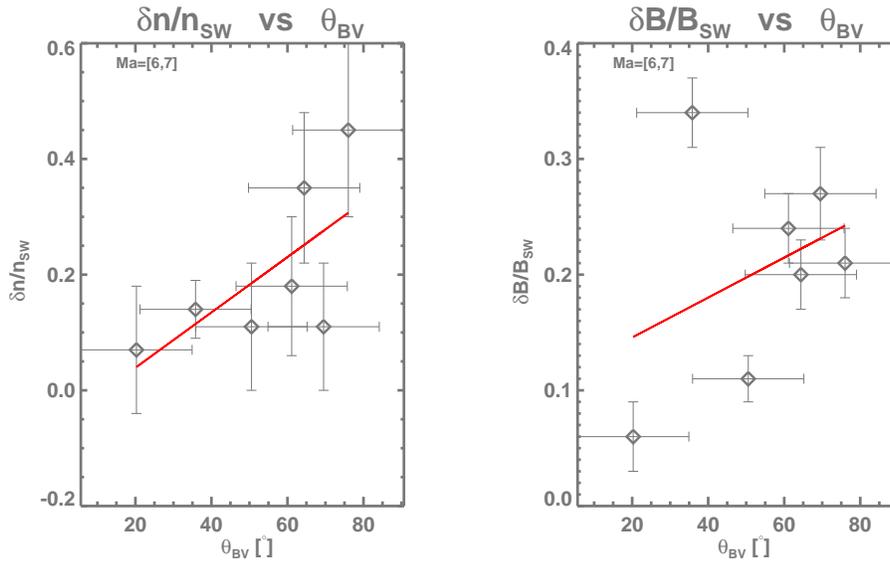
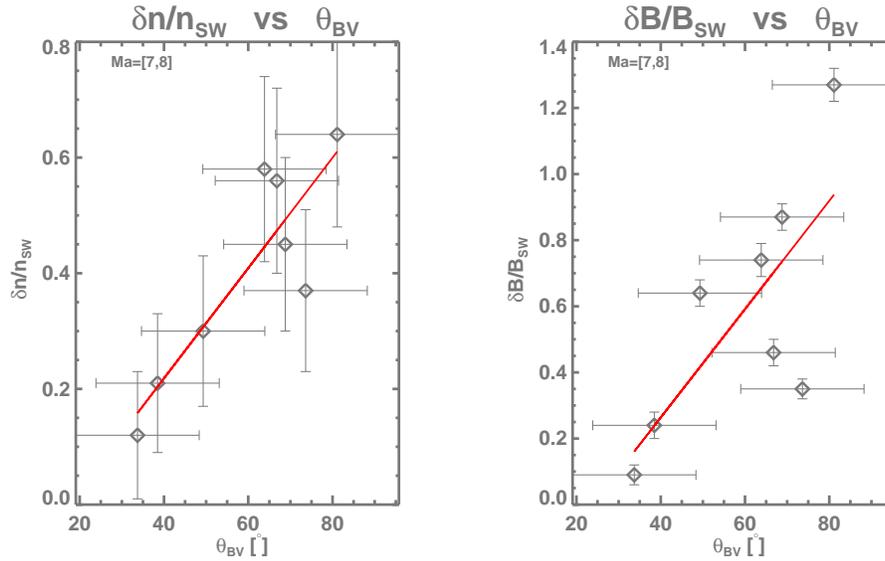


Figura 3.18: Amplitudes de densidad y campo magnético *versus* el ángulo del CMI.



(a) Amplitudes de densidad y campo magnético *versus* el ángulo del CMI considerando eventos con un $M_A = (6, 7)$.



(b) Amplitudes de densidad y campo magnético *versus* el ángulo del CMI considerando eventos con un $M_A = (7, 8)$.

Figura 3.19: Relaciones del ángulo de cono del CMI con las amplitudes de B y n. En (a) se consideró un subgrupo de 7 eventos con M_A entre 6 y 7 para el cual obtuvimos un coeficiente de correlación de Pearson de 0.66 para la correlación $(\delta n/n_{sw}, \theta_{BV})$ y de 0.36 para la correlación $(\delta B/B_{sw}, \theta_{BV})$. En (b) se consideró un subgrupo de eventos con M_A entre 7 y 8 para el cual obtuvimos un coeficiente de correlación de Pearson de 0.86 para la correlación $(\delta n/n_{sw}, \theta_{BV})$ y de 0.73 para la correlación $(\delta B/B_{sw}, \theta_{BV})$.

3.6. Resumen

Por otro lado, la Figura 3.20 muestra que existe una correlación entre las amplitudes en la densidad y el campo magnético de nuestros 38 eventos. El coeficiente de correlación de Pearson correspondiente tiene un valor de 0.78. En la gráfica se observa un punto correspondiente a $\delta B/B_{sw} = 1.27$ que aunque es un valor grande, en relación a los demás eventos, sigue la tendencia del ajuste lineal. Este gráfico nos indica que conforme la amplitud en densidad aumenta lo hace también la amplitud del campo magnético y viceversa, corroborando lo predicho por las simulaciones y encontrado observacionalmente en las firmas de las fronteras compresivas donde hallamos que las compresiones sufridas por B y n están correlacionadas.

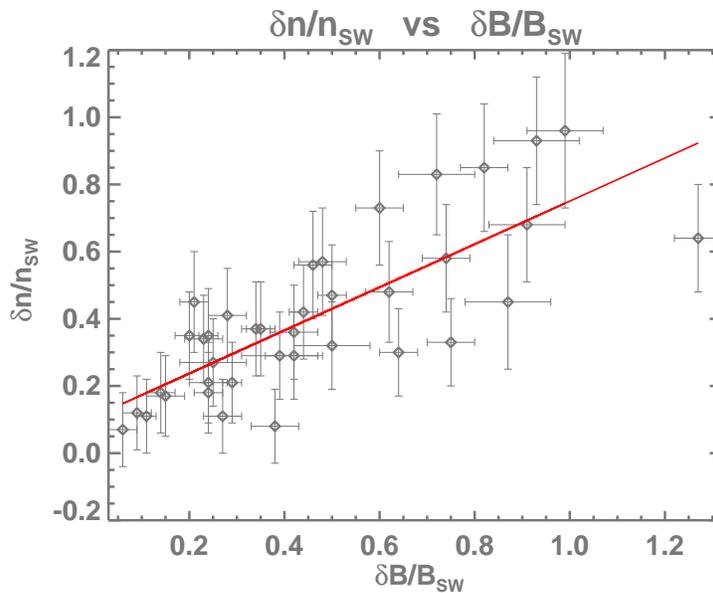


Figura 3.20: Correlación entre las amplitudes de densidad y campo magnético para las 38 FCA observadas. Las incertidumbres graficadas corresponden a las incertidumbres de asociadas a las mediciones.

3.6. Resumen

En este capítulo hemos presentado los resultados de las observaciones hechas a regiones del antechoque terrestre donde buscamos las fronteras compresivas del antechoque, las cuales recientemente fueron exhibidas en resultados de simulaciones híbridas por Omidi et al. (2009) y de las que no se tenía ninguna evidencia observacional.

Mostramos que estas fronteras compresivas sí existen en el antechoque y que las condiciones para el viento solar bajo las cuales se forman las hace ser un even-

to frecuente en el antechoque. Establecimos algunas de sus características como son duración, longitud, amplitudes y posición y reportamos lo obtenido para una muestra de 38 eventos observados con la nave Cluster-1 a lo largo de 15 días de observación.

En la siguiente parte que corresponde a las conclusiones discutiremos los resultados obtenidos, se compararán con los resultados de simulaciones y hablaremos de las FCA en relación a los eventos ya conocidos que existen en el antechoque. Finalmente las conclusiones de esta investigación serán presentadas.

Capítulo 4

Conclusiones

El antechoque terrestre es una región altamente dinámica en cuyo ambiente se generan diversos fenómenos como ondas y estructuras magnéticas. En el capítulo 1 mencionamos algunas de las estructuras magnéticas que hallamos en el antechoque, como por ejemplo, los hoyos de densidad, las anomalías de flujo caliente y las cavidades. Dichas descripciones fueron de utilidad para contextualizar los resultados de simulaciones híbridas obtenidos por Omidi et al. (2009), quienes mostraron la existencia de una nueva estructura magnética denominada *frontera compresiva del antechoque* la cual es una región de transición entre el viento solar prístino y el antechoque que se caracteriza por exhibir compresión en el campo magnético y la densidad, rodeando estas compresiones se observa una zona de depresión de los mismos.

Con el antecedente de los resultados de simulaciones este trabajo se enfocó en confirmar la existencia de esta nueva estructura para lo que utilizamos datos de la misión Cluster para campo magnético y momentos del plasma, como se explicó en el capítulo 2.

Finalmente en el capítulo 3 mostramos los resultados de nuestras observaciones con Cluster 1 convirtiendo este trabajo en la primera evidencia observacional de la existencia de las FCA mostrando que estas fronteras sí existen en el antechoque terrestre y dadas sus condiciones de formación resultan ser un evento frecuente. A lo largo de 15 días de observación encontramos 38 fronteras compresivas, de las cuales investigamos sus características más importantes.

4.1. Discusión

Durante los días de observación el viento solar presentó un campo magnético con una mediana $\mu_B = 6.05$ nT, para la densidad $\mu_n = 3.82$ part/cm³ y en cuanto a

4.1. Discusión

la velocidad $\mu_{v_{sw}} = 507.712$ km/s. La mediana del ángulo de cono para las observaciones fue de $\mu_{\theta_{BV}} = 61.03^\circ$ mientras que el número de Mach Aflvénico mostró una $\mu_{M_A} = 7.34$. Estos valores mostraron que en los días de observación elegidos para este trabajo el viento solar poseía condiciones típicas a la altura de la órbita de la Tierra, como se puede verificar en el Cuadro A.1.

Como mencionamos antes los datos de Cluster muestran que la formación de la frontera compresiva es común en el antechoque de la Tierra y para los 38 eventos estudiados en este trabajo encontramos que la FCB es formada por una región de compresión seguida de una región de disminución de los valores de campo magnético y densidad. El tamaño de la parte compresiva o región de compresión que se observa al inicio de la FCA no siempre está en proporción a la duración de la estructura completa, de manera que podemos encontrar fronteras compresivas con una amplia zona de compresión o bien con una región de compresión pequeña.

En los cuatro casos de estudio según la velocidad del viento solar que analizamos en la sección 3.3.1, se observó que al aumentar la velocidad del viento solar, y por tanto el Número de Mach del choque, existe una tendencia a que la FCA se haga más intensa, es decir, a que las amplitudes de la densidad y del campo incrementen su valor aunque no hay una relación lineal al respecto, ver Cuadro 3.2. Lo que si es concluyente de los casos de estudio expuestos en esa sección es que la firma de la frontera compresiva sufre cambios específicos con la velocidad pues para velocidades altas la FCA aparece más empinada e incluso puede parecer un pequeño choque. Por otro lado, para los mismos casos de estudio no se observó claramente una tendencia a que la extensión de la frontera se hiciera mayor al incrementarse la velocidad del viento solar tal y como muestran los resultados de simulación, Omi-di et al. (2009). Hay que señalar que el hecho de no obtener una clara tendencia lineal al respecto depende de varias aspectos; uno de ellos es que debemos considerar que la nave no necesariamente cruzó la FCA por donde ésta es más ancha o bien la nave cruzó en una trayectoria no transversal sino más bien diagonal provocando que la nave tenga sobreestimada su duración, en resumen, el no cruzar la frontera por donde es más ancha puede modificar que las observaciones no sean exactamente igual a las predicciones de simulaciones. Otro aspecto importante es que tenemos regiones mucho más dinámicas que las planteadas en las simulaciones, en las observaciones el plasma del viento solar cambia continuamente el valor de sus momentos o bien la configuración del ángulo de cono mientras que en las simulaciones se inyecta un viento solar con parámetros, como la velocidad,

que permanecen constantes o bien la interacción entre el viento solar y el plasma magnetosférico se da bajo condiciones de un ángulo de cono constante o de un Número de Mach constante. También habría que considerar que la FCA tendría un grosor variable dependiendo de qué tan lejos se ha cruzado la frontera respecto al choque de proa, pues es claro en las simulaciones (ver Figura 1.25 del capítulo 1) que la FCA se va ensanchando en las regiones más cercanas al choque. En conclusión, existen muchos parámetros abiertos que provocan que la relación entre la extensión de la FCA y la velocidad del viento solar no sea lineal como resulta en las simulaciones.

Para velocidades muy altas (>600 km/s) cuando la frontera se asemeja a un choque la zona de transición se acorta, es decir, la FCA y su correspondiente región compresiva tienen una menor extensión. Esta afirmación es válida aún cuando la FCA no haya sido cruzada por su parte más ancha, pues de ser éste el caso la firma se vería igualmente como un choque y en todo caso lo que se tendría es una duración y extensión subestimadas.

En los cuatro casos de estudio de acuerdo al ángulo de cono, sección 3.3.2, los parámetros enlistados en el Cuadro 3.3 no mostraron una tendencia lineal clara para afirmar que al aumentar el ángulo θ_{BV} las fronteras compresivas serán más intensas como predicen las simulaciones, Omidi et al. (2009). Tampoco la morfología o la duración, y por tanto extensión, de la FCA exhibe una tendencia específica al variar el ángulo. Pero debemos recordar que tal como se mencionó en los casos de estudio según la velocidad del viento solar, esta interpretación está sujeta a muchos parámetros que no se pueden controlar.

Un punto muy importante a tomar en cuenta en este estudio de FCA se refiere a los modos de operación del instrumento CIS. Tal y como se dijo en los capítulos 2 y 3; este instrumento funciona en distintos modos según sea la región donde se encuentre: viento solar, antechoque, magnetofunda, magnetósfera, etcétera. Para los distintos modos de operación los datos pueden incluir las distribuciones completas de iones supertérmicos o bien enfocarse sólo en la distribución del viento solar. En los modos observados en este estudio el instrumento incluye siempre las distribuciones de iones supertérmicos y el haz del viento solar, aunque este último lo define de manera distinta según el sector geométrico de CIS que esté operando para el modo en funcionamiento. Para los eventos considerados en el presente trabajo los modos de operación de CIS fueron MAG-C2, SW-C2 y SW-4; el primero – que es un modo magnetosférico – mide distribuciones de iones supertérmicos además

4.1. Discusión

del haz del viento solar pero sucede que en este modo sólo el sector de alta sensibilidad opera de manera que ambas poblaciones son detectadas por este sector aunque resuelve con poca definición la distribución del viento solar. Los otros dos modos – SW-C2 y SW-4 – también miden distribuciones de iones supertérmicos y la distribución del viento solar pero de manera distinta. En estos modos el sector de alta sensibilidad se concentra en medir las distribuciones de iones supertérmicos y eventualmente mide un extremo de la distribución del viento solar por lo que puede aparecer el haz del viento solar junto con los iones supertérmicos en un espectro de energías de CIS-HS pero con mala resolución; mientras que el sector de baja sensibilidad (que únicamente opera en estos modos) mide la distribución completa del haz del viento solar con buena definición apareciendo como un haz colimado en los espectros de energía de CIS-HS. Otra diferencia importante en los modos de operación es que en modos magnetosféricos los momentos del plasma están determinados por el sector HS que únicamente calcula una aproximación de los momentos. En el caso de los modos de viento solar los momentos de éste quedan bien determinados por el sector de baja sensibilidad que detecta el haz del viento solar (sin incluir iones supertérmicos). Esta diferencia de modos de operación produce que el perfil de temperatura no se pueda comparar de igual forma para todos los eventos pues mientras los modos magnetosféricos sí muestran aumentos bien marcados en la temperatura con CIS-HS asociados a las fronteras compresivas, pues detecta las poblaciones de iones supertérmicos que son los responsables del calentamiento del plasma en las FCA; en los modos de viento solar no se observan incrementos en la temperatura con CIS-LS, pues el haz del viento solar no sufre calentamiento y este sector es el que mide los momentos del viento solar.

Como acabamos de mencionar los momentos del viento solar no están bien determinados en los modos magnetosféricos resultando que, por ejemplo, la densidad se encuentra subestimada en un modo magnetosférico mientras que los momentos del viento solar en un modo de viento solar son exactos. Esto nos condujo a que los parámetros que involucraban en su cálculo alguno de los momentos del viento solar fueron analizados por separado según el modo de operación para analizar el comportamiento; sin embargo esta separación de modos no afecta el análisis estadístico hecho a las amplitudes de densidad, velocidad o presión térmica, pues finalmente las amplitudes nos muestran solamente un cambio relativo en el parámetro del que se trate por lo que el efecto de los modos es filtrado al calcular las amplitudes $\delta n/n$, $\delta V/V$ y $\delta P/P$.

Mostramos que las FCA tienen tamaños de algunos cientos de longitudes inerciales y una duración típica inferior a 1 min (aunque se observaron pocos casos de más de 1 min) de donde podemos decir que estas estructuras son de menor duración que las cavidades que duran típicamente entre 1.5 y 3 minutos, Billingham et al. (2008); pero de mayor duración que los cavitones que duran típicamente 25 segundos, Kajdič et al. (2010). En cuanto a su extensión, la mayoría de las fronteras observadas (81.5%) tiene un tamaño inferior a las $300 c/\omega_p$. En conclusión, las fronteras compresivas son de una escala mayor que los cavitones pero menor que las cavidades.

No es posible decir nada concluyente al respecto de la duración y extensión de las fronteras compresivas ya que ambas características dependen del lugar por donde la nave ha cruzado la FCA pues no necesariamente Cluster-1 cruzó las fronteras por su parte central o por donde la estructura tiene la mayor anchura. Es por esto que sólo podemos reportar las duraciones y tamaños calculados en este estudio pero no podemos decir si en general las fronteras compresivas exhibirán esta misma tendencia en estas dos características.

Las amplitudes del campo magnético y la densidad en las FCA muestra que estos parámetros aumentaron en la zona compresiva en 46% y 40%, respectivamente, sobre su valor promedio en el viento solar; de manera que podemos decir que para que una estructura sea considerada una frontera compresiva debe cumplir con tener una amplitud de campo y densidad de 0.5. Estas amplitudes resultan ser apenas mayores a las correspondientes amplitudes para los cavitones (0.4) reportadas por Kajdič et al. (2010) y mayores que las calculadas para anomalías de flujo caliente (<0.2). La amplitud de las FCA las hace eventos de menor intensidad que las cavidades pues las amplitudes de las cavidades alcanzan hasta un valor de 0.6 para campo magnético y densidad, (Billingham et al., 2008; Parks et al., 2006). Por otro lado las amplitudes de campo y densidad para las fronteras compresivas resultan ser menores que las reportadas para hoyos de densidad y fronteras entre iones giratorios y alineados al campo, ver Cuadro 1.1; aunque estas otras estructuras del anteochoque son de menor duración que las FCA resultan ser mucho más intensas que las FCA.

Las componentes del campo magnético mostraron que existen rotaciones del campo en dichas componentes en la FCA, siendo la componente x donde ocurre con más frecuencia alguna rotación siguiéndole la componente z .

En cuanto al plasma los datos de Cluster 1 revelan que el flujo del viento solar (ve-

4.1. Discusión

locidad total) puede ser desacelerado y desviado cuando cruza la FCB. Aunque la amplitud de la magnitud de la velocidad mostró que existe poca desaceleración del flujo al cruzar la FCA, pues disminuyó en promedio un 12% del valor en el viento solar, son las componentes y y z las que muestran la mayor desaceleración. Posteriormente vimos que son también estas componentes las que muestran las desviaciones que sufre el plasma indicando que hay una posible rotación del flujo.

Al ser la FCA una de las fronteras internas del antechoque que el flujo tiene que atravesar en su paso hacia el choque de proa es de esperarse que las disminuciones del flujo no sean abruptas en sólo una de las fronteras internas sino que sea el conjunto de todas las fronteras que hay que cruzar además de la interacción con ondas, partículas y otras estructuras las responsables del procesamiento del plasma del viento solar.

La configuración presente del CMI durante las observaciones mostró que las fronteras compresivas pueden formarse para un amplio rango de geometrías del ángulo de cono desde un ángulo $\theta_{BV} \sim 20^\circ$ hasta una configuración oblicua de $\sim 80^\circ$, aunque el promedio del ángulo de cono calculado para los 15 días de observación fue de 61° . Encontramos también que el ángulo θ_{BV} juega un papel muy importante en la intensidad de las fronteras compresivas, pues las FCA observadas mostraron una tendencia a ser más intensas al aumentar el ángulo θ_{BV} . En cambio, no se observó que la morfología de la FCA cambie al variar el ángulo ni encontramos eventos simétricos como los reportados en simulaciones por Omidi et al. (2009).

Otro de los parámetros estudiados para las fronteras compresivas fue el número de Mach Alfvénico, la mediana fue de 7.34 y como el mayor número de eventos por intervalo ocurre para el intervalo [7, 8] podemos corroborar lo observado previamente en el análisis de la velocidad del viento solar, donde mostramos que las FCA existen para condiciones típicas de viento solar y por lo tanto son un fenómeno frecuente en el antechoque. Igualmente encontramos que la FCB se vuelve más intensa conforme aumenta el número de Mach Alfvénico, o lo que es lo mismo la velocidad del flujo, tal y como lo predecían los resultados de simulaciones.

En nuestro estudio, el número de fronteras compresivas disminuyó considerablemente para $M_A < 5$ cuando no se diferencian los modos de CIS, esto podría indicar la existencia de un valor umbral de $M_A < 5$ por debajo del cual no se observa, o bien no ocurre la formación de FCA. Esto podría deberse a que el número de iones rebotados en el choque varía con el Número de Mach Alfvénico siempre que se tiene un choque supercrítico, como es el caso de nuestras observaciones y con-

siderando además que Cluster pasa en las zonas frente a la nariz del choque de proa. Físicamente tenemos que para $M_A < 5$ se genera un choque de proa de menor intensidad por lo que existen menos iones rebotados en el antechoque que con cualquier $M_A > 5$, al haber menos cantidad de iones rebotados (o lo que es lo mismo, menos flujo de ellos) hay aún menos interacciones entre ellos resultando una menor actividad de ondas. Al tener menos actividad de ondas entonces el proceso de formación de FCA, que se debe a ondas FUB, comienza a tener problemas para alcanzar a formar las estructuras. De ahí que entonces las FCA formadas a bajos M_A sean débiles o eventualmente no se puedan formar.

Usamos el modelo de choque de proa parabólico de Narita et al. (2004) para las condiciones promedio del viento solar que observamos y proyectamos la posición del choque en los planos xz y xy . El total de fronteras compresivas se encontró a distancias de entre $13R_E$ y $20R_E$. Las FCA observadas con CIS operando en un modo de viento solar se localizaron frente a la nariz del choque de proa en una distribución del tipo parabólica, esto en el plano xz . Por otro lado en el plano xy se observó que el 79% de las FCB (sin diferenciar el modo de CIS) se localizaron en la región después del mediodía y un porcentaje parecido se encontró por debajo de la eclíptica.

De los resultados de las simulaciones, Omidi et al. (2009), se esperaba que las fronteras compresivas fueran más débiles al encontrarse más lejos del choque de proa. Sin embargo no encontramos una correlación importante entre el tamaño y la posición de las fronteras.

Los perfiles de campo mostraron que pueden existir ondas de alta frecuencia después de las FCA lo cual indica que esta frontera compresiva no siempre coincide con las fronteras del antechoque de iones y de ondas FUB. Por otro lado los espectros de flujo de protones medidos por RAPID mostraron que la FCA se observa más extendida que en los perfiles de campo y densidad, es decir, el flujo de protones comienza a disminuir más allá de la frontera compresiva en una región todavía del antechoque de iones indicando entonces que esta estructura se encuentra dentro de la frontera de iones. Además se encontraron ondas compresivas en la región correspondiente al antechoque tanto en los perfiles de campo magnético como los de densidad una vez cruzada la frontera compresiva, las cuales resultaron ser más compresivas al incrementarse la velocidad del viento solar. Estas ondas son un indicador de qué tan lejos se encuentra la FCA respecto de la frontera de ondas FUB, pues al estar más alejada las ondas aparecen menos evolucionadas y por tanto menos compresivas.

4.1. Discusión

Otro aspecto de nuestro estudio consistió en analizar las correlaciones entre las amplitudes de las FCA y otros de sus parámetros. En el caso de la correlación de $\delta B/B$ y $\delta n/n$ con el ángulo θ_{BV} no se obtuvo ninguna correlación, sin embargo al tomar un subgrupo de eventos para los cuales el Número de Mach Alfvénico fue similar sí encontramos una correlación entre tales amplitudes con respecto al ángulo de cono. En el subgrupo se tomaron 8 eventos con M_A en el intervalo (7,8) obteniendo buenas correlaciones con coeficientes de correlación de Pearson de 0.87 para la densidad y θ_{BV} y de 0.73 para la amplitud del campo y el ángulo de cono. Estos resultados indican que para choques de proa formados bajo condiciones donde M_A tiene un valor entre 7 y 8, como es el caso del choque de proa terrestre típico, el ángulo de cono sí determina la intensidad de la FCA formada; de manera, que para ángulos de cono oblicuos las FCA son más compresivas y por tanto las amplitudes de campo magnético y densidad aumentan. Este resultado no se había observado en las simulaciones de Omidí et al. (2009).

En las simulaciones de Omidí et al. (2009), al considerar un número de Mach Alfvénico constante y variar el ángulo de cono la formación de las fronteras compresivas perdía simetría, esto significa que bajo estas condiciones las fronteras compresivas se forman a ambos lados del antechoque para ángulos de cono pequeños ($\theta_{BV} = 10^\circ$) y luego la FCA queda limitada a un sólo lado del antechoque conforme aumenta el ángulo θ_{BV} . Como dijimos antes, en nuestro estudio no encontramos ningún evento simétrico, lo cual era de esperarse pues en las simulaciones todos los parámetros como la densidad del haz del viento solar, su velocidad, el ángulo de cono y el Número de Mach permanecen fijos en una región del espacio bien delimitada donde además de esto, los cortes hechos a las simulaciones para obtener los perfiles de los parámetros son escogidos según sea la necesidad del estudio que se haga. Mientras que en los datos de las misiones, incluida Cluster, la región espacial no queda bien delimitada pues el ángulo de cono está variando pues en las observaciones $\theta_{BV} > 30^\circ$ y en realidad se está monitoreando un plasma altamente dinámico en el cual no podemos controlar ningún parámetro y los cortes que miden las naves están en función de sus órbitas. Entonces quedan demasiados parámetros abiertos en el viento solar observado por las naves por lo que sería muy raro encontrar eventos simétricos como los reportados en las simulaciones.

Por otro lado encontramos una correlación entre las amplitudes en la densidad y el campo magnético de nuestros 38 eventos. El coeficiente de correlación de Pearson correspondiente tiene un valor de 0.78 y el comportamiento de estas amplitudes

mostraron que conforme la amplitud en densidad aumenta lo hace también la amplitud del campo magnético y viceversa, corroborando lo predicho por las simulaciones y encontrado observacionalmente en las firmas de las fronteras compresivas donde hallamos que las compresiones sufridas por B y n están correlacionadas.

Un aspecto muy importante en esta investigación corresponde a los modos de operación del instrumento CIS, pues este instrumento es el que determina los momentos del plasma. Desde el Capítulo 2 se estuvo hablando de que el instrumento CIS opera bajo diferentes parámetros según la región donde se ubique de manera que se tienen modos magnetosféricos y modos de viento solar. En los modos magnetosféricos se miden poblaciones de iones supertérmicas con el factor geométrico de alta sensibilidad y aunque también mide el haz del viento solar esto lo hace con menor definición, Rème et al. (2001). Este modo operacional permite observar el aumento en las componentes de la temperatura en la distribución supertérmica ya que el sector que mide las distribuciones es el HS. Sin embargo tanto la temperatura como los demás momentos del plasma son sólo aproximaciones en estos modos. Los modos de viento solar de CIS miden principalmente el haz del viento solar con el factor geométrico de LS; sin embargo este modo también es capaz de incluir iones supertérmicos al entrar en funcionamiento el sector de alta sensibilidad HS. Sin embargo, vale la aclaración de que los momentos del plasma en este modo están medidos con el sector LS y quedan completamente bien definidos. Dado que en este sector no se incluyen iones calientes entonces el perfil de la temperatura no muestra ningún cambio.

En los casos donde CIS opera en modo de viento solar no se observan cambios importantes en la temperatura; en contraste, cuando CIS opera en un modo magnetosférico, y por tanto detecta principalmente iones supertérmicos, se observan claramente incrementos en la temperatura al encontrarse con la FCA lo que sugiere que la distribución supertérmica es la responsable de los incrementos en este parámetro, es decir, el viento solar no es calentado en la frontera sino que la presencia de iones supertérmicos aumenta la temperatura total del plasma. Este hecho también se ve reflejado en el perfil de la presión total del plasma, pues en los modos magnetosféricos el comportamiento de la presión es similar al comportamiento de la temperatura.

Mientras que para los modos de viento solar los momentos quedan perfectamente bien determinados, para los modos magnetosféricos los momentos son aproximados. Sin embargo, como estamos analizando la disminución relativa de los mo-

4.2. Trabajo a futuro.

mentos, $\delta X/X$ el efecto que tiene sobre ellos el modo de CIS es filtrado. Es por ello que en el análisis de amplitudes de densidad y velocidad, ángulo de cono y Número de Mach Alfvénico el comportamiento fue similar tanto en el caso donde no se dividió el análisis según el modo de CIS como cuando se analizaron por separado y de acuerdo a el modo. Como acabamos de decir, aunque los momentos del plasma no están igualmente determinados en un modo y otro, al calcular las amplitudes relativas se filtra el efecto del modo operacional.

4.2. Trabajo a futuro.

La investigación realizada en esta tesis puede extenderse en varios aspectos. Uno de ellos es el referente a las ondas que existen en las vecindades de las fronteras compresivas; en este trabajo se mostraron casos de estudio donde existen ondas compresivas pero será importante investigar cuáles son los modos que aparecen, de ser así, relacionados a las fronteras compresivas. En este mismo sentido, el estudio de ondas será necesario para conocer la localización de las FCA respecto a la frontera de ondas FUB y a la frontera de iones, pues los resultados de las simulaciones muestran que en general estas fronteras no coinciden con la FCA y en este trabajo solamente se pudo determinar que las FCA quedan dentro de la frontera de iones.

Otro aspecto que debe estudiarse es la temperatura, pues como vimos los modos de operación de CIS producen que la temperatura no siempre esté cuantificada de manera exacta por lo que en general tenemos aproximaciones, buenas pero finalmente aproximaciones debidas al instrumento, del comportamiento de este parámetro.

La simetría de los eventos es un tercer aspecto que puede seguir investigándose aunque como se discutió será raro encontrar eventos simétricos. En este sentido se debe considerar que en la simetría expuesta por Omidi et al. (2009) los cortes de las simulaciones no están limitados como en el caso de las observaciones donde sólo se tiene mediciones de una región limitada por la órbita de la nave, pues la nave no mapea el choque de flanco a flanco ni todo el antechoque.

Finalmente, sabemos que de la órbita de la Tierra a la órbita de Saturno el campo magnético interplanetario y la densidad del viento solar han disminuido en dos órdenes de magnitud y el ángulo de la espiral de Parker ha pasado de 45° a 85° , igualmente el número de Mach ha pasado de 7 a 1 UA a 13 en el choque de Saturno. Sin considerar estas diferencias es posible, en principio, que la interacción en-

tre hojas de corriente interplanetarias con el choque de proa de Saturno puedan generar anomalías de flujo caliente. De hecho, Øieroset et al. (2001), demostraron que las AFC no son exclusivamente un fenómeno del entorno terrestre al encontrar este tipo de eventos en el choque de proa de Marte. Más recientemente, Masters et al. (2008) reportaron eventos observados con la nave Cassini río arriba del choque de proa de Saturno que han sido identificados como AFC. Dado estos antecedentes se podrían examinar otros choques planetarios, como el de Marte o Saturno, en búsqueda de eventos tipo FCA.

Apéndice A

Parámetros del plasma

A.1. Propiedades del viento solar

El viento solar es un flujo de plasma solar ionizado con campo magnético de origen solar que permea el espacio interplanetario. El plasma del viento solar consiste principalmente de electrones y protones calientes con una fracción menor de iones de He^{2+} y algunos otros iones pesados. El Cuadro A.1 enlista los valores promedios de algunas propiedades del viento solar observadas cerca de la órbita de la Tierra (1 UA $\sim 1.5 \times 10^{11}$ m).

Propiedad	Símbolo	Valor
Densidad de protones	n_p	$6.6 \times 10^6 \text{m}^{-3}$
Densidad de electrones	n_e	$7.1 \times 10^6 \text{m}^{-3}$
Densidad de He^{2+}	n_α	$0.25 \times 10^6 \text{m}^{-3}$
Velocidad de flujo	$ V_{sw} $	$4.5 \times 10^5 \text{m s}^{-1}$
Dirección del flujo		casi radial
Temperatura de protones	T_p	$1.2 \times 10^5 \text{K}$
Temperatura de electrones	T_e	$1.4 \times 10^5 \text{K}$
Magnitud del CMI	$ B $	$7 \times 10^{-9} \text{T}$

Cuadro A.1: Propiedades del viento solar observadas a 1 UA, Kivelson y Russell (1995).

Con frecuencia es útil describir el viento solar en términos de los flujos o de las densidades de flujo de cantidades que son conservadas en el flujo de plasma. El Cuadro A.2 muestra los valores promedios para las densidades de flujo de partículas, momento en la dirección radial y energía portada por el viento solar al pasar por la órbita de la Tierra. El momento de flujo radial también es conocido como la presión dinámica debido al papel que juega en el confinamiento del campo magnético magnetosférico.

A partir de los valores del Cuadro A.1 se pueden calcular algunos parámetros

A.2. Algunos parámetros importantes del plasma

	Densidad de flujo	Flujo a través de la esfera a 1 UA
Protones	$3 \times 10^8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$8.4 \times 10^{35} \text{ s}^{-1}$
Masa	$5.8 \times 10^{-16} \text{ g cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$1.6 \times 10^{12} \text{ g s}^{-1}$
Momento radial	$2.6 \times 10^{-9} \text{ Pa}$	$7.3 \times 10^{14} \text{ N}$
Energía cinética	$0.6 \text{ erg cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$1.7 \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1}$
Energía térmica	$0.02 \text{ erg cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$0.05 \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1}$
Energía magnética	$0.01 \text{ erg cm}^2 \text{ s}^{-1}$	$0.025 \times 10^{27} \text{ erg s}^{-1}$
Flujo magnético radial	$5 \times 10^{-9} \text{ T}$	$1.4 \times 10^5 \text{ Wb}$

Cuadro A.2: Densidades del flujo del viento solar y flujos cerca de la órbita de la Tierra, Kivelson y Russell (1995).

básicos del plasma.

El Cuadro A.3 muestra algunas propiedades derivadas del viento solar cerca de la órbita de la Tierra.

Propiedad	Valor
Presión del gas	30 pPa
Velocidad del sonido	60 km s^{-1}
Presión magnética	19 pPa
Velocidad de Alfvén	60 km s^{-1}
Tiempo de colisión protón-protón	$4 \times 10^6 \text{ s}$
Tiempo de colisión electrón-electrón	$3 \times 10^5 \text{ s}$
Tiempo que le lleva al viento solar viajar desde la corona hasta 1 UA	$\sim 4 \text{ días} = 3.5 \times 10^5 \text{ s}$

Cuadro A.3: Propiedades del viento solar calculadas a 1 UA, Kivelson y Russell (1995).

A.2. Algunos parámetros importantes del plasma

Es importante recordar algunos parámetros del plasma que han sido de utilidad en cálculos de nuestra investigación como la velocidad de Alfvén, la β del plasma, etcétera.

El cuadrado de la *velocidad del sonido* (c_s^2) en un gas ionizado está dado por, ver por ejemplo Kivelson y Russell (1995)

$$c_s^2 = \gamma k_B \frac{\sum_j n_j T_j}{\sum_j n_j m_j} \quad (\text{A.1})$$

con $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ la constante de Boltzmann. El índice j corre para cada especie de partículas en el plasma y γ es el índice adiabático. Si consideramos a las

especies como electrones y protones, entonces la ecuación queda como

$$c_s = \left\{ \frac{\gamma p}{\rho} \right\}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \frac{\gamma k_B}{m_p + m_e} (T_p + T_e) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.2})$$

donde $\rho = n(m_p + m_e)$, m_p y m_e son las masas del protón y electrón respectivamente.

Considerando $\gamma = \frac{5}{3}$ y las temperaturas y densidades del Cuadro A.1 obtenemos un valor para la velocidad del sonido de $c_s \sim 60$ km/s.

La presión en un gas ionizado con igual densidad de electrones y protones es

$$p_{gas} = nk_B(T_p + T_e) \quad (\text{A.3})$$

donde T_p y T_e son las temperaturas de protones y electrones respectivamente. Entonces a la altura de la órbita de la Tierra la presión del gas es $p_{gas} = 30$ pPa.

La presencia de un campo magnético en un gas ionizado puede ocasionar efectos hidrodinámicos, la densidad de energía magnética es la presión ejercida por el campo dada por

$$p_{mag} = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (\text{A.4})$$

donde μ_0 es la permeabilidad en el vacío y tiene un valor de $4\pi \times 10^{-7}$ N/A². Usando el promedio de la intensidad del campo magnético reportado en el Cuadro A.1 podemos calcular la presión magnética a 1 UA, resultando $p_{mag} = 15$ pPa. Este valor es comparable con la presión del gas, lo que indica que los efectos magnéticos son tan importantes como los efectos de presión en el plasma del viento solar, Kivelson y Russell (1995).

La razón de las presiones térmica y magnética del gas es llamada la *beta del plasma* $\beta = p_{gas}/p_B$ e indica la importancia relativa de los efectos cinéticos sobre los magnéticos. Su expresión matemática es la siguiente

$$\beta = \frac{2\mu_0 p}{B^2} \quad (\text{A.5})$$

donde p es la presión del gas. Se dice que un plasma es *caliente* si $\beta \geq 1$ y un plasma es *frío* si $\beta \ll 1$. En el viento solar cercano a la Tierra se tiene $\beta \sim 1$, Priest (1982).

Como se ha mencionado, el viento solar es un plasma magnetizado debido al CMI y dado que la ley de Lorentz describe el movimiento de una partícula cargada en un campo eléctrico \vec{E} y un campo magnético \vec{B} , entonces la fuerza de Lorentz ejercida sobre una partícula de carga q , masa m y velocidad \vec{v} es

A.2. Algunos parámetros importantes del plasma

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{A.6})$$

En un campo magnético uniforme $\vec{B} = \text{cte}$ y por tanto $\vec{E} = 0$ de manera que la partícula sigue una trayectoria circular alrededor de las líneas de campo magnético con una girofrecuencia, ω_p , dada por

$$\omega_p = \frac{q|\vec{B}|}{2\pi m} \quad (\text{A.7})$$

El radio de ésta trayectoria circular es llamado el *giro radio* o *radio de giro* y depende de la componente de la velocidad perpendicular al campo magnético de la partícula, v_{\perp} ,

$$r_g = \frac{mv_{\perp}}{q|\vec{B}|} \quad (\text{A.8})$$

Para protones térmicos en el viento solar su girofrecuencia es $\omega_p \sim 0.1$ Hz y su giro radio es $r_{gp} \sim 50$ km. Para los electrones $\omega_p \sim 200$ Hz y $r_{ge} \sim 1$ km.

La oscilación de los electrones del plasma es la respuesta natural del plasma a las perturbaciones en la densidad de carga. Esta se puede considerar como la oscilación característica de un electrón que se desplaza ligeramente de su posición de equilibrio. La frecuencia característica de dicha oscilación, ω_{pe}^2 , está dada por

$$\omega_{pe}^2 = \frac{n_e e^2}{2\pi m_e \epsilon_0} \quad (\text{A.9})$$

donde ϵ_0 es la permitividad en el vacío. En el viento solar una frecuencia típica del plasma es $\omega_{pe} \sim 60$ kHz.

Otro parámetro importante del plasma es el *Número de Mach* o *Número de Mach magnetosónico*, M o M_{ms} , que mide la velocidad del flujo V_0 relativa a la velocidad del sonido, se puede calcular mediante la siguiente expresión, Priest (1982)

$$M = \frac{V_0}{c_s} \quad (\text{A.10})$$

Como la velocidad de flujo es ~ 450 km/s, el viento solar es altamente supersónico con un número de Mach $M = V_{sw}/c_s \sim 7$.

Por otro lado el *Número de Mach Alfvénico*, M_A , nos proporciona la velocidad del flujo en función de la velocidad de Alfvén; su expresión es la siguiente, Priest (1982)

$$M_A = \frac{V_0}{V_A} \quad (\text{A.11})$$

donde la velocidad de Alfvén, V_A , está dada por

$$V_A = \frac{B}{(\mu_0 n)^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{A.12})$$

con n y B la densidad y la intensidad del campo magnético del plasma. La velocidad de Alfvén para valores típicos del viento solar cercano a la Tierra posee un valor de $V_A = 60$ km/s y el Número de Mach Alfvénico es $M_A \sim 7$.

A.3. Longitud inercial de los iones

Las ecuaciones de Vlasov son un sistema de ecuaciones integro-diferenciales que describen la dinámica del plasma conformado por partículas cargadas con interacciones de largo alcance, por ejemplo interacciones coulombianas, donde la aproximación cinética de la ecuación de Boltzmann daba lugar a ciertas dificultades.

Al utilizar la aproximación magnetohidrodinámica en las ecuaciones de Vlasov es posible obtener la configuración de *campo congelado* establecida por el Teorema de Alfvén considerando las escalas características del plasma T, L, V para tiempo, longitud y velocidad, y para las cuales las distribuciones de las distintas especies de partículas que conforman al plasma pueden sufrir cambios importantes. Cuando estas escalas características son usadas en la ecuación de Vlasov es necesario también introducir la siguiente expresión de la velocidad del flujo $v = R/\omega_g$ donde R es el radio de giro de la partícula de que se trate (iones o electrones) y ω_g su girofrecuencia respectiva.

La condición de campo congelado se cumple si el giroperiodo y el giroradio son mucho menores que las escalas características de tiempo y longitud. El giroradio se puede calcular reemplazando V por la velocidad térmica (V_{th}) o por la velocidad de Alfvén (V_A) en cuyo caso se llama *longitud inercial*, c/ω_p

Para conocer la deducción matemática que se sigue para obtener una definición de longitud inercial partimos de introducir las escalas características T, L y V , que representan magnitudes de los diferentes parámetros que producen cambios grandes en la función de distribución de las partículas, f . Los cambios grandes significan que

A.3. Longitud inercial de los iones

$$\frac{\partial f}{\partial t} T \sim f \quad , \quad \left| \frac{\partial f}{\partial \vec{r}} \right| L \sim f \quad , \quad \left| \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} \right| V \sim f$$

entonces podemos escribir

$$t' = \frac{t}{T} \quad , \quad \vec{r}' = \frac{\vec{r}}{L} \quad , \quad \vec{v}' = \frac{\vec{v}}{V}$$

y entonces la ecuación de Vlasov puede escribirse como

$$\frac{1}{T} \frac{\partial f}{\partial t'} + \frac{V}{L} \vec{v}' \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{r}'} + \frac{q}{mV} (\vec{E} + V \vec{v}' \times \vec{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}'} = 0 \quad (\text{A.13})$$

Para poder hacer la aproximación que queremos usamos $V = R\omega_g$, donde $\omega_g = \frac{qB}{m}$ es la girofrecuencia y R el giroradio. Dividiendo entre ω_g , obtenemos

$$\frac{1}{\omega_g T} \frac{\partial f}{\partial t'} + \frac{R}{L} \vec{v}' \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{r}'} + \left(\frac{\vec{E}}{VB} + \vec{v}' \times \frac{\vec{B}}{B} \right) \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}'} = 0 \quad (\text{A.14})$$

si $\frac{1}{\omega_g} \ll T$ y $R \ll L$, que son el giroperiodo y el giroradio respectivamente, los primeros dos términos de la ecuación anterior serán mucho menor que uno pues $\frac{\partial f}{\partial t'} \sim 1$, $v' \lesssim 1$ y $\frac{\partial f}{\partial \vec{r}'} \sim 1$ de acuerdo a las definiciones que se hicieron de T, L y V . Como el último término de la ecuación anterior es de orden uno, podemos despreciar los dos primeros términos y escribir

$$\left(\frac{\vec{E}}{VB} + \vec{v}' \times \frac{\vec{B}}{B} \right) \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}'} \approx 0 \quad (\text{A.15})$$

entonces

$$(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}} \approx 0 \quad (\text{A.16})$$

Esta ecuación puede descomponerse en sus componentes paralela y perpendicular al campo:

$$\vec{E}_{\parallel} \frac{\partial f}{\partial v_{\parallel}} + (\vec{E}_{\perp} + \vec{v} \times \vec{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}_{\perp}} \approx 0 \quad (\text{A.17})$$

El siguiente paso es escribir $\vec{v} = \vec{v}_0 + \Delta\vec{v} \approx 0$ donde $\vec{v}_0 \times \vec{B} = -\vec{E}_{\perp}$; con esta sustitución obtenemos

$$\vec{E}_{\parallel} \frac{\partial f}{\partial \vec{v}_{\parallel}} + \Delta \vec{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}_{\perp}} \approx 0 \quad (\text{A.18})$$

si el campo eléctrico paralelo es pequeño, entonces

$$(\Delta \vec{v}_{\perp} \times \vec{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{v}_{\perp}} \approx 0 \quad (\text{A.19})$$

esta ecuación significa que la distribución es girotrópica. La velocidad media de una distribución girotrópica es cero. Por lo tanto, \vec{v}_0 es igual a la velocidad media \vec{u} y entonces tenemos

$$\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B} \approx 0 \quad (\text{A.20})$$

que es la condición de *campo congelado*. Como mencionamos al principio de esta sección, el giroradio se puede calcular reemplazando V por la velocidad térmica (V_{th}) o por la velocidad de Alfvén (V_A) en cuyo caso se llama *longitud inercial*, c/ω_p

Finalmente, las longitudes inerciales de los electrones y iones, c/ω_{pe} y c/ω_{pi} , para un plasma con densidad de electrones y iones n_e y n_i se pueden calcular mediante la siguiente expresión

$$\frac{c}{\omega_{pe}} = \frac{5.31 \text{ km}}{n_e^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{A.21})$$

$$\frac{c}{\omega_{pi}} = \frac{228 \text{ km}}{n_i^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{A.22})$$

Apéndice B

Sistema de referencia Hoffman-Teller

Un sistema de referencia en el cual el choque permanece en reposo es llamado un *sistema del choque*. Para pasar de un sistema de choque a otro sistema de choque que se encuentra en movimiento relativo uniforme respecto al primero, se deben aplicar las transformaciones relativistas apropiadas. Sin embargo, en general se usa una transformación no-relativista en la cual la transformación de la velocidad es galileana, el campo magnético no cambia y el campo eléctrico se obtiene a partir de una ecuación de la magnetohidrodinámica ideal en el sistema apropiado: $\vec{E} = -\vec{u} \times \vec{B}$.

En la Figura B.1(a) se ilustra el plano que contiene la normal al choque, \hat{n} , y el campo río arriba \vec{B}_u . Este mismo plano contiene al vector velocidad del flujo río arriba \vec{u}_u . En lo sucesivo se considerará un choque en una dimensión. En el *sistema de incidencia normal* conocido como NIF*, el flujo río arriba es paralelo a \hat{n} y el origen se marca con O . En este sistema existe un campo eléctrico debido al movimiento $\vec{E}_u = -\vec{u}_u \times \vec{B}_u$ que es perpendicular tanto a \vec{u}_u como a \vec{B}_u y que es paralelo al plano del choque. Este campo eléctrico convectivo puede hacerse cero pasando a un sistema de referencia donde no haya velocidad del flujo (el sistema del flujo río arriba) pero en este sistema el choque seguiría en movimiento. La alternativa es buscar un sistema de referencia en el cual el flujo río arriba y el campo magnético sean paralelos y el choque sea estacionario. Este nuevo sistema se obtiene a partir de cualquier sistema de choque añadiendo una transformación de la velocidad paralela al plano del choque. Esto se muestra en la Figura B.1(b) donde la transformación de la velocidad desde el NIF está indicada por el vector \vec{v}_{HT} y el origen en el nuevo sistema de referencia es O' . El nuevo sistema es llamado el *sistema*

*La abreviatura proviene de sus iniciales en inglés: *Normal Incidence Frame* y se considerará así en el texto por convención.

Hoffman-Teller identificado como HTF*.

En el HTF la velocidad del flujo río arriba \vec{u}'_u es paralela a \vec{B}_u . Nótese que \vec{B}_u es el mismo en todos los sistemas por que no estamos usando una transformación completamente relativista. De la Figura B.1(a) vemos que:

$$\vec{v}_{HT} = u_u \tan \theta_{Bn} \quad (B.1)$$

de manera que el factor requerido para la transformación de la velocidad aumenta rápidamente conforme θ_{Bn} se aproxima a 90° . También la suposición acerca de la transformación no-relativista no será válida si θ_{Bn} es suficientemente cercano a 90° ; y cuando θ_{Bn} es exactamente igual a 90° no es posible hallar un sistema que sea Hoffman-Teller.

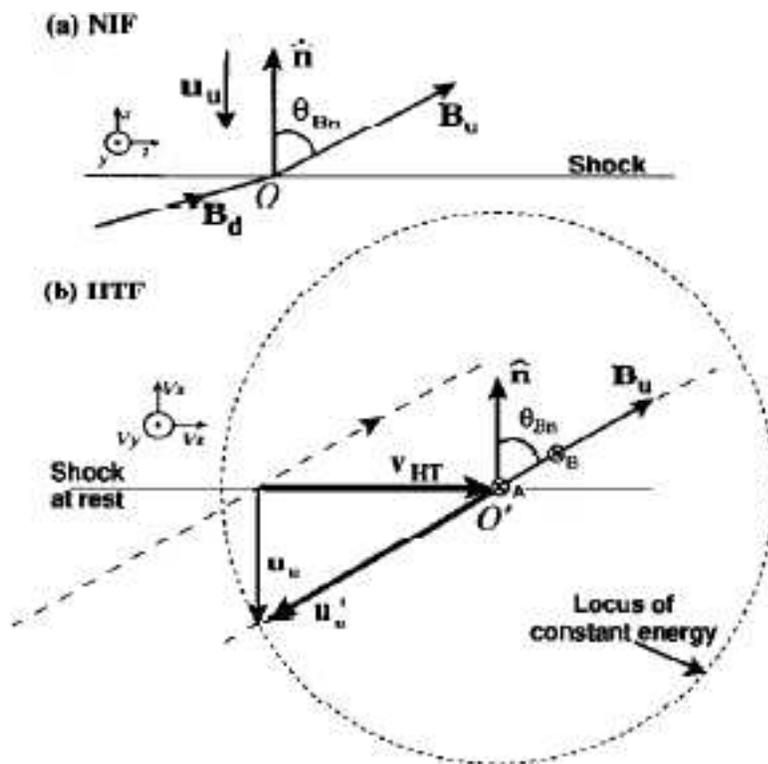


Figura B.1: Sistema de referencia Hoffman-Teller. Tomada de Kivelson y Russell (1995).

Se puede encontrar una expresión más general para \vec{v}_{HT} y para esto se aplica una transformación de la velocidad a un nuevo sistema en el cual todas las cantidades están indicadas por primas (') a excepción de \vec{B}_u :

*Nuevamente la abreviatura proviene del inglés *Hoffman-Teller Frame* y es usada por convención

$$\vec{u}'_u = \vec{u}_u - \vec{v}_{HT} \quad (\text{B.2})$$

Se considera que en el nuevo sistema de referencia el campo eléctrico convectivo es cero, $\vec{E}' = -\vec{u}_u \times \vec{B}_u = 0$ y entonces se relaciona esto con el flujo de la velocidad en el sistema original:

$$\vec{v}_{HT} \times \vec{B}_u = \vec{u}_u \times \vec{B}_u \quad (\text{B.3})$$

Efectuando el producto cruz de la ecuación anterior con la normal al choque tenemos que

$$\hat{n} \times (\vec{v}_{HT} \times \vec{B}_u) = \hat{n} \times (\vec{u}_u \times \vec{B}_u) \quad (\text{B.4})$$

ahora desarrollamos el miembro izquierdo y consideramos que $\vec{v}_{HT} \cdot \hat{n} = 0$ pues el choque permanece estacionario en el nuevo sistema; finalmente la expresión resultante es:

$$\vec{v}_{HT} = \frac{\hat{n} \times (\vec{u}_u \times \vec{B}_u)}{\hat{n} \cdot \vec{B}_u} \quad (\text{B.5})$$

Una de las propiedades del sistema Hoffman-Teller es que debido a la ausencia de campo eléctrico las partículas que se encuentran río arriba tienen un movimiento muy simple conformado por dos partes: un movimiento paralelo a la dirección del campo magnético y un movimiento de giro alrededor de las líneas de campo magnético. Otra consecuencia de que no haya campo eléctrico es que la energía de la partícula permanece constante y las superficies de energía constante para una partícula son casquetes esféricos centrados en el origen del sistema Hoffman-Teller.

Finalmente hay otra propiedad de este nuevo sistema de referencia que es importante. De la Ecuación B.5 vemos que la velocidad del flujo en el nuevo sistema depende de la componente normal del campo magnético y de la componente transversal de $\vec{u} \times \vec{B}$, pero de las condiciones de salto para un choque ($[B_n = 0]$, $[u_n \vec{B}_n - B_n \vec{u}_t] = 0$) sabemos que estas componentes son continuas a través del choque, de manera que la transformación de la velocidad en el sistema Hoffman-Teller es la misma río abajo que río arriba.

Bibliografía

- Allen, A., Schwartz, S.J., Harvey, C., Perry, C., Huc, C., Robert, P. Cluster Exchange Format - Data File Syntax CSDS Archive Task Group, DS-QMW-TN-0010 Issue: 2, ESA, 2008.
- Balogh, A., Carr, M.H., Acuña, M.W., Dunlop, T.J., Beek, P., Brown, K.-H., Fornaçon, E., Georgescu, K.-H., Glassmeier, J., Harris, G., Musmann, T., Oddy, K., Schwingenschuh, *The Cluster Magnetic Field Investigation: overview of in-flight performance and initial results*, Ann. Geophys., 19, 1207, 2001.
- Balogh, A., Schwartz, S.J., Bale, S.D., Balikhin, M.A., Burgess, D., Horbury, T.S., Krasnoselskikh, V.V., Kucharek, H., Lembège, B., Lucek, E.A., Möbius, E., Scholer, M., Thomsen, M.F. and Walker, S.N., *Cluster at the Bow Shock: Introduction*, Space Science Reviews 118: 155–160, 2005.
- Baumjohann, W. & Treumann, R.A. **Basic space plasma physics**. Imperial College Press, 1997.
- Billingham, L., Schwartz, S.J. y Sibeck, D., *The statistics of foreshock cavities: results of a Cluster survey*, Ann. Geophys., 26, 3653-3667., 2008.
- Blanco-Cano, X., Omid, N. and Russell, C.T., *How to make a magnetosphere*. Astronomy & Geophysics, Volume 45, Issue 3, pp. 3.14-3.17, 2004.
- Blanco-Cano, X., Omid, N. and Russell, C. T., *Macrostructure of collisionless bow shocks: 2. ULF waves in the foreshock and magnetosheath*. J. of Geophys. Res., 111, A10205, 2006. doi: 10.1029/2005JA011421.
- Blanco-Cano, X., Omid, N. and Russell, C.T., *Global hybrid simulations: Foreshock waves and cavitons under radial interplanetary magnetic field geometry*, J. Geophys. Res., 114, DOI 10.1029/2008JA013406, 2009.

- Blanco-Cano, X., *Bow Shocks In The Solar Wind: Lessons Towards Understanding Interplanetary Shocks*. Twelfth International Solar Wind Conference proceedings, submitted, 2009.
- Blanco-Cano, X., Kadjič, P., Omid, N. and Russell, C.T., *Foreshock Density Cavitons*. Submitted to Geophysical Res. Letters, 2010.
- Bonifazi, C., and G. Moreno, *Reflected and diffuse ions backstreaming from the Earth's bow shock: 1. Basic properties*. J. Geophys. Res., 86, 4381–4396, 1981.
- Cairns, I. H., Fairfield, D. H., Anderson, R. R., Carlton, V. E. H., Paularena, K. I., and Lazarus, A. J., *Unusual location of Earth's bow shock on September 24–25, 1987: Mach number effects*, J. Geophys. Res., 47–62, 1995.
- Cao, J., Duan, J., Du, A., Ma, Y., Liu, Z., Zhou, G.C., Yang, D., Zhang, T., Li, X., Vellante, M., Rème, H., Dandouras, I., Lucek, E., Carr, C.M., Zong, Q. and Li, Q., *Characteristics of middle- to low-latitude Pi2 excited by bursty bulk flows*, J. Geophys. Res., 113, A07S15, 2008. doi:10.1029/2007JA012629.
- Daly, P.W., *Users Guide to the Cluster Science Data System*. DS-MPA-TN-0015, ISSUE 3, ESA, 2008.
- Daly, P.W. and Konberg, E.A., *User Guide to the RAPID Measurements in the Cluster Active Archive*. CAA-EST-UG-RAP, Issue 1, ESA, 2009.
- Dandouras I. y A. Barthe, *User guide to the CIS measurement in the Cluster Active Archive*, CAA-EST-UG-CIS, Issue 1, ESA, 2009.
- Dubouloz, N. and Scholer, M. *On the origin of short large-amplitude magnetic structures upstream of quasi-parallel collisionless shocks*. Geophysical Research Letters, 20:547–550. doi:10.1029/93GL00803, 1993.
- Eastwood, J. P., A. Balogh, E. A. Lucek, C. Mazelle, and I. Dandouras (2005), *Quasi-monochromatic ULF foreshock waves as observed by the four-spacecraft Cluster mission: 2. Oblique propagation*, J. Geophys. Res., 110, A11220, 2005. doi:10.1029/2004JA010618.
- Eastwood, J. P., D. G. Sibeck, V. Angelopoulos, et al. *THEMIS observations of a hot flow anomaly: Solar wind, magnetosheath, and groundbased measurements*. Geophysical Research Letters, 35:17. doi:10.1029/2008GL033475, 2008.

-
- Escoubet, C. P., C. T. Russell, and R. Schmidt (eds.), **The Cluster and Phoenix missions**. Dordrecht: Kluwer, 1997.
- Fairfield, D. H., *Whistler waves observed upstream from collisionless shocks*. J. Geophys. Res. 79(10), 1368–1378, 1974.
- Farris, M. H. and Russell, C. T., *Determining the standoff distance of the bow shock: Mach number dependence and use of models*. J. Geophys. Res., 99, 17 681–17 689, 1994.
- Fitzenreiter, R.J., *The electron foreshock*. Advances in Space Research 15, 9-27, 1995.
- Fränz, M., Horbury, T.S., Génot, V., Moullard, O., Rème, O., Dandouras, I., Fazakerley, A.N., Korth, A.K. and F. Frutos-Alfaro, *Solitary waves observed by Cluster in the solar wind*. In: M. Velli, R. Bruno, and F. Malara (eds.): Solar Wind Ten: Proceedings of the Tenth International Solar Wind Conference. American Institute of Physics, pp. 562–565, 2003.
- French, P., Lucek, E., Brown, P., Oddy, T., Carr, C., *User Guide to the FGM measurements in the Cluster Active Archive*. CAA_EST_UG_FGM, Issue 1, ESA, 2008.
- Frutos-Alfaro, F., Korth, A., Fränz, M., Mouikis, C.G., Kistler, L.M., Klecker, B., Rème, H., Dandouras, I. and the CIS Team, *Cluster mission and data analysis for the March 2001 magnetic storm*. Geofísica Internacional, Vol. 43, Num. 2, pp. 217-223, 2004.
- Fuselier, S. A., Thomsen, M.F., Gosling, J.T., Bame, S.J. and Russell, C.T. *Gyrating and intermediate ion distributions upstream from the Earth's bow shock*. J. Geophys. Res., 91, 91– 99, 1986.
- Gary, S.P. **Theory of Space Plasma Microinstabilities**, Cambridge University Press, 1993.
- Giacalone, J., Schwartz, S.J. and Burgess, D. *Observations of suprathermal ions in association with SLAMS*. Geophysical Research Letters, 20:149–152. doi:10.1029/93GL00067, 1993.
- Gosling, J. T., Asbridge, J.R., Bame, S.J., Paschmann, G. and Sckopke, N. *Observations of two distinct population of bow shock ions in the upstream solar wind*, Geophys. Res. Lett., 5, 957– 960, 1978.
-

- Hoppe M.M., Russell, C.T., Frank, L.A., Eastman, T.E., Greenstadt, E.W., *Upstream Hydro-magnetic Waves and Their Association with Backstreaming Ion Populations' ISEE 1 and 2 Observations* J. Geophys. Res., VOL. 86, NO. A6, 4471-4492, 1981.
- Hoppe, M. M. and Russell, C.T., *Plasma rest frame frequencies and polarizations of the low frequency upstream waves: ISEE 1 and 2 observations* J. Geophys. Res. 88, 2021–2028, 1983.
- Hubert, D., and LeBlanc, F., *Basic properties of anisotropic stellar wind expansion in the fluid approach*, J. Geophys. Res., 110, A12104, 2005. doi:10.1029/2005JA011190.
- Kajdič P, Blanco-Cano, X., Omid, N. y Russell, C.T., *Statistical analysis of density cavitons in the Earth's foreshock*, J. Geophys. Res., submitted, 2009.
- Kim, K.-H., K. Takahashi, D.-H. Lee, N. Lin, and C. A. Cattell, *A comparison of Pi2 pulsations in the inner magnetosphere and magnetic pulsations at geosynchronous orbit*, J. Geophys. Res., 106, 18, 865, 2001.
- Kivelson, M. and Russell, C.T. **Introduction to Space Physics**, Cambridge University Press, U.S.A., 1995.
- Le, G. and Russell, C.T., *A study of ULF wave foreshock morphology - I: ULF foreshock boundary*. Planet. Space Sci. 40(9), 1203–1213, 1992.
- Lucek, E., Horbury, T.S., Balogh, A., et al. *Cluster observations of structures at quasi-parallel bow shocks*. Annales Geophysicæ, 22:2309–2313, 2004a.
- Lucek, E. A., Horbury, T.S., Balogh, A., Dandouras, I. and Rème, H., *Cluster observations of hot flow anomalies*, J. Geophys. Res., 109, A06207, 2004b. doi:10.1029/2003JA010016.
- Masters, A., Arridge, C. S. , Dougherty, M. K. , Bertucci, C., Billingham, L. , Schwartz, S. J., Jackman, C. M., Bebesi, Z., Coates, A. J. and Thomsen, M. F., *Cassini encounters with hot flow anomaly-like phenomena at Saturn's bow shock*, Geophys. Res. Lett., 35, L02202, 2008. DOI:10.1029/2007GL032371.
- Mazelle, C., Meziane, K., LeQuéau, D., Wilber, M., Eastwood, J.P., Rème, H., Sauvaud, J.A., Bosqued, J.M., Dandouras, I., McCarthy, M., Kistler L.M., Klecker, N., Korth, A., Bavassano-Cattaneo, M.B., Palocchia, G., Lundin, R., Balogh, A., *Production of gyrating ions from nonlinear wave-particle interaction upstream from the Earth's bow*

- shock: A case study from Cluster-CIS*, Planetary and Space Science 51, 785 – 795, 2003.
- Meziane, K. and d'Uston, C., *A statistical study of the upstream intermediate ion boundary in the Earth's foreshock*. Ann. Geophys. 16, 125–133, 1998.
- Meziane, K., Mazelle, C., Lin, R. P., Le Quéau, D., Larson, D.E., Parks, G. K. and Lepping, R.P., *Three-dimensional observations of gyrating ion distributions far upstream from the Earth's bow shock and their association with low-frequency waves*. J. Geophys. Res. 106(4), 5731–5742, 2001.
- Meziane, K., Wilber, M., Mazelle, C., Le Quéau, D., Kucharek, H., Lucek, E.A., Reme, H., Hamza, A.M., Sauvaud, J.A., Bosqued, J.M., Dandouras, I., Parks, G.K., McCarthy, M., Klecker, B., Korth, A., Bavassano-Cattaneo, M.B. and Lundin, R.N., *Simultaneous observations of field-aligned beams and gyrating ions in the terrestrial foreshock*. J. Geophys. Res. 109, A05107, 2004. doi:10.1029/2003JA010374.
- Meziane, K., Mazelle, C., Wilber, M., Le Quéau, D., Eastwood, J., Rème, H., Dandouras, I., Sauvaud, J., Bosqued, J., Parks, G.K., Kistler, L., McCarthy, M., Klecker, B., Korth, A., Bavassano-Cattaneo, M., Lundin, R. and Balogh, A., *Bow shock specularly reflected ions in the presence of low frequency electromagnetic waves: a case study*. Ann. Geophys. 22, 2325–2335, 2004.
- Narita Y., K.-H. Glassmeier, S. Schafer, et al., *Alfvén waves in the foreshock propagating upstream in the plasma rest frame: statistics from Cluster observations*, Annales Geophys., 22, 2325-2323, 2004.
- Øieroset, M., D. L. Mitchell, T.-D. Phan, R. P. Lin, and M. H. Acuña, *Hot diamagnetic cavities upstream of the Martian bow shock*, Geophysical Research Letters, 28, 887, 2001.
- Omidi, N., Blanco-Cano, X and Russell, C.T., *Macro-structure of collisionless bow shocks: 1. Scale lengths*. J. Geophys. Res., 110, A12212, 2005. doi:10.1029/2005JA011169.
- Omidi, N. *Formation of cavities in the foreshock*. In Turbulence and nonlinear processes in astrophysical plasmas, 6th Annual International Astrophysics Conference. AIP Conference Proceedings, Volume 932, pp. 181-190, 2007.

- Omidi, N., Sibeck, D.G. and Blanco-Cano, X., *The Foreshock Compressional Boundary*, J. Geophys. Res., 114, A08205. doi:10.1029/2008JA013950, 2009.
- Parker, E.N., *Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields*, Ap.J. 128, 664-76, 1958.
- Parks, G. K. et al., *Larmor size density holes discovered in the solar wind upstream of Earth's bow shock*, Phys. Plasmas, 13, 050 701, 2006.
- Parks, G. K., Lee, E., Lin, N., Mozer, F., Wilber, M., Lucek, E., Dandouras, I., Rème, H., Cao, J. B., Canu, P., Cornilleau-Wehrlin, N., Décréau, P., Goldstein, M. L., Escoubet, P., *Density holes in the upstream solar wind*, 6th Annual International Astrophysics Conference, AIP Conference Proceedings, Volume 932, pp. 9-15, 2008.
- Paschmann, G., Sckopke, N., Bame, S.J., Asbridge, J. R., Russell, C.T. and Greenstadt, E.W., *Association of low-frequency waves with suprathermal ions in the upstream solar wind*. Geophys. Res. Lett. 6, 209–212, 1979.
- Paschmann, G., Sckopke, N., Papamastorakis, I., Asbridge, J.R., Bame, S.J. and Gosling, J.T. *Characteristics of reflected and diffuse ions upstream from the Earth's bow shock*. J. Geophys. Res., 86, 4355–4364, 1981.
- Paschman, G., Schwartz, S.J., Escoubet, C.P. and Haaland, S., (Eds) **Outer Magnetospheric Boundaries: Cluster Results**, Ed. Springer, Space Science Series of ISSI, Vol 20, 2005.
- Priest, E.R. **Solar magneto-hydrodynamics**, D.Reidel Publishing Company, Holanda, 1982.
- Rème H., Aoustin C., Bosqued, J. M. et al., *First multispacecraft ion measurements in and near the Earth magnetosphere with identical Cluster Ion Spectrometry (CIS) Experiment*, Annal. Geophys., 19, 1303-1354, 2001.
- Russell, C. T., Childers, D.D. and Coleman, J.P.J., *OGO 5 observations of upstream waves in interplanetary medium: Discrete wave packets*. J. Geophys. Res. 76, 845–861, 1971.
- Russell, C.T., and Hoppe, M.M., *Upstream waves and particles*, Space Science Reviews, 34, 155-172, 1983.

-
- Russell, C.T., *The Solar Wind Interaction with the Earth's Magnetosphere: A Tutorial*. IEEE Trans. Plasma Sci., 28, 1818-1830, 2000.
- Russell, C.T., Blanco-Cano, X., Omidi, N., Raeder, J., Wang, Y.L., *The solar wind interaction with planetary magnetospheres*, in Multiscale Processes in the Earth's Magnetosphere: From Interball to Cluster, 15-35, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- Shue, J.H., Chao, J. K., Fu, H. C., Russell, C. T., Song, P., Khurana, K. K., and Singer, H. J., *A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape*. J. Geophys. Res., 102, 9497-9511, 1997.
- Schwartz, S. J., Chaloner, C. P., Hall, D. S., Christiansen, P. J., and Johnstones, A. D., *An active current sheet in the solar wind*, Nature, 318, 269-271, 1985.
- Schwartz, S. J. and D. Burgess. *Quasi-parallel shocks - A patchwork of three-dimensional structures*. Geophysical Research Letters, 18:373-376. doi:10.1029/91GL00138, 1991.
- Schwartz, S.J., Burgess, D., Wilkinson, W.P., *Observations of Short Large-Amplitude Magnetic-Structures at quasi-parallel shock*. J. Geophys. Res., Vol: 97, Pages: 4209 - 4227, 1992.
- Schwartz, S. J. *Hot flow anomalies near the Earth's bow shock*. Advances in Space Research, 15:107-116, 1995.
- Schwartz, S. J., Sibeck, D., Wilber, M., Meziane, K., Horbury, T. S., *Kinetic aspects of foreshock cavities*, J. Geophys. Res., 33, 12103, 2006.
- Schwartz, S. J., *Shocks: Commonalities in Solar-Terrestrial Chains*. Space Science Reviews, 124: 333-344, 2006. doi: 10.1007/s11214-006-9093-y
- Sibeck, D. G., Decker, R.B., Mitchell, D.G., Lazarus, A.J., Lepping, R.P. and Szabo, A., *Solar wind preconditioning in the flank foreshock: IMP 8 observations*, J. Geophys. Res., 106(A10), 21,675-21,688, 2001.
- Sibeck, D. G., Phan, T. D., Lin, R., Lepping, R. P., Szabo, A., *Wind observations of foreshock cavities: A case study*, J. Geophys. Res., 107, 1271, 2002.
- Sibeck, D.G., Omidi, N., Dandouras, I. y Lucek, E., *On the edge of the foreshock: model-data comparisons*, Ann. Geophys., 26, 1539-1544, 2008.

Stevens, M. L., and J. C. Kasper (2007), A scale-free analysis of magnetic holes at 1 AU, *J. Geophys. Res.*, 112, A05109, doi:10.1029/2006JA012116.

Thomas, V. A. and Brecht, S. H., *Evolution of Diamagnetic Cavities in the Solar Wind*, *J. Geophys. Res.*, 93, 11,341, 1988.

Treumann, R. A. and Scholer, M., *The magnetosphere as a plasma laboratory*. In: *The Century of Space Science*. Kluwer Academic, p. 1495, 2001

Tsurutani, B.T., Smith, E.J., Jones and D.E., *Waves Observed Upstream of Interplanetary Shocks*, *J. Geophys. Res.*, VOL. 88, NO. A7, 5645-5656, 1983.

Turner, J.M., Burlaga, L.F., Ness, N.F. and Lemaire, J.F., *Magnetic Holes in the Solar Wind*, *J. Geophys. Res.*, 82(13), 1921–1924, 1977.

Wilber, W., Parks, G. K., Meziane, K., Lin, N., Lee, E., Mazelle, C., Harris, A., *Foreshock Density Holes in the Context of Known Upstream Plasma Structures*, *Ann. Geophys.*, 26, 3741-3755, 2008.

Wilkinson, W.P., *The Earth's quasi-parallel bow shock: Review of observations and perspectives for Cluster*, *Planetary and Space Science*, 51, 629-647, 2003. doi:10.1016/S0032-0633(03)00099-0

Winske, D. and Omididi, N., *Hybrid codes: Methods and applications*. *Computer Space Plasma Physics: Simulation Techniques and Software*, ed. H. Matsumoto & Y. Omura, Terra Scientific, 103.

<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=8>

<http://caa.estec.esa.int/caa/home.xml>

http://www.cluster.rl.ac.uk/csdsweb-cgi/csdsweb_pick

http://sscweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/sscweb/Locator_graphics.cgi