

Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geofísica

La reconección magnética en el entorno terrestre

Tesis

que para obtener
el título de

Maestra en Ciencias

presenta:

Maya Lol Sosa Salas

Director de Tesis:

Dra. Xochitl Blanco Cano

Ciudad Universitaria abril 2007 SEGUNDA VERSIÓN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Índice general

Resumen	VI
1. La reconexión magnética	1
1.1. La magnetosfera terrestre	1
1.2. La reconexión magnética	7
1.3. Teoría	7
2. Eventos de transferencia de flujo (FTE)	17
2.1. Características magnéticas, del plasma y de las partículas energéticas en los FTEs	17
2.2. Funciones de distribución en los FTEs	19
2.3. Ondas de plasma en los FTEs	21
2.4. Modelos de FTEs	22
3. Análisis de perturbaciones y FTEs sencillos	25
3.1. Características de los FTEs	25
3.2. FTE+perturbaciones aledañas	27
3.3. FTE+perturbaciones lejanas	30
4. Análisis de perturbaciones y FTEs múltiples	45
4.1. FTEs múltiples	45
4.2. FTEs múltiples + perturbaciones aledañas + perturbaciones lejanas	47
5. Distribución espacial, viento solar y FTEs	57
5.1. Ubicación de los FTEs	57
5.2. Características del viento solar y los FTEs	60
6. Eventos conjuntos de Polar y Cluster	69
6.1. Altas y bajas latitudes	69

Conclusiones	85
A. Métodos matemáticos utilizados	87
A.1. Análisis de Fourier	87
A.2. Análisis de variación mínima	89
A.3. Método de Máxima Entropía	90
A.4. El sistema de coordenadas LMN	91
A.5. Análisis de datos de campo magnético	92
B. Las naves espaciales de los datos utilizados	95
B.1. Breve descripción de ACE	95
B.2. Breve descripción de Polar	95
Bibliografía	99

Índice de figuras

1.1.	La magnetosfera terrestre	2
1.2.	Modelo de Dungey de magnetosfera abierta	5
1.3.	La magnetosfera y sus sistemas de corrientes.	6
1.4.	El proceso de reconexión magnética. Las líneas punteadas indican la posición de la hoja de corriente inicial ($t=0$), las flechas delgadas indican la dirección del campo, mientras que las gruesas expresan la dirección del plasma. [Lee, 1995]	8
1.5.	a) reconexión en el modelo de Sweet-Parker, b) Modelo de reconexión simétrico de Petschek.	9
1.6.	Modelo de reconexión asimétrica. Una discontinuidad rotacional y una onda de expansión lenta se presentan en la capa de reconexión. [Levy et al., 1964]	11
1.7.	reconexión cuasi-estacionaria en la región de la magnetopausa. Los iones de la magnetofunda (magnetosféricos) son reflejados en la magnetopausa y entran en MSBL (LLBL), ó cruzan la magnetopausa y entran a la LLBL (Low latitude boundary layer) (MSBL (magnetosheath boundary layer)). [Gosling et al, 1990]	13
1.8.	Funciones de distribución esperadas para la MSBL (a) y la LLBL (b) para un cruce de la magnetopausa al norte de la línea de reconexión. Si la velocidad en el marco dHT es pequeña la temperatura de la magnetofunda es alta, entonces las distribuciones de los iones reflejados y transmitidos en la MSBL no pueden ser distinguidos. La reflexión es difícil de observar en LLBL pues la distribución de iones transmitidos de la funda domina	14
2.1.	Datos de plasma y campo magnético de ISEE 2 el 8 de noviembre de 1977 [Elphic, 1995], de arriba a abajo se tiene: la densidad total del plasma, la densidad parcial de iones y electrones con energías $>5\text{keV}$, la velocidad de bulto de iones, la temperatura de iones y electrones y el campo magnético en coordenadas normales	18
2.2.	Datos de alta resolución (4 s) del campo magnético en coordenadas NLM y momentos del plasma (12 s) mostrando el FTE del 11 de septiembre de 1979. Las dos líneas verticales sólidas muestran la región del FTE [Le et al., 1999].	20
2.3.	Funciones de distribución de la velocidad del plasma tomadas en (a) la magnetosfera, (b) la magnetofunda y (c) y (d) en un FTE [Le et al., 1999]).	21
2.4.	(arriba) Medidas de campo magnético de ISEE 1 y 2 durante FTEs en coordenadas normales, (abajo) Estructura magnética inferida del FTE [Russell y Elphic, 1978].	24

3.1. Descripción de los parámetros del FTE y las perturbaciones por analizarse	27
3.2. FTE 3/mar/03 en coordenadas NLM	32
3.3. (a) Campo magnético de las perturbaciones antes del FTE, (b) espectro de poder FFT (c) Máxima entropía y (d) Mínima varianza	33
3.4. (a) Perturbaciones después del FTE en coordenadas NLM, (b) espectro de poder, (c) hodogramas. El trazo comienza en la cruz y termina en el asterisco.	34
3.5. Medidas de ACE para el día 3/marzo/03	35
3.6. Perturbaciones en el centro del FTE en coordenadas NLM	36
3.7. (a) Perturbaciones en el centro del FTE en coordenadas NLM, (b) análisis de Fourier, (c) hodograma	37
3.8. Distribución de los FTEs con perturbaciones aledañas. Derecha: todos los eventos, Izquier- da: sur (cruces), norte (rombos)	38
3.9. Características de las perturbaciones aledañas	39
3.10. FTE con perturbaciones lejanas (4 marzo 01)	40
3.11. Valores de ACE para el FTE (4 marzo 01)	41
3.12. (a) Perturbaciones lejanas después del FTE en coordenadas NLM, (b) hodogramas, (c) Máxima Entropía y (d) Espectro de poder FFT para el 4 de marzo del 2001	42
3.13. Distribución de los FTE con perturbaciones lejanas y dividido por polaridades. Sur (cruz), Norte (rombos)	43
3.14. Características de las perturbaciones lejanas	44
4.1. Distribución espacial de los FTEs múltiples y su división por polaridad del campo magnético interplanetario observado por ACE. Con rombos se indica la polaridad norte y con cruces los que tienen polaridad sur.	46
4.2. 17 de febrero del 2003 / Medidas del Campo magnético (MFE) de Polar. Entre cada recuadro punteado se encuentra un FTE	48
4.3. Medidas del campo interplanetario / ACE 17 de febrero 2003 FTEs múltiples	49
4.4. Características de los FTEs y perturbaciones aledañas y/o lejanas, para los eventos con muchos FTEs seguidos	50
4.5. FTEs múltiples (FTE I y II) + perturbaciones aledañas (cerca de FTE I) + perturbaciones lejanas (ondas 1 y 2)	51
4.6. Ondas 1, 18 febrero 2003 (a) Componente normal del campo magnético, (b) Mínima va- rianza, (c) FFT, componente transversal (línea punteada), compresiva (línea continua) y (d) Máxima entropía	52
4.7. Ondas 2, 18 febrero 2003, (a) Zoom a la componente n del campo magnético, (b) ho- dograma, (c) espectro de Fourier, componente transversal (línea punteada), componente compresiva (línea continua), y (d) Métodos de Máxima Entropía	54
4.8. Los porcentajes de los FTEs y su formas.	55

5.1. (izq) Ubicación de los FTE vistos por Polar en coordenadas GSM (geocentric solar magnetospheric coordinates, con el eje x dirigido al Sol, z en dirección del dipolo y el eje y completa la triada), (der) modelo T96 [Tsyganenko et al, 1995].	58
5.2. División de los FTEs por latitudes: (cuadrado) latitudes bajas, (cruz) latitudes medias, (triángulo) latitudes altas	59
5.3. Registros de ACE para el 23 de marzo del 2002 (a) todo el día, (b) la parcela de viento solar asociada al FTE, donde "RBx" = b_x/b_t	61
5.4. Localización de los FTEs con bz sur (cruces) y norte (rombos)	63
5.5. Parámetros del viento solar vs duración del FTE para diferentes latitudes. Bajas (cruces), Medias (rombos), Altas (cuadrados)	65
5.6. Parámetros del viento solar vs amplitud del FTE para diferentes latitudes. Bajas (cruces), Medias (rombos), Altas (cuadrados)	66
5.7. Correlaciones a latitudes bajas con componente sur y norte. Campo magnético interplanetario con componente sur (cruces), norte (rombos)	67
6.1. Ubicación de las naves el 21 de marzo del 2002	70
6.2. FTE en coordenadas NLM observado por la nave Polar el día 21 de marzo del 2002	71
6.3. Acercamiento a las perturbaciones, hodograma y espectro de Fourier para las oscilaciones ANTES del FTE	73
6.4. Acercamiento a las perturbaciones, hodograma y espectro de Fourier para las oscilaciones DESPUES del FTE	74
6.5. Medidas de campo magnético de Polar y Cluster del 21 de marzo del 2002. Con líneas punteadas verticales se muestran los respectivos FTEs	75
6.6. Datos de Cluster 1 obtenidos del sitio de Cluster en internet	76
6.7. Acercamiento a la región cercana al FTE visto por Cluster	77
6.8. Acercamiento al FTE visto por Cluster	78
6.9. Viento solar y FTE marcado con una línea punteada	79
6.10. Posiciones de Polar y Cluster para el 17 de febrero del 2003	80
6.11. 17 de febrero del 2003 / Medidas del Campo magnético (MFE) de Polar. Entre cada región coloreada se encuentra un FTE	81
6.12. Datos del campo magnético de alta resolución de la nave Cluster para el mismo intervalo que Polar (12:50-13:10), mostrado en la figura 6.11	82
6.13. Medidas del plasma de Cluster	83
6.14. Medidas del campo interplanetario / ACE 17 de febrero 2003	84
A.1. Sistema de coordenadas normal a la frontera [Russell y Elphic, 1978]	92
B.1. Dibujo de ACE con sus principales aparatos	96
B.2. Dibujo de Polar con sus principales aparatos	98

Resumen

A lo largo de los años de estudio de la física espacial ha quedado en evidencia la importancia de la reconexión magnética en el intercambio de momento y energía entre el plasma solar y el terrestre. Dada esta importancia, en esta tesis se hace un análisis de las perturbaciones aledañas y lejanas a eventos de transferencia de flujo (FTE por sus siglas en inglés, Flux Transfer Events) debidos a la reconexión magnética en la zona de la magnetosfera y la magnetofunda terrestre.

En el capítulo 1 ubicamos la región del espacio que estudiaremos, la magnetosfera. Describimos sus regiones y la física asociada a ellas, llegando al concepto de reconexión magnética. Discutimos brevemente la teoría de la reconexión, y hacemos un resumen de algunos modelos magnetohidrodinámicos, cinéticos y algunos híbridos.

En el capítulo 2 desarrollamos la teoría de los eventos de transferencia de flujo, sus características magnéticas, del plasma, de las partículas energéticas, sus funciones de distribución, las ondas encontradas cerca de ellos y los diferentes modelos que explican su existencia y funcionamiento.

Analizamos los datos de campo magnético de 54 eventos obtenidos por la nave Polar y caracterizamos las perturbaciones cerca de los FTEs a partir de un análisis de Fourier, mínima variación y máxima entropía, encontrando diferentes tipos de ondas electromagnéticas en el plasma y dos tipos de FTEs, los sencillos (eventos de transferencia aislados o alejados en tiempo, capítulo 3) y los múltiples (días donde existen más de un FTE, capítulo 4)

En el capítulo 5 discutimos acerca de la distribución espacial de los FTEs y los parámetros del viento solar obtenidos por la nave ACE. Calculamos las correlaciones entre la duración y la amplitud de los FTEs y la componente z del campo magnético del viento solar, la presión dinámica y el campo eléctrico convectivo, realizando el análisis a distintas latitudes.

Después se escogieron ciertos eventos y se hizo el análisis a partir de los datos de la nave Cluster para comparar las perturbaciones en diferentes localidades. Encontrando diferencias sustanciales entre los FTEs para bajas y altas latitudes (capítulo 6).

En los apéndices se encuentran los métodos matemáticos utilizados (Apéndice A: análisis de Fourier, Variación mínima, Método de Máxima Entropía, análisis de campo magnético y coordenadas) y en el apéndice B breves descripciones de las naves ACE y Polar.

Capítulo 1

La reconexión magnética

1.1. La magnetosfera terrestre

En ausencia del plasma interplanetario, el dipolo magnético de la Tierra se difundiría indefinidamente en todas direcciones. Sin embargo, el campo geomagnético produce un obstáculo contra el cual interacciona el viento solar, de dicha interacción resulta una cavidad llamada magnetosfera.

La naturaleza básica de la interacción entre el viento solar y el campo magnético de la Tierra fue deducida en sus principios por Chapman y Ferraro en la década de 1930. Esto sigue como consecuencia de la ley de Faraday, del hecho de que en un plasma conductor el campo eléctrico en el marco de referencia debe ser cercano a cero, de otra forma, grandes corrientes serían manejadas. Como resultado de este congelamiento mutuo, los campos magnéticos son transportados por el flujo del plasma. El segundo principio se refiere a los efectos del campo magnético sobre el plasma, el cual debe cumplir con la fuerza de Lorentz experimentada por la partícula. Aplicando estas ideas de interacción entre el campo y el viento solar, se concluyó que el plasma del viento solar está congelado en el campo del medio interplanetario del Sol y el plasma de la Tierra en el campo de la Tierra, así los plasmas no se mezclan.

El viento solar es un plasma supersónico en el espacio interplanetario, cuando se encuentra con la magnetosfera se forma una onda de choque (choque de proa) en frente de la magnetopausa, ver figura (1.1). La nariz de la onda de choque se forma a 15 radios terrestres (r_T), pero su posición varía sensiblemente con los cambios del viento solar.

Cualquier onda de choque en un plasma magnetizado debe obedecer ciertas condiciones de frontera, basadas en las leyes de conservación de masa, momento, energía y flujo magnético. La onda de choque resulta de la compleja interacción entre el plasma y campos electromagnéticos, es así un choque magnetohidrodinámico, aunque dado que el plasma es no colisional los efectos cinéticos son importantes. Debido a su alta conductividad, el viento solar en esa zona es deflectado como un flujo alrededor de la magnetosfera. El choque es delgado cuando la normal al frente de choque es casi perpendicular al campo magnético del viento solar (choque cuasi-perpendicular), y la onda de proa es muy extendida cuando la normal al choque es paralela al campo magnético (choque cuasi-paralelo), [Russell, 1995].

La magnetopausa es la superficie donde la fuerza hacia afuera del campo geomagnético comprimido combinado con la presión del plasma magnetosférico se balancea con la fuerza

del plasma (presión dinámica) del viento solar. La magnetosfera resultante parece una bala en el lado día y un cilindro largo en el lado noche. La magnetosfera se extiende aproximadamente hasta los $10 r_T$ en dirección solar, y hasta $60 r_T$ en la dirección antisolar. El campo magnético interplanetario es arrastrado tendiendo a alinearse tangencialmente con la magnetopausa. En esta región, la intensidad del campo magnético varía entre 5 y 20γ y el campo fluctúa en periodos de tiempo cortos ($\gamma=1$ nT).

La región entre la magnetopausa y la onda de choque es llamada la magnetofunda, es una región de campo desordenado con plasma comprimido, calentado y con distribución irregular. El choque reduce la velocidad del viento solar hasta casi 250 km/s y la energía cinética es disipada como energía térmica de tal forma que la temperatura alcanza valores hasta de 5×10^6 K, por lo que la región tiene temperaturas entre 5 y 10 veces mayor que el viento solar. Esta es zona de viento chocado, y así el viento se vuelve subsónico.

El interior de la magnetosfera se puede dividir en varias grandes regiones: los anillos de radiación interior y exterior, la hoja de plasma, los conos polares, la cola y el manto. Aunque como es claro dependiendo de la orientación, lado día o noche, la geometría cambia. La figura (1.1) muestra la magnetosfera terrestre y las principales regiones que se describirán a continuación.

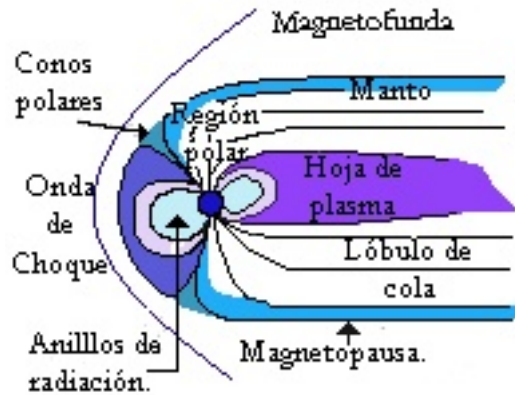


Figura 1.1: La magnetosfera terrestre

La estructura dipolar del campo magnético terrestre genera un mecanismo con el cual atrapa partículas cargadas en cierta región específica llamada los anillos de radiación, alrededor del ecuador. El movimiento de las partículas atrapadas sigue los tres invariantes adiabáticos. Para partículas en campos magnéticos, un invariante es asociado con cada uno de los tres tipos de movimiento que describe una partícula cargada: el movimiento giro-ciclotrón alrededor del campo magnético (milisegundos), el movimiento longitudinal a lo largo de las líneas de campo magnético (segundos), y el movimiento de deriva el cual, es perpendicular al campo magnético (10 minutos).

El anillo de corriente rodea el ecuador magnético y está localizado típicamente entre 3 y $6 r_T$. Alrededor de $4 r_T$ el anillo de corriente involucra la deriva de las partículas alrededor de las líneas de campo magnético, moviéndose alrededor de la Tierra, hacia el oeste para los iones y hacia el este los electrones. La densidad típica de iones energéticos en estos anillos o cinturones es de 1 part/cm³ y los electrones tienen menor energía generalmente.

La energía típica del ión en la porción exterior del cinturón de radiación es de unos 50 keV. La principal fuente de partículas de baja energía en los anillos exteriores son el viento solar y la ionosfera. Las partículas del viento solar se introducen durante las tormentas geomagnéticas, mientras que los iones ionosféricos son acelerados en las regiones de captura por campos eléctricos paralelos. Durante un disturbio magnético, la densidad del número de electrones atrapados con energías bajas se incrementa rápidamente debido a los electrones inyectados de la magnetocola, seguido de un decaimiento exponencial en la intensidad. El decaimiento es debido a las interacciones de los electrones con el cambio del ángulo de inclinación, y permite a los electrones penetrar profundamente en la atmósfera a altas latitudes, donde se pierden en colisiones con componentes neutras.

Los conos polares son una región particularmente interesante de la magnetosfera. Primero, representan, como su nombre lo indica, una cúspide de la magnetopausa, que perturba severamente el flujo externo. Segundo, los conos poseen una morfología de campo única, con las líneas de campo extendiéndose como una gran sombrilla sobre la magnetopausa. Los conos o cuñas polares son una región estrecha, elongada en longitud y que se extienden desde las altas latitudes de la magnetopausa hasta la ionosfera polar. La composición del plasma es cercana en propiedades al plasma de la magnetofunda, y por lo tanto se asume que es originado ahí. Los dos conos (uno en cada hemisferio) son líneas de campo magnético que se extiende directamente dentro de la magnetofunda y el plasma que allí se encuentra entra al cono por flujo paralelo al campo magnético. La región más exterior de los conos polares está caracterizada por temperaturas elevadas y flujos irregulares en dirección y magnitud. Estas características los vuelve distinguibles del flujo libre de la magnetofunda. Las propiedades del flujo irregular pueden ser entendidas si notamos que el flujo a través de los conos es un símil del flujo hidrodinámico alrededor de una esquina. Se tiende a la formación de remolinos y de separación del flujo en esta región. Las líneas de flujo libre varían mucho con respecto al tiempo.

El manto de plasma, es una pequeña capa de plasma que tiene energías del orden de las del viento solar pero fluye en una región de alta latitud de la cola. Esta capa está limitada en el lado solar por los conos polares. El manto de plasma aparentemente contiene plasma que ha penetrado la magnetopausa por la región polar donde el campo magnético de la magnetopausa no es suficientemente fuerte para repeler el plasma incidente del viento solar. El manto de plasma fluye a lo largo de las líneas de campo de la cola.

Como una consecuencia particular de la geometría de los conos polares, las líneas de campo que cruzan el ecuador del lado día y las líneas que se extienden lejos en la magnetocola se unen en la región de los conos. Esto da una manera simple de transportar plasma de la capa de entrada al manto de plasma. La convección magnetosférica transporta flujos magnéticos del la zona cercana al Sol hacia el lado de la cola. Las partículas que tienen diferentes velocidades paralelas a lo largo de la línea de campo serán afectadas diferentemente por la velocidad de convección. Partículas con velocidades paralelas pequeñas serán más eficientemente transportadas al interior de la cola que partículas con velocidades paralelas mayores. Este efecto de velocidad de filtro inmediatamente explica por que las energías características del plasma decrecen con el incremento de la distancia de la magnetopausa. A bajas altitudes esto corresponde a un decremento en el promedio de energía cuando se incrementa la latitud.

En contraste con el lado diurno de la magnetosfera, confinado por el viento solar, el lado nocturno está estirado en una larga cola magnética o magnetocola. Esta parte de la magnetosfera es muy dinámica, en ella tienen lugar grandes cambios, y a menudo los iones y electrones

están energizados. La cola magnética es también el origen principal de la aurora polar. Se creía que los electrones de las auroras provenían del Sol y el hecho de que la aurora pareciera concentrarse en la parte que miraba al lado contrario al Sol desconcertaba a todo el mundo. Estas observaciones tuvieron mucho más sentido después de que los satélites descubrieran y cartografiaran la larga cola de la magnetosfera. La mayor parte del volumen de la cola lo forman dos grandes haces de líneas de campo casi paralelas. El haz al norte del ecuador apunta hacia adentro de la Tierra y cubre una región casi circular que incluye al polo norte, mientras que el haz sur apunta hacia fuera de la Tierra y está unido a la región polar sur. Estos dos haces, conocidos como lóbulos de la cola, se extienden lejos: los satélites ISEE-3 y Geotail encontraron estos haces bien definidos incluso a 200-220 r_T . A esas distancias, los lóbulos estaban ya poblados por algo del plasma del viento solar, pero cerca de la Tierra están casi libres. Esta densidad tan baja nos sugiere que las líneas de campo del lóbulo se conectan finalmente al viento solar, en algún lugar lejos de la Tierra. Los iones y electrones pueden así fluir fácilmente a lo largo de las líneas de campo de los lóbulos, hasta que son barridos por el viento solar; pero algunos, muy pocos, iones del viento solar se pueden oponer al flujo general del viento y encaminarse hacia la Tierra. Con este tráfico en un solo sentido, poco plasma permanece en los lóbulos.

Existen diferentes modelos que tratan de explicar la dinámica de la magnetosfera. En el modelo de magnetosfera cerrada, originalmente propuesto por Oxford y Hines (1961), la viscosidad asociada con la difusión del plasma de la magnetosfera a través de la capa límite es responsable de la convección del plasma magnetosférico. La capa límite de plasma, el manto, es menos importante en los modelos de magnetosfera abierta, en donde hay algunas líneas de campo magnético (las líneas abiertas se expanden hacia el espacio interplanetario, (Dungey, 1961). Si el plasma de la cola se fuga constantemente de la hoja de plasma, llegarán nuevos iones y electrones que ocuparán su puesto, de otro modo la hoja se reduciría drásticamente y el extenso campo de la cola se colapsaría rápidamente. La teoría de la reconexión de James Dungey sugiere lo siguiente: En un plasma ideal, los iones y electrones que comparten una línea de campo se mueven juntos y continúan compartiéndola siempre. Dungey proporcionó una excepción a esta regla, que es la de que cuando el plasma fluye a través de un punto neutro o línea neutra, en el cual la fuerza magnética sea cero, los plasmas a ambos lados de ese punto se pueden separar y pueden reconectarse a líneas de campo diferentes. Dungey sugirió que tal punto neutro existía en el frente de la magnetopausa (marcado con la N en la figura 1.2). Propuso que las líneas de campo interplanetarias (con su plasma marcadas como 2 en la figura 1.2) se enlazaban aquí con las terrestres, formando líneas compuestas como la marcada con el 3 en 1.2.

Esa línea incluye una curva cerrada: la mayoría del plasma sobre la sección más allá de la curva es interplanetario, la mayor parte del de la sección más cercana a la Tierra es terrestre. Sin embargo, ambos plasmas se mueven conjuntamente, compartiendo la misma línea y mezclándose lentamente. Un momento después, esa línea se habrá movido hacia la derecha, a la posición de la línea 4, luego a la posición 5 en 1.2, y luego, quizá media hora más tarde, se volverá a repetir el proceso de reconexión en algún lugar lejano a la Tierra, en un punto o línea neutra cerca del número 6. Las partes interplanetarias se juntan de nuevo y fluyen lejos, y también se reúnen las mitades terrestres. Despreciando las pérdidas en los puntos de los límites, como la curva cerrada en la línea 3, comprendemos que el proceso anterior puede transportar plasma hasta la cola. Dungey propuso que entonces el plasma fluiría de nuevo hacia la Tierra, por la lámina de plasma. Esto crearía una circulación

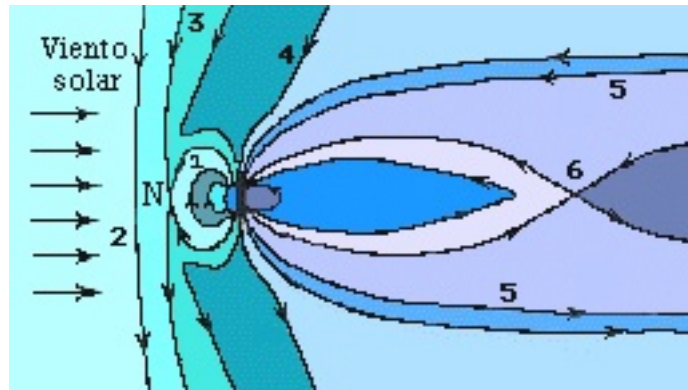


Figura 1.2: Modelo de Dungey de magnetosfera abierta

constante de plasma en la magnetosfera y también proporcionaría nuevos iones y electrones a la lámina de plasma, desde la proximidad de 6; proceso frecuentemente llamado convección. Si todas las partículas de una línea de campo se mueven conjuntamente, cuando el plasma de la cola se conduce hacia la Tierra, las partículas sobre las mismas líneas de campo, pero encima de la atmósfera se deberán mantener con ellas. Los flujos de plasma en esa región, consecuentes con la predicción de Dungey, han sido observados realmente por antenas de exploración y por instrumentos de dirección abordo de satélites cercanos a la Tierra, en órbitas que cruzan las regiones polares a baja altitud. Sin embargo, en la propia cola, ha sido difícil confirmar el flujo hacia la Tierra, el cual aparenta ser más bien errático, penetrando abruptamente y a estallidos, especialmente durante las subtormentas magnéticas. Es difícil de precisar el distante punto neutro 6 usando sólo satélites aislados, sin embargo, las observaciones del Geotail sugieren que esta separación ocurre a unos 70-100 r_T en el lado nocturno.

En la magnetosfera existen 3 sistemas de corrientes: la corriente de la magnetopausa, la corriente de la hoja neutra y la corriente de anillo. Estas corrientes se ilustran en la figura (1.3) con flechas sólidas negras y también se representa de manera tridimensional a la magnetosfera.

La interacción entre el plasma de la magnetofunda y el campo geomagnético generan una frontera de corriente la cual define la magnetopausa. Otro sistema de corrientes se forma de la hoja neutral de plasma que separa los campos magnéticos opuestos que emergen de los cascos polares norte y sur. Esta corriente también fluye del amanecer al crepúsculo y presumiblemente emerge con la corriente de la cola para formar un circuito cerrado. La hoja neutral de corriente es de aproximadamente 10^5 amperes por r_T , después de 30 r_T la corriente comienza a decrecer lentamente. En la hoja neutral de corriente el promedio de energía de las partículas está entre 0.5-1 keV para los electrones y 2-5 keV para los iones, y la densidad típica de partículas es de 0.5 cm^{-3} para iones y electrones. El anillo de corriente rodea el ecuador magnético y está localizado típicamente entre 3 y 6 r_T . Sobre los 4 r_T el anillo de corriente involucra la ligera deriva de las partículas alrededor de las líneas de campo magnético, gradualmente moviéndose alrededor de la Tierra, hacia el oeste para los iones y para el este los electrones. Típicamente, las partículas que constituyen el anillo de corriente tienen una energía media de aproximadamente 85 keV y mayoritariamente (90%) de las partículas tienen rangos de energía entre los 10 a los 250 keV.

A bajas altitudes del campo eléctrico, paralelo a las líneas del campo dipolar magnético,

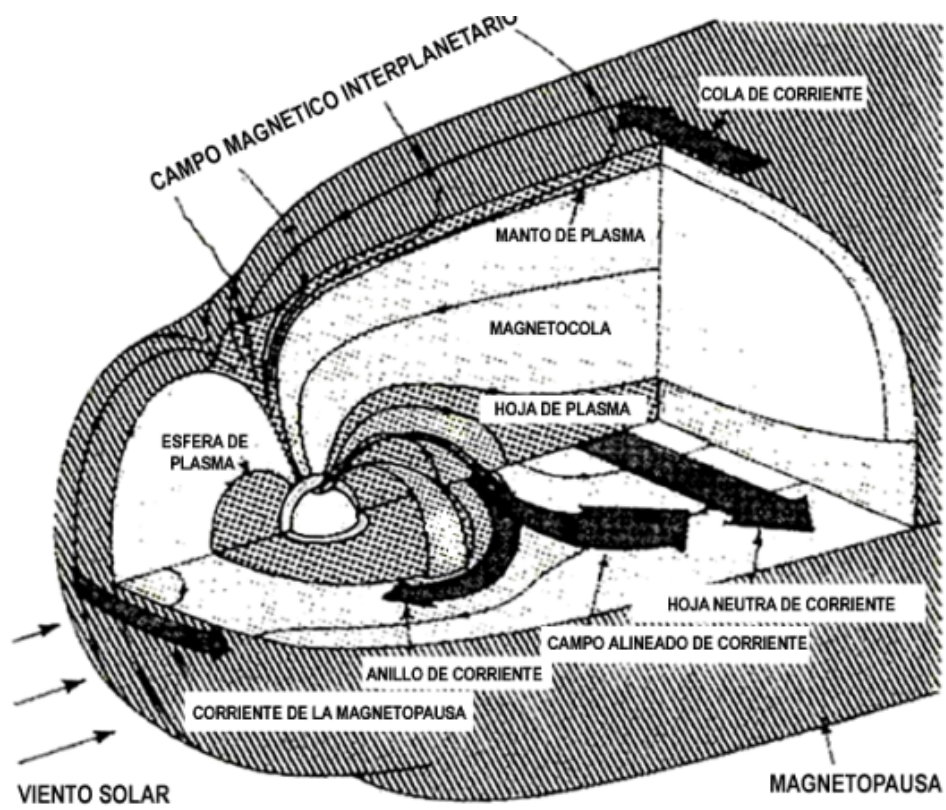


Figura 1.3: La magnetosfera y sus sistemas de corrientes.

los electrones son acelerados hacia abajo hacia la ionosfera y los iones ionosféricos positivos hacia la magnetosfera. A grandes altitudes, el flujo resultante saliente es llamado el viento polar.

A principios del siglo pasado Birkeland concluyó de sus estudios de corrientes en las zonas aurales, que esas corrientes estarían cerradas por corrientes verticales que se extenderían más allá de la ionosfera. Actualmente se ha observado un flujo neto de corriente hacia la ionosfera en el sector mañana, y un flujo neto saliente en el sector tarde. Las corrientes varían con la actividad geomagnética pues las líneas de campo a través de las cuales las corrientes fluyen se van hacia la magnetocola.

1.2. La reconexión magnética

El concepto de reconexión magnética fue sugerido por primera vez en la literatura por Giovanelli [Giovanelli, 1946, Giovanelli, 1947] estudiando los fenómenos magnéticos y eléctricos en la atmósfera solar asociados con las manchas solares y ráfagas. El primer modelo fue propuesto por Sweet y Parker [Parker, 1957, Sweet, 1958], considerando una hoja plana de corriente. La validez del modelo Sweet-Parker ha sido cuestionada pues predice un grado de reconexión muy lento para explicar la reconexión en ráfagas solares. El modelo de Petschek [Petschek, 1964] se basa en ondas de choque estacionarias, que predicen grados de reconexión más rápidos. James Dungey reflexionó acerca de la posibilidad de la reconexión de las líneas de fuerza magnéticas terrestres y el viento solar por primera vez en el año 1961.

Existen diversos modelos de reconexión magnética. Desde el lado magnetohidrodinámico (MHD) tenemos modelos de dos dimensiones (2-D) de estados estacionarios, en los cuales usualmente la configuración consiste en una región delgada de difusión, dos regiones de flujo entrantes y dos regiones de flujo saliente. Las observaciones de los eventos de transferencia de flujo (FTE por sus siglas en inglés) en la magnetopausa [Russell y Elphic, 1978] indican que la reconexión magnética en la magnetopausa es usualmente dependiente del tiempo. Modelos de reconexión dependientes del tiempo se han propuesto con simulaciones numéricas [Scholer, 1995]. Ya que la magnetopausa tiene un tamaño finito y la línea X tiene una extensión finita, los efectos 3-D son importantes.

1.3. Teoría

El término reconexión magnética se refiere al rompimiento y reconexión de líneas de campo magnético de polaridades opuestas en un plasma. En el proceso, la energía del campo magnético es convertida en energía cinética y energía térmica del plasma y aceleramiento de partículas. Consideremos qué sucede cuando dos regiones de plasma inicialmente separadas entran en contacto, como ocurre en la interacción entre el viento solar y el campo magnético terrestre. Si se asume que cada plasma tiene congelado su propio campo, al juntarlos no deben mezclarse y debe existir una pequeña capa frontera que se forma entre ellos separando los plasmas y sus respectivos campos. En equilibrio la localización de la capa frontera está dada por el balance de las presiones. Ya que los campos a cada lado de la frontera tendrán diferentes magnitudes y orientaciones, en general la capa frontera también constituirá una hoja de corriente.

En la figura (1.4) se muestran dos regiones de plasma separadas por una hoja de corriente (línea punteada) que tienen componentes del campo magnético antiparalelas. La reconexión magnética se dispara en $t = t_1 > 0$ acercando ambos plasmas hacia la capa de corriente. En el tiempo $t = t_2 > t_1$, las dos líneas de campo entran en contacto en el punto X. Como resultado de la difusión magnética, las líneas de campo se rompen y se reconectan a $t = t_3$ formando dos líneas de campo nuevas. Las nuevas líneas reconectadas están fuertemente torcidas y la fuerza de tensión magnética acelera el plasma a altas velocidades. Consecuentemente, la energía magnética es rápidamente convertida en energía cinética del plasma y la topología de las líneas de campo cambia.

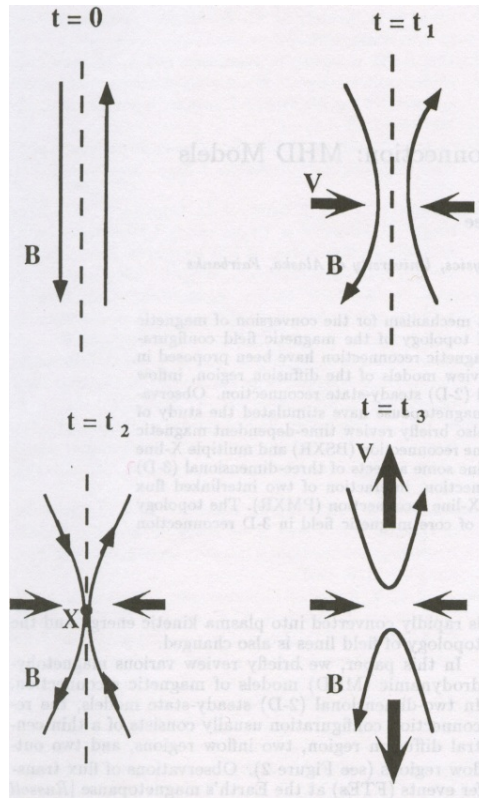


Figura 1.4: El proceso de reconexión magnética. Las líneas punteadas indican la posición de la hoja de corriente inicial ($t=0$), las flechas delgadas indican la dirección del campo, mientras que las gruesas expresan la dirección del plasma. [Lee, 1995]

El proceso de reconexión magnética está gobernado por la ecuación de inducción:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \frac{\eta}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{B} \quad (1.1)$$

donde \mathbf{B} , \mathbf{V} , t , η y μ_0 son respectivamente, el campo magnético, la velocidad del flujo de plasma, el tiempo, la resistividad y la permeabilidad del espacio libre. El primer término del lado derecho de la ecuación describe la convección del campo magnético junto con el flujo del plasma. El segundo término describe la difusión resistiva del campo por el plasma. Si el primer término domina, entonces el flujo magnético está congelado en el plasma, y la topología del campo magnético no cambia, mientras que si el segundo término domina, entonces hay poco

acoplamiento del campo y el flujo del plasma, y la topología del campo magnético es libre de cambiar.

La razón entre los dos términos de la ecuación anterior (1.1) es conocida como el número magnético de Reynolds o número de Lundquist,

$$S = \frac{\mu_0 \mathbf{V} L}{\eta} \simeq \frac{|\nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B})|}{\left| \frac{\eta}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{B} \right|} \quad (1.2)$$

donde \mathbf{V} es la velocidad característica del flujo y L la longitud de escala característica. Si $S \gg 1$ el término convectivo domina y se cumple con el congelamiento del campo, mientras que si $S \ll 1$ el término difusivo domina y el acoplamiento del campo y el flujo del plasma es relativamente débil.

El primer modelo propuesto para explicar la reconexión magnética fue propuesto por Sweet y Parker de manera independiente [Parker, 1957, Sweet, 1958]. El Sweet-Parker, como se le conocería después, se ilustra en la figura 1.5 a). Se observan líneas de campo magnético de direcciones opuestas que se aniquilan en la región de difusión oscura que tienen una longitud de $2l$ y un ancho de 2δ .

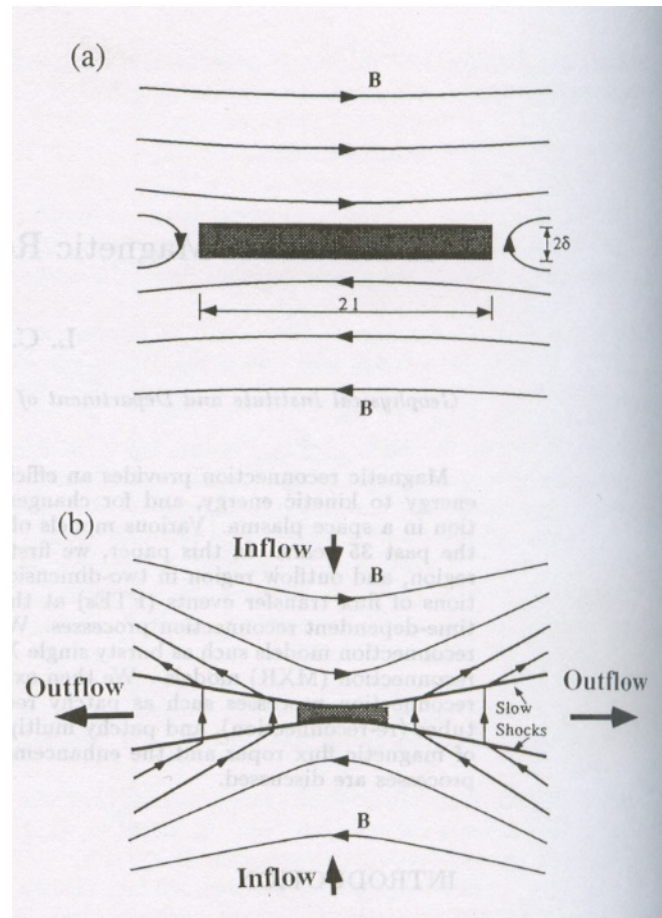


Figura 1.5: a) reconexión en el modelo de Sweet-Parker, b) Modelo de reconexión simétrica de Petschek.

El grado de reconexión magnética se define como el número de Mach Alfvénico entrante,

$M_A = V_{in}/V_{Ain}$, donde V_{in} , V_{Ain} son la velocidad del plasma entrante y la velocidad de Alfvén en la frontera de flujo entrante. En el modelo de Sweet-Parker se encuentra que $M_A = S^{-1/2}$ con S el número magnético de Reynolds. Si la magnitud L de la región de difusión corresponde a una escala de longitud macroscópica de un sistema físico, $S \gg 1$ y el grado de reconexión en el modelo Sweet-Parker resulta ser muy pequeño.

Petschek [1964] propone un modelo de reconexión en el cual la región de difusión está confinada a un área muy pequeña. En este modelo, la configuración de la reconexión consiste en 3 partes: la región de entrada, de salida y la región central delgada de difusión (Figura 1.5 b) Las líneas magnéticas en las regiones de flujo de entrada convectan de los dos lados hacia la región central de difusión. Las regiones de entrada y salida están acotadas por dos pares de choques lentos. El plasma se acelera en estos choques, dejando la presencia de flujos de altas velocidades en las regiones río abajo. La energía magnética se convierte en energía del flujo de plasma principalmente en los choques lentos. Este modelo describe el caso simétrico con densidades del plasma iguales, magnitudes de los campos iguales con campos antiparalelos a ambos lados de la capa de corriente. Las estructuras MHD resultantes en la región de convección de salida son dos pares de choques lentos.

La región de difusión es el área en donde el término difusivo en la ecuación (1.1) domina sobre el término convectivo. Se puede obtener información aplicando las leyes de conservación MHD a esta región [Parker, 1957, Petschek, 1964]. Para un fluido incompresible, la conservación de la masa y del flujo magnético son:

$$V_{out}\delta = V_{in}l \quad (1.3)$$

$$V_{out}B_{out} = V_{in}B_{in} \quad (1.4)$$

donde V_{out} es la velocidad del plasma, y B_{out} la magnitud del campo magnético en la región de salida, y V_{in} y B_{in} los correspondientes valores río arriba de la región de difusión. El ancho δ es determinado por el balance entre la convección y la difusión del flujo magnético y tiene la forma de:

$$\delta = \frac{\eta}{\mu_o V_{in}} \quad (1.5)$$

Waelbroeck [1989] en un cálculo analítico mostró que la longitud macroscópica de la región de disipación es una consecuencia de la conservación de la helicidad magnética río arriba de la región de disipación.

También se han propuesto modelos de reconexión asimétrica, como el de Levy et al [1964]. En este modelo la magnitud del campo magnético de un lado de la hoja de corriente es mayor que del otro, y la densidad de masa del plasma en el lado del campo alto (magnetósfera) tiende a cero. Como resultado, cada par de choques lentos del modelo de Petschek se reemplazan por una onda intermedia (discontinuidad rotacional) y un abanico estrecho de expansión lenta (narrow slow expansion fan) como lo muestra la figura (1.6). La dirección de la magnitud del campo magnético rota a través de la onda intermedia, y el plasma es acelerado a altas velocidades por esta onda intermedia. Observaciones de discontinuidades rotacionales han sido reportadas en el lado día de la magnetopausa [Paschmann et al., 1979, Paschmann et al., 1986, Sonnerup et al, 1976]. De acuerdo con la teoría MHD, la magnitud del campo B y la densidad del plasma se conservan a través de una discontinuidad rotacional. A través de un choque lento (una onda de expansión lenta), la magnitud del campo decrece (aumenta) y la densidad del plasma se incrementa (disminuye). En una discontinuidad de

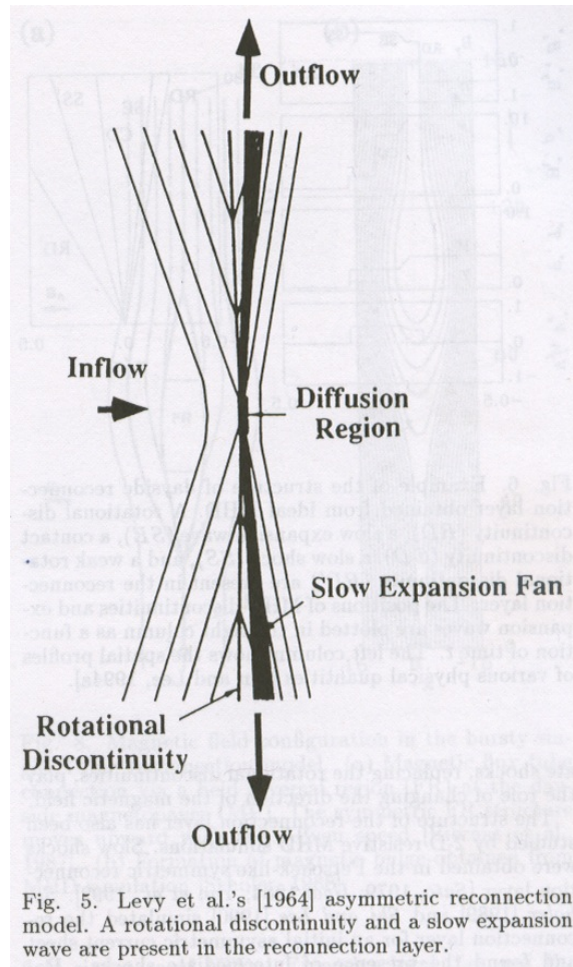


Figura 1.6: Modelo de reconexión asimétrica. Una discontinuidad rotacional y una onda de expansión lenta se presentan en la capa de reconexión. [Levy et al., 1964]

contacto, la densidad del plasma varía mientras que el campo magnético se conserva. En el proceso de reconexión, la discontinuidad rotacional junto con la capa de reconexión cambian la dirección del campo magnético, mientras que los choques lentos o las ondas de expansión lenta en la capa de reconexión se requieren para cambiar la densidad del plasma y la magnitud del campo magnético. La discontinuidad de contacto en el centro de la capa de reconexión marca la diferencia entre las densidades del plasma de ambos lados. Sin embargo, la discontinuidad rotacional no existe en las formulaciones MHD disipativas [Wu, 1990], y los resultados basados en las ecuaciones MHD ideales deben modificarse.

Los modelos de reconexión dependientes del tiempo se propusieron para explicar la ocurrencia de los FTEs. Estos modelos incluyen: (a) el modelo de parches(patchy) e intermitente [Russell y Elphic, 1979, Kan, 1988, Nishida, 1989, Otto, 1990], (b) el modelo de líneas X múltiples [Lee y Fu, 1985, Sato et al., 1986, Pu et al., 1990] (c) el modelo de reconexión explosiva (bursty) [Biernat et al., 1987, Scholer, 1988, Southwood et al., 1988]. El modelo reconexión a parches indica que la dimensión de la región de reconexión tiene un tamaño limitado, mientras que el modelo de líneas múltiples propone un proceso en el cual un tubo de flujo

magnético es reconectado con otros tubos en múltiples sitios. Lee y Fu [1985] encontraron tubos de flujos magnéticos o islas formados como consecuencia de múltiples reconecciones en el lado día de la magnetopausa. La convección subsecuente hacia los polos de estos flujos produce la característica bipolar en la componente normal de los FTE. Realizaron simulaciones locales y globales y encontraron perfiles tipo FTE en simulaciones MHD 2-D. Simulaciones con resistividad uniforme y un campo magnético pequeño en la componente normal en la frontera dentro, indican que la configuración estable no puede mantenerse.

El cambio topológico que ocurre en el campo magnético durante la reconexión magnética requiere que las condiciones ideales magnetohidrodinámicas se rompan. Por otro lado, dado que la magnetopausa es un plasma sin colisiones, el mecanismo responsable del rompimiento de estas condiciones no es obvio y su identificación sigue sin quedar clara. En ausencia de una teoría aceptable de reconexión sin colisiones, las simulaciones que se hacen de ella en la magnetopausa se basan en ecuaciones MHD con una resistencia escalar.

Uno de los mayores problemas en la física de plasmas es que la reconexión ocurre mucho más rápidamente de lo que predicen los modelos MHD. Los modelos tipo fluido de la reconexión magnética nos han brindado una buena aproximación del fenómeno a grandes escalas, grandes longitudes de Debye y bajas frecuencia, pero son incapaces de darnos información más detallada de las diferentes especies de partículas en el plasma o de la forma de las distribuciones de velocidades de éstas, por ello la necesidad del enfoque cinético.

Aunque el concepto de reconexión magnética se introdujo casi al mismo tiempo que los modelos de la magnetopausa, la posibilidad de reflexión y transmisión de las partículas en asociación con reconexión se consideraron hasta los años setentas [Sonnerup, 1976]. Más tarde la reflexión de iones en la magnetopausa fué tratada en detalle por Cowley [1980], Cowley [1982] y Sonnerup et al [1976]. La reflexión de los iones en la magnetopausa durante la reconexión es una manifestación cinética del proceso que se da en una frontera abierta. Un esquema cualitativo del proceso de transmisión y reflexión fue representado por Gosling et al [1990]. La figura (1.7) muestra el proceso.

Para un campo magnético interplanetario con componente sur, la reconexión se da en la región subsolar de la magnetosfera. Los iones de la magnetofunda podrán ser reflejados por la magnetopausa, o lograrán entrar a la magnetosfera. Similarmente, tanto los iones de la corriente de anillo de altas energías y los iones ionosféricos de bajas energías pueden ser reflejados en la magnetopausa, o cruzar la frontera y entrar en la magnetofunda. En la figura (1.7) los iones reflejados y transmitidos se mantienen dentro de las separatrices S1 y S2. E1, I1 y E2, I2 representan las capas de los iones y de los electrones. Los iones transmitidos de la magnetofunda y los magnetosféricos reflejados forman la capa frontera de bajas latitudes (low latitude boundary layer LLBL) en el lado magnetosférico de la magnetopausa. Similarmente, iones transmitidos de la magnetosfera y los reflejados de la funda forman la capa frontera de la magnetofunda (magnetosheath boundary layer MSBL) en el lado funda de la magnetopausa. El proceso de reflexión y transmisión fué descrito por [Cowley 1982, Sonnerup et al, 1976] aunque no se especifica cuando un ión incidente en la magnetopausa será reflejado o transmitido, se puede describir el movimiento de reflexión y transmisión de las partículas. Después de especificar un coeficiente de reflexión en la magnetopausa, se necesitan tomar tres consideraciones para determinar el movimiento colectivo de los iones en la magnetopausa. La primera condición es que exista un marco estacionario en el tiempo tipo deHoffman-Teller (dHT), en este marco, el campo eléctrico en ambos lados de la magnetopausa es cero. Esto es parti-

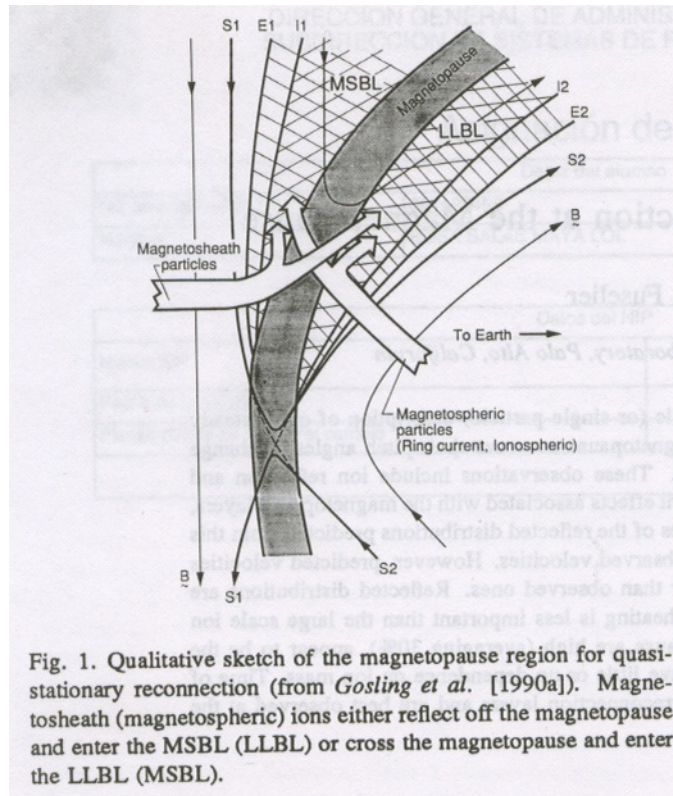


Figura 1.7: reconexión cuasi-estacionaria en la región de la magnetopausa. Los iones de la magnetofunda (magnetosféricos) son reflejados en la magnetopausa y entran en MSBL (LLBL), ó cruzan la magnetopausa y entran a la LLBL (Low latitude boundary layer) (MSBL (magnetosheath boundary layer)). [Gosling *et al.*, 1990]

cularmente importante en un plasma multi-componente, en el que se requiere que todas las distribuciones de iones en cada lado de la magnetopausa tengan la misma velocidad de deriva $E \times B$ (ie los gradientes en el campo magnético no son importantes). De hecho, las derivas $E \times B$ para las componentes individuales del plasma en la LLBL son muy cercanas, también para las componentes del plasma en la MSBL ([Gosling *et al.*, 1990, Fuselier *et al.*, 1991]). La segunda suposición es que la magnetopausa es una discontinuidad rotacional unidimensional; bajo este supuesto, la velocidad de bulto del flujo del centro de masa de la distribución en el marco dHT es la velocidad local de Alfvén. La tercera y última condición es que los iones no cambian su ángulo de paso en la reflexión o transmisión, o, cambian su ángulo de paso en una forma constante como en movimiento adiabático (ie., los iones conservan su primer invariante adiabático). Bajo estas condiciones, los procesos estocásticos como las interacciones onda partícula son menos importantes que el proceso cinético de movimiento del ion en una escala electromagnética grande. Como consecuencia los iones con la misma velocidad incidente pero con diferente masa/carga tendrán la misma velocidad después de la transmisión a la magnetopausa. Iones H^+ y He^{2+} transmitidos de la magnetofunda tienen la misma velocidad de bulto en la LLBL ([Paschmann *et al.*, 1989]).

Con estas tres consideraciones, la figura (1.8) muestra cortes en las distribuciones de iones en la MSBL (a) y LLBL (b) para un cruce de la magnetopausa al norte del sitio de reconexión

durante un campo interplanetario sur.

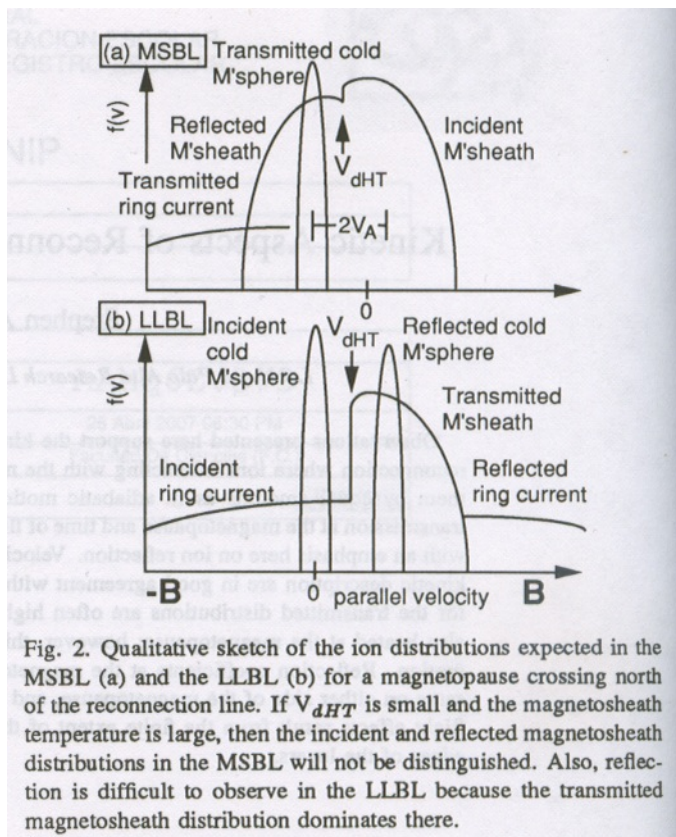


Figura 1.8: Funciones de distribución esperadas para la MSBL (a) y la LLBL (b) para un cruce de la magnetopausa al norte de la línea de reconexión. Si la velocidad en el marco dHT es pequeña la temperatura de la magnetofunda es alta, entonces las distribuciones de los iones reflejados y transmitidos en la MSBL no pueden ser distinguidos. La reflexión es difícil de observar en LLBL pues la distribución de iones transmitidos de la funda domina

La figura (1.8) muestra cortes a lo largo del campo magnético en el marco $E \times B$ del plasma. La separación entre las distribuciones incidentes y reflejada es dos veces la velocidad local de Alfvén. Los cambios de velocidades en la reflexión y la transmisión están relacionados con la ganancia individual de energía que los iones experimentan en su interacción con una discontinuidad rotacional ([Sonnerup et al, 1976, Cowley 1982, Paschmann et al., 1989]).

Dado que en el fenómeno de la reconexión magnética tenemos una disparidad en escalas temporales (de fracciones de segundo a horas) y espaciales (de centímetros a radios terrestres) se necesitan diferentes códigos de simulación dependiendo de la física que se requiera. Las simulaciones MHD se han usado para modelar la dinámica global de la magnetosfera, las tormentas magnéticas y otros eventos globales [Lyon et al., 1998; Kabin et al., 2000; Raeder et al., 2001]. Las simulaciones MHD, que pueden correrse en horas, no proveen información acerca de la estructura de las capas fronteras pero son útiles en el desarrollo de una morfología global de la magnetosfera. Las simulaciones cinéticas demandan un poder computacional mayor y se han usado tradicionalmente para estudiar la descripción local de los eventos. Existen problemas en los cuales se requiere de un tratamiento cinético pero no

pueden simularse debido a limitaciones computacionales [Yin et al, 2007, Büchner 2004]. Por ejemplo, el efecto del antechoque de iones en el movimiento de la magnetopausa, el problema es puramente cinético pero se requiere una caja de simulación suficientemente grande para incluir tanto el choque de proa y la magnetopausa.

Por último tenemos los modelos híbridos, en donde se considera a los iones como partículas y a los electrones como fluido. Las discontinuidades rotacionales y los choques intermedios han sido ampliamente estudiados con simulaciones híbridas. Existen simulaciones híbridas de dos dimensiones, y de 2.5 D (dos dimensiones, tres componentes) como la de Swift que ha sido usada exitosamente en un sistema de coordenadas curvilíneas para modelar el lado día de la magnetosfera terrestre. El estudio de la reconexión magnética con códigos híbridos comenzó aproximadamente hace una década. Muchos autores han estudiado sus propiedades como la estructura de la capa de reconexión y la reconexión en la magnetocola [Krauss-Varban et al, 1995, Karimabadi et al, 2005, Karimabadi et al, 2006]

Generalmente el término código híbrido se refiere a las simulaciones en las cuales una o más de las especies del plasma son tratadas como un fluido simple o múltiple, y las especies sobrantes son tratadas cinéticamente como partículas. El plasma se acopla a las ecuaciones electromagnéticas de diferentes formas: las ecuaciones de Maxwell, el modelo de baja frecuencia de Darwin, de forma electrostática etc. Los modelos híbridos típicos tratan a los iones cinéticamente y los electrones se asumen como un fluido cuasi-neutral sin inercia y los campos electromagnéticos son tratados en la aproximación de bajas frecuencias. En los códigos híbridos las escalas relevantes son el giroradio de iones y la longitud de escala de los iones (c/ω_p) del orden de 10-100 km y en las escalas temporales $\omega^{-1}p^{-1}$ (\sim sec)

Capítulo 2

Eventos de transferencia de flujo (FTE)

Introducción

El momento y la energía que se transfiere del viento solar a la magnetosfera terrestre está controlado principalmente por la reconexión magnética que se da en la vecindad del punto subsolar y por la cantidad de campo magnético interplanetario con componente B_z sur ($B_z < 0$) [Russell y McPherron, 1973]. Aunque cuando se tiene campo interplanetario con B_z norte, la reconexión magnética se da a mayores latitudes en los conos polares. Los eventos de reconexión magnética ocurren de manera casi continua, pero en algunas ocasiones la reconexión aparece de forma discontinua. Una manifestación de la reconexión variante en el tiempo son los eventos de transferencia de flujo o FTE (Flux Transfer Events). Estos eventos pueden ocurrir tanto en la magnetofunda como en la magnetopausa. Las características del plasma, las partículas energéticas, las ondas y las funciones de distribución de los FTEs se exponen a continuación.

2.1. Características magnéticas, del plasma y de las partículas energéticas en los FTEs

Russell y Elphic [1978] identificaron el fenómeno de FTE en base de ciertas características en el plasma, el campo magnético y los datos de partículas energéticas, la figura 2.1 muestra las características encontradas.

Leyendo la gráfica desde la parte superior tenemos: la densidad total del plasma, la densidad parcial de iones y electrones $>5\text{keV}$, la velocidad de bulto de iones, la temperatura de iones y electrones y el campo magnético en coordenadas normales tomados por ISEE 2 (en estas coordenadas la dirección N es normal a la magnetopausa apuntando hacia afuera de la Tierra, L está en dirección del dipolo y M completa la triada, (para mayor explicación del sistema de coordenadas ver A.4). En esta ocasión las naves cruzaron de la magnetofunda a la magnetosfera. Se pueden apreciar dos FTEs a las 02:13 y 02:35 UT.

Una de las características principales de los FTEs es su marcada variación bipolar en la

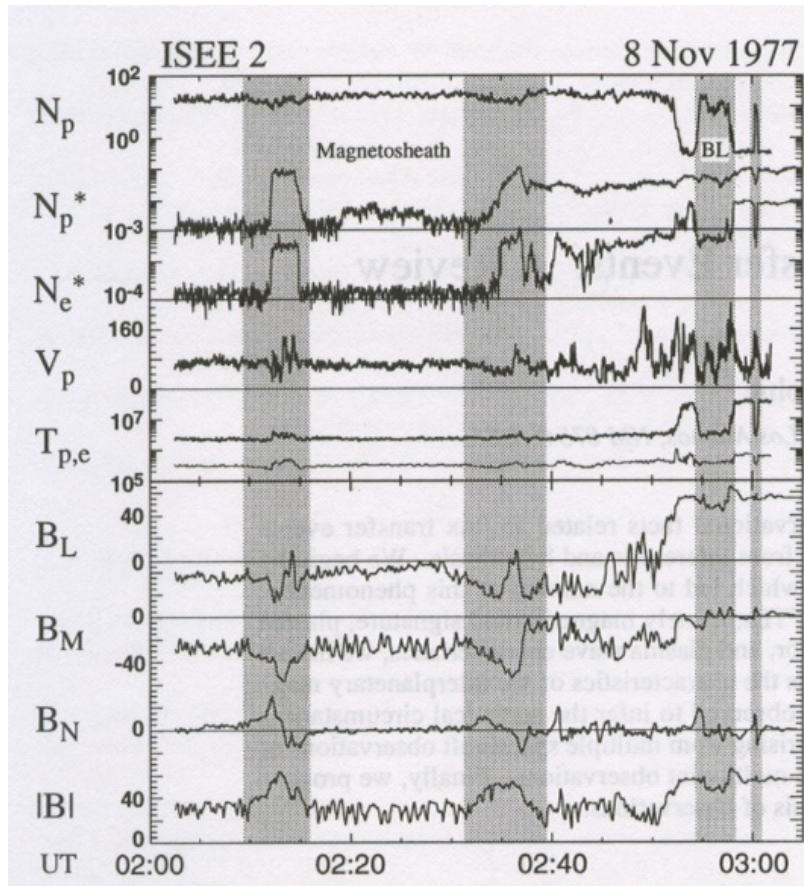


Figura 2.1: Datos de plasma y campo magnético de ISEE 2 el 8 de noviembre de 1977 [Elphic, 1995], de arriba a abajo se tiene: la densidad total del plasma, la densidad parcial de iones y electrones con energías $>5\text{keV}$, la velocidad de bulo de iones, la temperatura de iones y electrones y el campo magnético en coordenadas normales

componente B_n del campo magnético, la cual es normal al plano de la magnetopausa, mientras que en las otras dos componentes y la magnitud del campo tienen variaciones que no muestran patrones consistentes. Recientemente Le et al [2007] mostraron con datos de Cluster que la oscilación bipolar en la componente n es más marcada para FTEs a latitudes bajas, pero para las altas la variación puede no existir. Para algunos FTEs la magnitud del campo magnético muestra un máximo cerca del centro del FTE y existen otros con cráteres o mínimos locales [LaBelle et al., 1987] y también los que no tienen ni máximo ni mínimo. Existen evidencias de que el campo magnético dentro del FTE algunas veces está torcido alrededor del eje del tubo [Saunders et al., 1984]. En el ejemplo mostrado, la variación bipolar es $+/-$ (llamada variación estandar o P-N); en otros FTEs la variación puede ser opuesta, $-/+$ (N-P). Las características positivo-negativo de la componente B_n , corresponden a las líneas de campo reconectadas moviéndose hacia el sur del sitio de reconexión. Se ha mostrado, que FTE con variaciones P-N de la componente normal tienden a ocurrir al norte del plano de la eclíptica, mientras que N-P se observa al sur del plano de la eclíptica [Rijnbeek et al., 1982, Kawano et al., 1992].

Las características del plasma de los FTE no están del todo claras, pero incluyen un decremento en la densidad, incremento en la temperatura y el flujo de calor, y en algunos casos el incremento en la velocidad del flujo [Daly et al., 1981, Scholer et al., 1982, Daly y Keppler, 1982]. En los datos del plasma de la figura 2.1 se tiene: decrementos en la densidad, incrementos en la temperatura y en la velocidad de bulto. En la figura no se muestra, pero también se han encontrado incrementos en el flujo de calor de los iones y los electrones en los FTEs. Pashmann et al [1982] demostraron que el plasma en los FTEs es una mezcla de plasma de la magnetofunda y plasma magnetosférico. Hay que notar que en este caso la velocidad de iones acelerados se encuentra durante la parte negativa de la variación bipolar de B_n . Los iones energéticos están presentes como se evidencia en el incremento de la densidad parcial de iones energéticos (>5 keV), Np^* en la figura (2.1). Las características del plasma descritas con anterioridad, sugieren que el plasma en el FTE es una mezcla de plasma de la magnetofunda y la magnetosfera.

2.2. Funciones de distribución en los FTEs

Paschmann et al [1982] estudiaron las propiedades del plasma del FTE para investigar las distribuciones en el espacio fase de los electrones y los iones, dentro y en los alrededores de los FTEs. Confirmaron que tanto las distribuciones de iones como las de electrones consisten en una mezcla de poblaciones magnetosféricas y de la magnetofunda. Pero un análisis más detallado del espectro de electrones reveló el calentamiento de una distribución característica en la magnetofunda llamada distribución *flat-top*, con la temperatura paralela incrementada generalmente mayor que la perpendicular. Para este mismo evento Thomsen et al [1987] encuentran depresiones de las partículas con energías altas relativas a las distribuciones magnetosféricas, y la depresión es mayor en el centro del FTE. Algunos FTEs de la magnetofunda también muestran evidencia de flujos de calor de iones y electrones, pero Thomsen et al [1987] no pudieron determinar si es debido al escape de partículas magnetosféricas a lo largo de las líneas abiertas o un proceso de calentamiento en la región de difusión.

A continuación se muestra el ejemplo de un FTE observado por ISEE 2 el 11 de septiembre de 1979 y reportado por [Le et al., 1999]. La figura (2.2) muestra el acercamiento al FTE en datos de alta resolución (1/4 s) del campo magnético en coordenadas NLM y algunos momentos del plasma (velocidad, densidad y temperatura de protones y ángulo magnético ν con resolución de 12s). Con un rectángulo se muestra la duración del FTE. Las flechas negras indican los instantes de observación de las funciones de distribución de la siguiente figura. En la figura (2.3) se ilustran las funciones de distribución de la velocidad del plasma obtenidas en la magnetosfera, en la magnetofunda y en el FTE. Los autores muestran las funciones de distribución como contornos de espacio fase de densidad constante separadas logarítmicamente. Los números en los círculos punteados representan la velocidad en kilómetros por segundo. Las flechas muestran la proyección en la eclíptica del campo magnético.

El plasma en la magnetosfera y en la magnetofunda tiene funciones de distribución diferentes, como se puede ver en (a) y (b) de la figura (2.3). El momento (c) se toma dentro del FTE antes de que los datos en el plasma mostrarán algún cambio. En este momento, las funciones de distribución tanto de los iones como de los electrones son casi iguales a las de la magnetofunda mostradas en (b). No se observa ninguna traza de plasma caliente magnetosférico indicando que el campo magnético no está conectado a la magnetosfera en

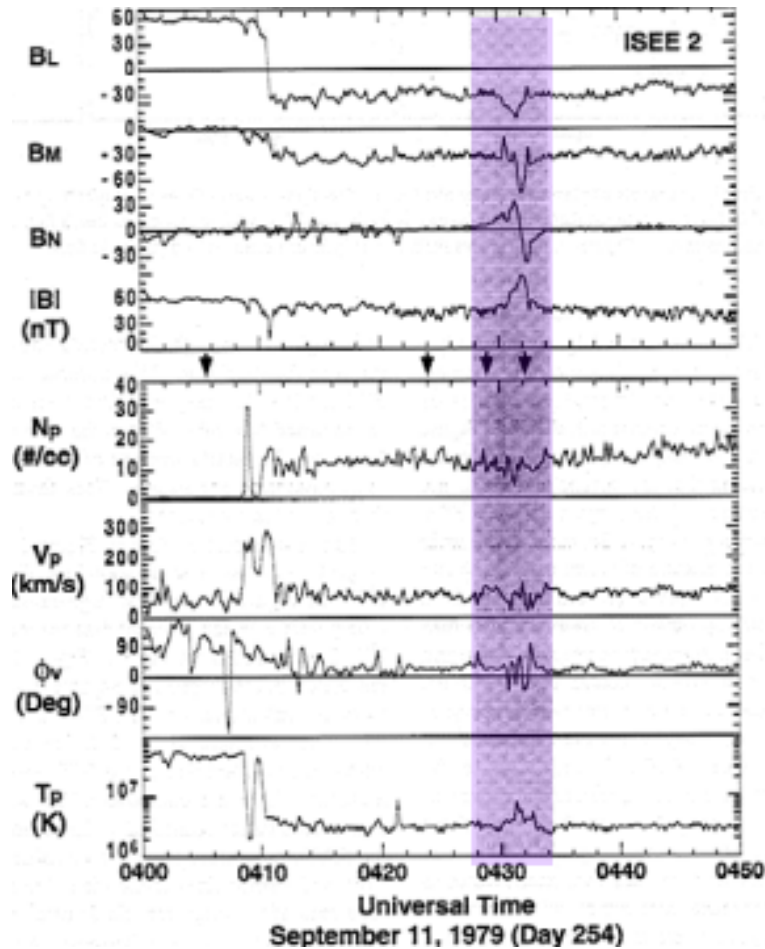


Figura 2.2: Datos de alta resolución (4 s) del campo magnético en coordenadas NLM y momentos del plasma (12 s) mostrando el FTE del 11 de septiembre de 1979. Las dos líneas verticales sólidas muestran la región del FTE [Le et al., 1999].

esta región. Sin embargo, las funciones de distribución mostradas en (d) muestran una clara mezcla de plasma templado de la magnetofunda y caliente de la magnetosfera, aunque ambas componentes en las distribución de electrones se presentan a densidades menores que en la funda o en la magnetosfera, esto es, en el recuadro inferior (d) de la figura 2.3 correspondiente a los electrones, las distribuciones tipo funda son círculos concéntricos que apenas llegan a la mitad del círculo punteado (mientras que en (b) casi lo toca) y en las distribuciones tipo magnetosféricas también los contornos se estrechan y abarcan casi la mitad que en (a) . El plasma templado de la magnetofunda es calentado un poco como muestra el espaciamiento entre las curvas de nivel. La existencia de plasma caliente indica que el campo magnético de esta región del FTE está conectado a la magnetosfera y permite que el plasma magnetosférico caliente fluya a través de las líneas de campo. De esta forma se identifican dos regiones en el FTE, una amplia región con líneas de campo desconectadas de la magnetosfera, y un núcleo embebido con líneas de campo conectadas, [Le et al., 1999].

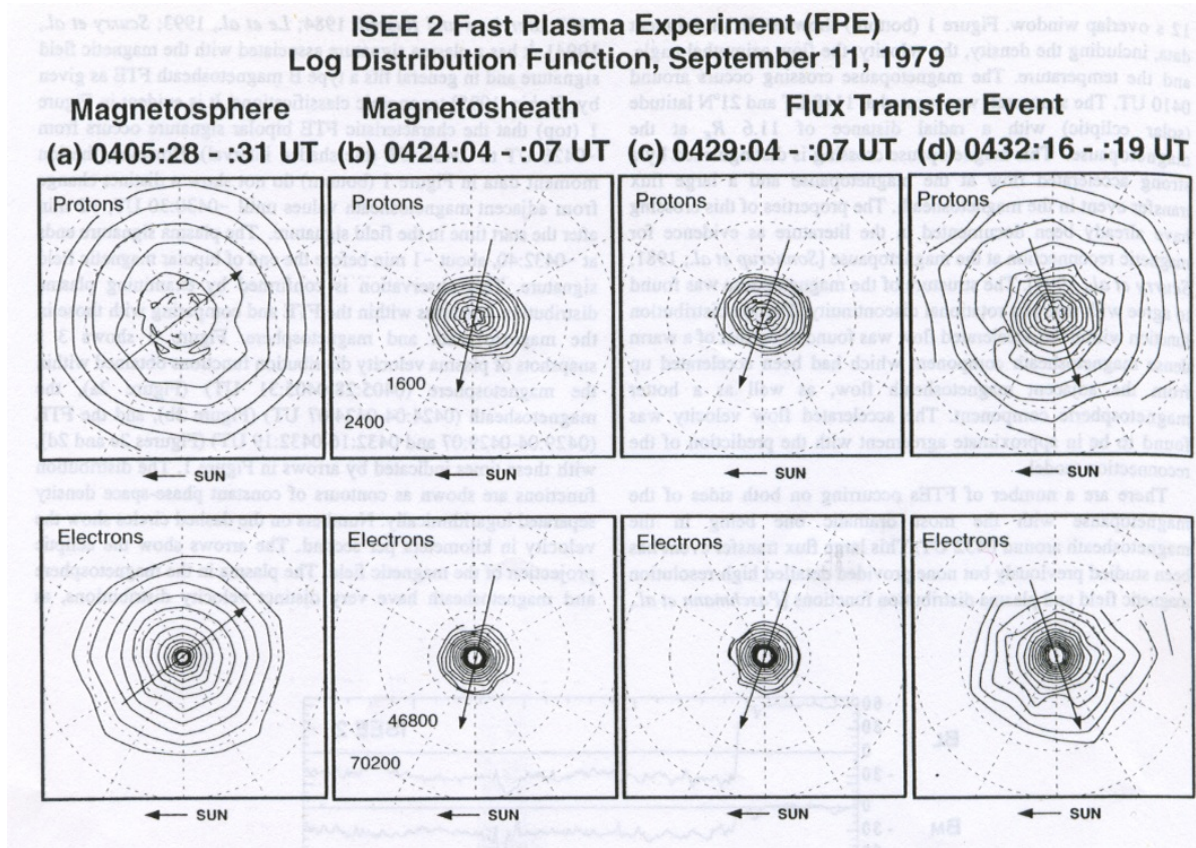


Figura 2.3: Funciones de distribución de la velocidad del plasma tomadas en (a) la magnetosfera, (b) la magnetofunda y (c) y (d) en un FTE [Le et al., 1999]).

2.3. Ondas de plasma en los FTES

Las características de ondas en los FTE han sido analizadas previamente usando datos de las naves ISEE [Gurnett et al., 1979, Anderson et al., 1982]. Gurnett y su grupo examinaron ondas asociadas con cruces en la magnetopausa en general, pero en sus datos incluyen dos FTES magnetosféricos. Las características ondulatorias de este evento consisten en ondas del campo eléctrico de 5.6 Hz a 100 kHz y ondas de campo magnético de 5.6 Hz a 1 kHz. Anderson et al., estudiaron un cruce de ISEE de la magnetopausa, incluyendo dos FTES, la capa de corriente de la magnetopausa y la capa límite (boundary layer). Las ondas en estas regiones son comparadas con ondas en la magnetofunda y en la magnetosfera. Encontraron cuatro tipos de emisiones de ondas del plasma en la funda: un continuo en frecuencias de (5-30 Hz), espículas (spikes) de corta longitud de onda, emisiones "festoon - shaped" bajo los 2 kHz y emisiones "lion - roars". Las últimas dos emisiones están bien correlacionadas con fluctuaciones magnéticas de ultra baja frecuencia. Durante los FTES encuentran: una intensa emisión continua de baja frecuencia, la cual incluye una sustancial componente electromagnética, frecuencias (<1kHz) son engrandecidas con el FTE coincidente con la presencia de partículas energéticas, un dramático incremento en la frecuencia de ocurrencia de las espículas (en el rango de 1 a 10 kHz), armónicos cuasi-periódicos electrón ciclotrón corre-

lacionados con fluctuaciones magnéticas de ~ 1 Hz y un incremento en las oscilaciones de los electrones en el plasma. Los niveles de turbulencia de Langmuir son grandes. Las emisiones tipo "lion – roars" y "festoon – shaped", características de la magnetofunda, no se encuentran en los FTEs, mientras que las tipo espículas, ocurren naturalmente en la magnetofunda pero se incrementan en frecuencia de ocurrencia durante los FTEs.

LaBelle et al [1987], estudiaron ondas de plasma de diferentes FTEs por AMPTE-IRM y confirmaron la existencia de ondas ión ciclotrón de baja frecuencia, < 1 kHz-continuo y "spikes". Ellos atribuyen las ondas en la banda de algunos a cientos de hertz al modo híbrido bajo (lower hybrid mode).

En un plasma bi-Maxwelliana una anisotropía puede derivar en dos inestabilidades que generan ondas con frecuencia debajo de la frecuencia de ciclotrón de los iones. La primera, la inestabilidad ión ciclotrón, domina cuando la anisotropía de la temperatura es alta y la $\beta \sim 1$ y se generan ondas ión ciclotrón electromagnéticas transversales a través de la interacción resonante entre ondas y partículas. Las ondas ión ciclotrón tienen velocidades de fase típicas cercanas a la velocidad de Alfvén y se propagan fuera de la región en donde se formaron. La segunda inestabilidad es la inestabilidad espejo, la cual tiende a dominar bajo condiciones de anisotropías de la temperatura moderadas y plasmas con β alta. Generan grandes amplitudes, anticorrelación entre la magnitud del campo magnético y la densidad del plasma y son un modo que no se propaga en el marco del plasma. Estas estructuras actúan como botellas magnéticas, atrapando parte de la distribución de partículas.

2.4. Modelos de FTEs

El modelo más popular del origen de los FTEs es el modelo de tubo conectado propuesto por primera vez en 1978 [Russell y Elphic, 1978]. En este modelo las perturbaciones magnéticas detectadas por la nave son causadas por el paso de un tubo de flujo que conecta los campos terrestres e interplanetarios a través de la magnetopausa. Estos tubos son creados en puntos de reconexión localizados espacialmente y de manera esporádica. Con el tiempo se han propuesto variaciones y modificaciones como el que en el interior del tubo el campo magnético se encuentra torcido [Cowley 1982, Saunders et al., 1983]. Estudios con datos de partículas energéticas ajustan bastante bien con el modelo de tubo conectado [Daly et al., 1981, Daly y Keppler, 1982, Scholer et al., 1982, Speiser et al., 1982].

El grado de ocurrencia de los FTEs tiene una fuerte relación con la dirección del campo magnético interplanetario. Estudios estadísticos han demostrado que los FTEs ocurren preferencialmente durante condiciones horizontales o sur del campo interplanetario y que la polaridad de la variación bipolar está ordenada por el ecuador geomagnético, en manera consistente con el esquema global de un tubo de flujo reconectado moviéndose hacia afuera de la región ecuatorial [Berchem y Russell, 1984, Rijnbeek et al., 1984, Southwood et al., 1986]. La mayoría de los eventos de transferencia de flujo muestran que ocurren en pequeños lapsos de tiempo [Lockwood y Hapgood, 1997a, Lockwood y Hapgood, 1997b] y de espacio [Saunders et al., 1984].

Un segundo modelo propuesto por Lee y Fu [1985], postula la existencia de múltiples líneas neutras adyacentes una a la otra en la magnetopausa formadas durante la reconexión. Muchas predicciones observacionales de este modelo son idénticas al modelo de tubo conectado pero

hay diferencias importantes. El torcimiento del campo en el centro del evento es inherente al modelo. También la presencia de capas de electrones calientes en las partes externas de los eventos. En el modelo, las líneas de campo exteriores se mapean en las regiones de la línea neutra donde la reconexión está ocurriendo. La presencia de electrones calentados en esos tubos aparece como una consecuencia.

Existen muchos estudios en la literatura concernientes a la estructura interna de los FTES. Southwood [1985] y Farrugia [1987] modelaron la región de campo "drap" usando flujos incompresivos alrededor de un tubo de flujo cilíndrico rígido encontrando similitudes cualitativas con las observaciones. Saunders et al [1984] reportaron campo magnético torcido en el núcleo central. Rijnbeek [1987] fué el primero en identificar el núcleo central del tubo de flujo abierto y la región de campo "draping" usando los datos del plasma y de campo magnético de alta resolución. Estimó que las fronteras entre las dos regiones es del orden de 10 radios de giro de iones de grosor; de aquí la importancia del uso de datos de alta resolución para el estudio de la estructura de los FTES. En 1988 Farrugia et al., [1988] hacen un estudio detallado de la estructura de los FTES magnetosféricos usando datos de alta resolución de campo magnético y plasma del Active Magnetospheric Particle Tracer Explorers (AMPTE) UKS, encuentran una estructura de multi-capas con el núcleo interior con una presión total mayor (el exceso de presión en el centro de los eventos es debido a la fuerza que se genera por el torcimiento del campo), flujos bidireccionales de electrones en las líneas de campo exteriores (se propone que la presencia o ausencia de electrones, puede significar que la reconexión es continua [Scudder et al., 1984]), flujos de plasma con velocidades engrandecidas y flujos de cizalla (flujos de cizalla a través de la magnetopausa y/o campos no antiparalelos generan el torcimiento del campo deducido de las observaciones). Smith y Owen [1992] observaron un incremento en la anisotropía de la temperatura hacia el centro del FTE estudiado por Farrugia et al [1988] y encontraron que la estructura de multi-capas puede explicarse como un encuentro transitorio con una serie de capas de reconexión. Con datos de iones y medidas de campo magnético muestran un incremento en la anisotropía de la temperatura en el centro de un FTE. Analizan diferentes cortes del FTE encontrando diferentes regiones como Le et al [1999] con una marcada anisotropía al centro del evento. Esto es inconsistente con el modelo de la magnetopausa, sin embargo, puede ser explicado como un encuentro transitorio, causado por movimientos en la frontera tipo ondas con una serie de capas de reconexión, este no es un escenario de cruce de la magnetopausa simple.

Lee [1995] combinó estructuras magnéticas y del plasma en diferentes FTES (magnetosféricos y en la funda) usando datos de campo magnético de alta resolución y funciones de distribuciones del plasma. Encuentran las dos regiones del FTE (un núcleo central y una región de campo "draping") y sus interfases en los datos tanto del campo como del plasma. Las observaciones del plasma en el núcleo central indican que las líneas de campo magnético están abiertas permitiendo la entrada de plasma templado de la magnetofunda y la salida del plasma caliente de la magnetosfera a través del tubo de flujo.

La variación bipolar de B_n de los FTES ha sido asociada junto con la distorsión del campo magnético de los alrededores como una línea de campo reconectada, moviéndose a lo largo de la magnetopausa. De acuerdo con la interpretación de Russell y Elphic [1978], las propiedades de los FTE pueden ser interpretadas en términos de un tubo de flujo magnético abierto debido a la reconexión dependiente del tiempo.

Los eventos de flujo magnético aparecen en las simulaciones MHD [Feder et al., 2002]. Un

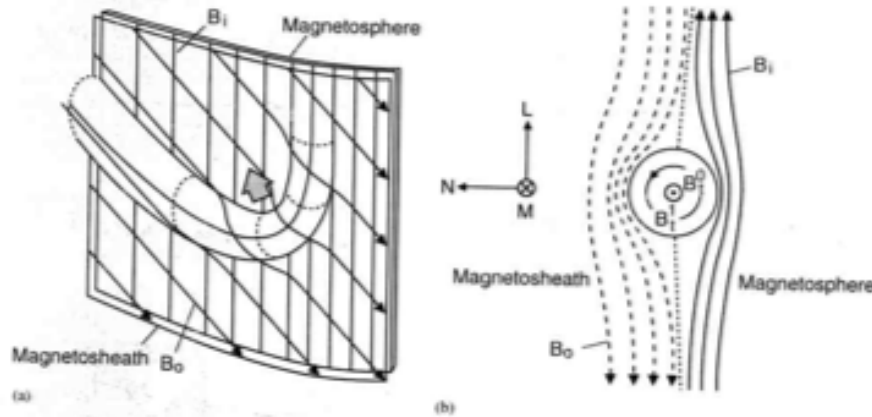
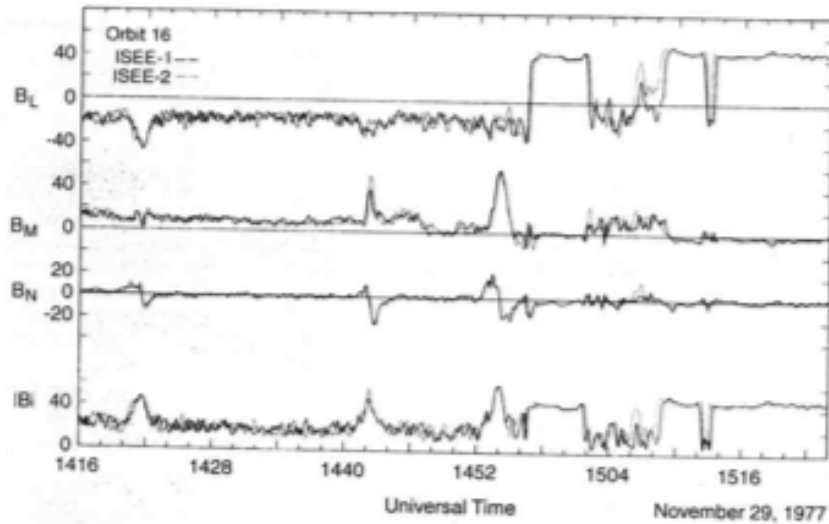


Figura 2.4: (arriba) Medidas de campo magnético de ISEE 1 y 2 durante FTEs en coordenadas normales, (abajo) Estructura magnética inferida del FTE [Russell y Elphic, 1978].

código magnetohidrodinámico de alta resolución puede ser capaz de seguir muy de cerca su evolución. Se debe de tener mucho cuidado con las simulaciones pues la reconexión magnética en el código ocurre por diferentes mecanismos físicos no necesariamente los mismos que en la naturaleza.

La figura 2.4 muestra medidas del campo magnético tomadas por las naves ISEE 1 y 2 en la magnetopausa cuando un evento de flujo magnético se observó.

Los patrones magnéticos observados coinciden con la interpretación mostrada en los dos paneles inferiores, un tubo de flujo magnético enrollado conectado de la magnetofunda a la magnetosfera y moviéndose a lo largo de la superficie. El diagrama indica un tubo sencillo moviéndose hacia el norte, pero pueden ocurrir por pares y moverse tanto al norte como al sur.

Capítulo 3

Análisis de perturbaciones y FTEs sencillos

Introducción

A partir de una lista de 54 FTEs realizamos un análisis de las características magnéticas de diferentes FTEs en la magnetofunda y en la magnetosfera. Los datos utilizados para este propósito son mediciones realizadas por la nave Polar (mayores referencias de la nave Polar en la sección B.2) para el periodo de tiempo que abarca los años del 2000 al 2003.

Dado que la región de reconexión es pequeña y es difícil que las naves espaciales crucen exactamente por ahí, es necesario encontrar algún método para obtener información de ese lugar. Las fluctuaciones magnéticas son un fenómeno importante en las magnetosferas, son agentes de cambios en las distribuciones del plasma y de las partículas energéticas y pueden llegar a ser un diagnóstico de los procesos que ocurren en diferentes lugares debido a que algunas se propagarán más allá que otras. Pensando en esto se realizó un análisis de los datos del campo magnético de la nave Polar cerca (a lo más a 10 minutos de distancia) de cada FTE. Dependiendo de la forma de los FTEs y de las perturbaciones observables en el campo magnético, clasifiqué estos eventos en 4 categorías: FTE+perturbaciones aledañas (adyacentes o durante el FTE), FTE + perturbaciones lejanas, FTE múltiples y los ejemplos que los tenían todos, es decir, FTEs múltiples con perturbaciones aledañas y lejanas. Más tarde se analizaron las características de las perturbaciones encontrando la dirección de propagación, la polarización, la dirección de rotación, la forma y las frecuencias características de las ondas utilizando los métodos matemáticos de Fourier, Máxima entropía y mínima varianza (Apéndice A)

En las siguientes secciones describiré las características magnéticas que cada categoría tiene, prestando atención en las oscilaciones del campo magnético buscando ondas.

3.1. Características de los FTEs

Debido a que resulta difícil encontrar en la literatura una definición clara de un FTE, se revisaron las diferentes características asociadas con el fenómeno y se tomaron aquellas coinci-

dentos en varios artículos [Russell y Elphic, 1979, Daly et al., 1981, Berchem y Russell, 1984, Saunders et al., 1984, Lee y Fu, 1985, LaBelle et al., 1987, Farrugia et al., 1988, Elphic, 1995, Kuo et al., 1995]. En esta tesis se utilizarán los siguientes criterios para identificar eventos con FTEs.

1.- El valor de la componente normal B_n de pico a pico, o amplitud, debe ser por lo menos 10 nT. El límite impuesto mayor a 10 nT es porque no se puede asegurar que perturbaciones menores que 10nT son debidas a FTEs o a ondas en la frontera.

2.- La duración del FTE es de al menos 20 segundos y sólo se consideran FTE aislados claramente. En nuestra clasificación consideramos como un grupo aparte aquellos eventos en los cuales se tienen muchos FTEs para un intervalo de tiempo de 20 minutos, a este grupo lo llamamos FTEs múltiples.

3.- Usualmente hay un aumento en la intensidad del campo magnético y también las componentes B_l y B_m tienen un cambio unipolar simultáneo

4.- Se excluyen los eventos bipolares centrados en el cruce de la magnetopausa, para no confundir entradas y salidas de la magnetopausa con FTEs.

A continuación se muestra un ejemplo de caracterización de los FTEs y las perturbaciones por analizarse. El evento ejemplo corresponde al día 23 de marzo del 2002, la figura (3.1) muestra los valores del campo magnético medidos por la nave Polar en componentes normales a la magnetopausa (NLM) en un intervalo de 20 minutos a partir de las 12 del día. Con dos rectángulos verticales (aproximadamente a las 12:08 y 12:37) se indican dos FTEs, caracterizados por ser una brusca oscilación bipolar en la componente n del campo magnético, con engrandecimiento de la magnitud del campo y mayores a 20 segundos. La amplitud del FTE se define como el valor en nT tomado del pico mayor al menor, para el primer FTE es de 112 nT y la duración es el intervalo de tiempo de la oscilación bipolar, siendo de 121 segundos. La polaridad es la información de como fué la oscilación bipolar, primero norte y después sur (+/-) y se dice que tiene una polaridad normal, ó una oscilación primero sur y después norte (-/+) con polaridad reversa . Un tubo de flujo moviéndose hacia el norte produce una oscilación bipolar con polaridad normal (+/-) y un tubo moviéndose hacia el sur presenta una polaridad reversa (-/+) [Berchem y Russell, 1984, Rijnbeek et al., 1984]. En este día aparecen más de los 2 FTEs marcados, aunque todos los FTE presentan polaridad normal cada uno tiene amplitudes diferentes, lo que nos habla de tubos reconectados moviéndose hacia el norte o bien, que el punto de reconexión se encuentra al sur de la nave Polar y que en este día la reconexión magnética se está dando de manera intermitente. También en la figura (3.1) encerradas en óvalos punteados se muestran las perturbaciones a analizarse por FFT, mínima varianza y máxima entropía, encontrando sus frecuencias características, si son transversales o compresionales, la polarización, la dirección de propagación, etc.

A lo largo de la tesis se harán diferentes análisis con las características de los FTEs, tales como el valor de la oscilación pico a pico en nT o amplitud, y el valor de la duración de la oscilación en segundos. También se verá si existe alguna dependencia con la ubicación espacial que tengan; para ello se dividirá nuestro conjunto en tres regiones: latitudes bajas, medias y altas.

Tomamos los puntos descritos en la sección 3.1 para caracterizar a los FTEs. Las regiones aledañas las tomamos a una distancia de 10 minutos de la oscilación bipolar obteniendo sus principales parámetros (el valor pico a pico mayor a 10 nT y 20 segundos, aumento en la

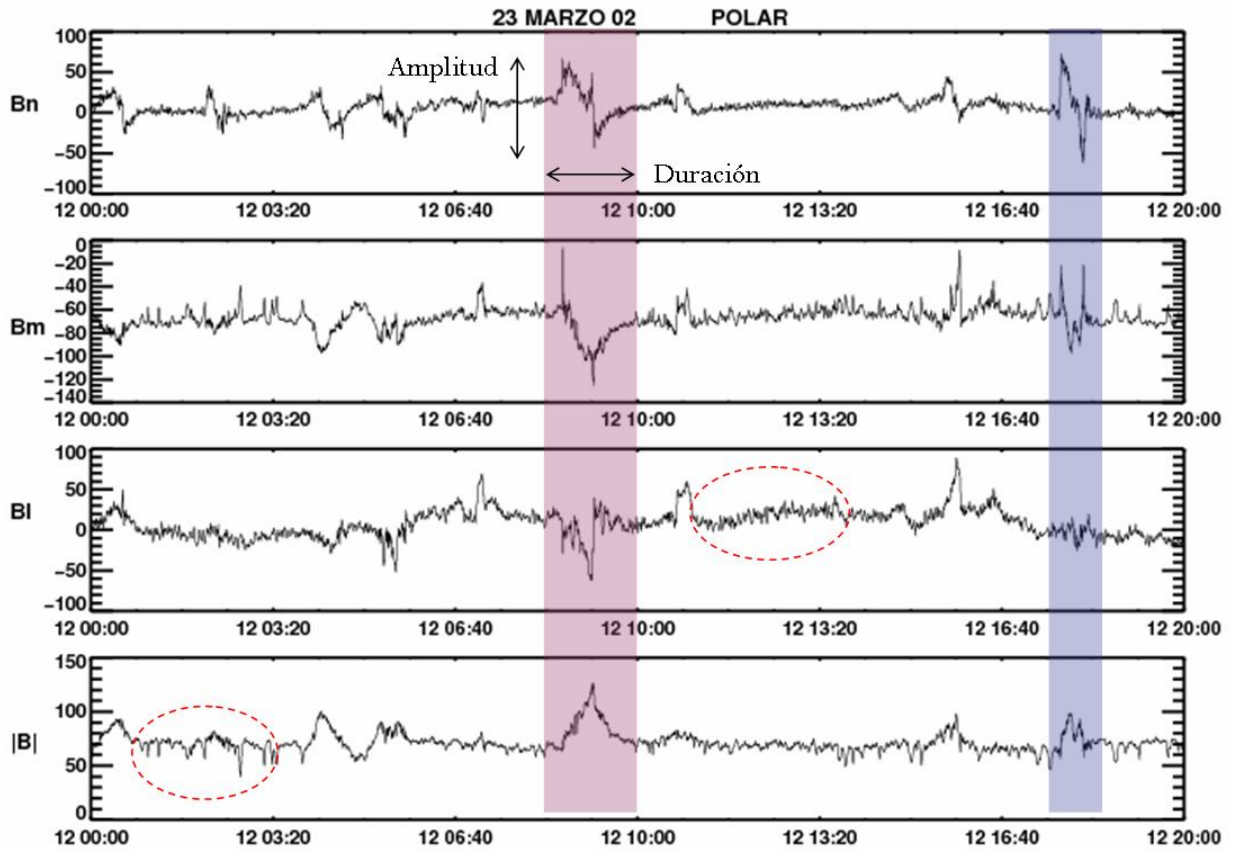


Figura 3.1: Descripción de los parámetros del FTE y las perturbaciones por analizarse

magnitud del campo, tomando en cuenta para el análisis sólo eventos aislados). Hicimos un análisis de las características de los FTEs en la magnetopausa, en la magnetofunda en el punto sub-solar y/ó en diferentes latitudes y/ó longitudes y cerca del cusp.

3.2. FTE+perturbaciones aledañas

A este conjunto pertenecen los eventos en los cuales aparece un FTE con perturbaciones tipo ondas junto o dentro de él. En esta sección se tienen 18 eventos, explicaré detalladamente sólo 2. En el primero las perturbaciones aledañas son antes y después de la oscilación bipolar (3 de marzo del 2003), y en el segundo caso (20 de febrero del 2003), las perturbaciones se encuentran dentro de la oscilación bipolar (dentro del intervalo de duración del FTE).

El día 3 de marzo del 2003 Polar se encontraba cerca de la magnetopausa a bajas latitudes cerca del punto subsolar (coordenadas $x=9.49$, $y=1.19$, $z=-0.88 r_T$ en GSM). Dada la posición de la nave podemos inferir que se encuentra cerca de la región de reconexión, pero además, al analizar los datos de campo magnético en el sistema de coordenadas NLM, se observa claramente un evento de transferencia de flujo con perturbaciones en las componentes N, L y M y en la magnitud del campo, figura (3.2). El primer panel corresponde a la componente

normal a la magnetopausa (B_n) apuntando hacia afuera de la Tierra, en segundo lugar se muestra la componente M del campo magnético que es la que completa la triada formada por la normal y la dirección del campo geomagnético, o L mostrada en el tercer panel, y por último, en la parte inferior se muestra la magnitud del campo. En la componente normal a la magnetopausa podemos apreciar claramente un FTE en el intervalo [07:52:00-07:56:31]. Este FTE tiene una amplitud de 77.47 nT de pico a pico, con duración del intervalo total de 6 minutos 11 segundos y una marcada polaridad sur norte o reversa. Las componentes M, L y la magnitud del campo tienen oscilaciones y máximos principalmente en el centro del FTE. Encerradas en óvalos se presentan intervalos con oscilaciones que probablemente sean ondas, para cada uno de estos intervalos se hizo un análisis de variación mínima, FFT y máxima entropía para ver las características de las perturbaciones. Para la descripción de los métodos matemáticos utilizados en detalle ver el apéndice (A).

El análisis de las perturbaciones que se encuentran antes de la oscilación bipolar pronunciada se presenta en la figura (3.3). En (a) se muestran las medidas de campo magnético del sub intervalo analizado en coordenadas NLM (B_n , B_m , B_l , B). Las caídas abruptas en la magnitud del campo magnético, parecen las firmas de ondas tipo espejo. En la parte inferior de la gráfica correspondiente a la magnitud total están indicados los intervalos que se analizaron con la transformada rápida de Fourier y Método de máxima entropía (línea mayor, amarilla) y mínima varianza (línea roja corta). En (b) se encuentra el análisis de Fourier realizado al intervalo de tiempo indicado en (a), se muestra un análisis espectral dividido en dos gráficas, la línea sólida corresponde al espectro compresional y la discontinua al transversal, así para este evento tenemos picos compresivos de 32.95 y 16.36 segundos. Para comprobar si los picos encontrados son en realidad frecuencias características de las perturbaciones, hice el análisis de máxima entropía (c) descomponiendo la señal en su parte compresiva y transversal. Para todos los eventos analizados, el método de máxima entropía tiene una gran similitud con los periodos obtenidos por Fourier, en particular en este caso se obtienen picos compresivos de 36.75 y 14.67 segundos. El análisis de variación mínima (d), tiene ondas con un ángulo entre la dirección de propagación K y el campo promedio B_0 de 83.9° , y 163.2° entre el vector de máxima variación I y B_0 , un error angular de $\Delta\theta_{kB} = 3.2^\circ$ y polarización prácticamente lineal. El error se calcula según el criterio de [Hope et al, 1981] que se explica en la sección de Análisis de variación mínima en el Apéndice A. Son ondas compresivas con polarización prácticamente lineal que por las depresiones apreciables en la magnitud del campo total, su ángulo de propagación y su compresibilidad, podrían ser tipo espejo en la magnetofunda. El análisis del segundo intervalo II (después del FTE) se muestra en la figura (3.4). En (a) las medidas de campo magnético realizadas por Polar, transformadas al sistema NLM y los intervalos de duración para el análisis FFT y máxima entropía (flecha larga) y mínima varianza (flecha chica). En el panel (b) se muestra el hodograma correspondiente al intervalo de la flecha pequeña, se aprecian ondas compresivas elípticas y con sentido de rotación derecho (el trazo comienza en la cruz + y termina en el asterisco *), con un ángulo entre K y B_0 ($\widehat{KB_0}$) de 47.57° , e I, B_0 ($\widehat{IB_0}$) de 104.71° y un error angular de $\Delta\theta_{KB_0} = 3.9^\circ$. En (c y d) están los intervalos analizados por FFT y máxima entropía, ambos presentan picos compresivos cerca de los mismos periodos, 44.38 y 27.17 s para Fourier y 45.26 y 22.29 s para máxima entropía. Probablemente estas ondas también sean tipo espejo pero con polarización no tan lineal.

Está establecido que el calentamiento de la onda de choque y las líneas de campo magnético que envuelven a la magnetopausa desarrollan una anisotropía en la temperatura de protones del viento solar $T_{(per)p}/T_{\parallel p} > 1$, donde *per* y \parallel representan las direcciones perpendicular y

paralela respectivamente al campo magnético ambiente. En la magnetofunda terrestre esta propiedad origina el crecimiento de dos inestabilidades distintas y la observación de fluctuaciones magnéticas a frecuencias menores a la frecuencia de ciclotrón del protón Ω_p . Estas inestabilidades son la inestabilidad ión ciclotrón y modo espejo [Gary 1993].

Las ondas tipo espejo se han encontrado en diferentes lugares de la magnetofunda de la Tierra [Russell et al, 1987, Glassmeier et al., 1993], cerca de la luna Io del planeta Júpiter [Huddleston et al, 1999, Russell et al, 1999], cerca de los cometas, en el viento solar y recientemente en la magnetosfera de Saturno [Russell et al, 2006]. Estas ondas no se propagan (velocidad de fase igual a cero) y presentan una anticorrelación entre el plasma y las perturbaciones del campo magnético. Es un modo linealmente polarizado que en los datos de campo magnético presenta fuertes depresiones. El modo espejo puede ser generado por la inestabilidad tipo espejo (espejo magnético) que tiene lugar en plasmas con β alta y anisotropías en la temperatura ($T_{(per)p}/T_{\parallel p} > 1$) en una o varias especies. El modo tipo espejo crece como función de β_{\parallel} y la anisotropía de protones, el modo espejo se desarrolla en un ambiente donde la anisotropía sea baja ($A_P \simeq 2$) y la β del plasma alta. El encontrar ondas tipo espejo aledañas al FTE nos habla de que existe una anisotropía en la temperatura en el plasma tal vez debida a efectos de reconexión.

Las características del viento solar para este día se ejemplifican en la figura (3.5). Con una línea vertical discontinua se ubica el momento del FTE, antes de éste se aprecia claramente una rotación de Bz teniendo casi 2 horas con componente sur (segundo recuadro gráfica inferior), rotaciones en los ángulos del campo magnético (paneles 3 y 4) y beta baja (última gráfica). De ello podemos intuir que es esta parcela de viento solar la que produce la reconexión en un punto al norte de Polar, y por esto se observa un tubo de flujo desplazándose hacia el sur. Probablemente la nave se encuentre bastante cerca del punto de reconexión y por ello el tubo de flujo observado es tan grande.

La segunda descripción corresponde al día 20 de febrero del 2002, día en el que Polar se encontraba a mayores latitudes (coordenadas $x=8.3029, y=3.8141, z=1.7801$ r_T en GSM). En este evento el FTE se puede aislar casi completamente de sus alrededores y las mayores oscilaciones del campo que presenta se dan en el centro de la oscilación bipolar, como lo muestra la figura (3.6), aunque también tiene perturbaciones antes y después (ondas lineales y elípticas izquierdas de alta frecuencia respectivamente). Existen otros dos eventos en el conjunto de FTE que presentan oscilaciones dentro o durante el FTE, casi todos tienen ondas polarizadas circularmente

Al hacer el análisis de las perturbaciones dentro del FTE encontramos ondas transversales con periodos de 4.95, 3.14 y 1.2 segundos, polarizadas circularmente con rotación izquierda, el $\widehat{KB}_o = 12,68^\circ$ é $\widehat{IB}_o = 82,08^\circ$ y un error angular de $\Delta\theta_{KB_o} = 4.73^\circ$ (Ver figura 3.7). Dadas estas características podemos clasificarlas como ondas ión ciclotrón dentro del FTE, lo cual nos habla de un plasma con anisotropía en la temperatura.

En el conjunto de todos los FTEs analizados, los eventos de transferencia de flujo con perturbaciones aledañas están distribuidos espacialmente como lo muestra la figura (3.8). Del lado izquierdo de la figura está representada la distribución espacial de los FTEs que presentaron perturbaciones aledañas, y del lado derecho se ha hecho la división de FTEs con perturbaciones aledañas con componente sur en ACE (cruz) y norte (rombo). Aparentemente no hay una clara tendencia de localización de los FTEs con perturbaciones aledañas. Calculé las correlaciones de los parámetros del viento solar con los parámetros de duración

y amplitud de los FTES con perturbaciones aledañas sin encontrar mejor correlación que el 37% entre la duración y el ángulo clock.

En la figura (3.9) se muestra una tabla resumiendo las características de los eventos con perturbaciones encontradas aledañas a los FTES. En la primera columna se indica la fecha, en la segunda la polaridad del FTE (norte (N) y sur (S)) y en algunos casos también se indica si el FTE está en la funda (f) en la región de transición (RT) o en la magnetosfera (M), en la tercera el lugar de las ondas (antes, durante o después de la oscilación bipolar), de la cuarta a la novena columna está del análisis de mínima varianza, KB_0 es el ángulo entre la dirección de propagación y el campo magnético promedio, IB_0 el ángulo entre el vector de variación máxima y el campo promedio, $\Delta\theta$ es el error angular, n el número de elementos analizados, en el comentario MV se encuentra la descripción de las ondas, en la columna décima los picos predominantes obtenidos por FFT compresivos (C) y transversales (T) y por último la clasificación asignada a esas perturbaciones. A lo largo de la tesis se reporta el error angular y el tangencial, los algoritmos se encuentran en el apéndice A. Dadas las características de las ondas, tales como su polarización y su dirección de propagación podemos clasificar a las ondas como tipo espejo a aquellas que tengan un ángulo entre K y B_0 cercano a los noventa grados, tengan polarización lineal o casi-lineal y sean compresivas mostrando grandes decrementos en la magnitud de B, en este caso se encuentran los días: 9 de mayo del 2000, 19 de enero del 2002 antes, 21 de marzo del 2002 antes y el 3 de marzo del 2003. Lo único que faltaría serían las medidas de la densidad del plasma para ver si realmente son ondas espejo mostrando la anticorrelación con la densidad. Con polarización circular, propagándose transversal a B_0 y rotación izquierda están caracterizadas como una onda ion ciclotrón, en este caso tengo a los días: 20 de febrero del 2002, 21 de marzo del 2002 después, y el 27 de febrero del 2003. Aquellas perturbaciones tipo ondas que se propaguen paralelas o casi-paralelas a B_0 con rotación derecha serán clasificadas como ondas magnetosónicas derechas (23 de marzo del 2001 segunda parte después y el 19 de enero del 2002 después)

3.3. FTE+perturbaciones lejanas

En esta sección se analizan los eventos de transferencia de flujo para los cuales aparecen ondas bien definidas lejos del FTE (a partir de 5 minutos y un máximo hasta 20 minutos después). El ejemplo ilustrativo de esta sección corresponde al día 4 de marzo del 2001, figura (3.10) donde se observa un FTE cerca de las 19:55 con polaridad norte sur y aproximadamente 8 minutos después se aprecia un tren de ondas tipo espejo (mostrado con un óvalo punteado). Al hacer un acercamiento a los datos encontramos que antes del FTE principal (el mayor, marcado con dos líneas punteadas verticales en la figura 3.10) hay otro FTE más pequeño pero con estructuras tipo ondas aledañas antes de la oscilación bipolar cerca de las 19:53. Por otro lado, en los valores del viento solar medidos por ACE tenemos una configuración tipo nube magnética, ie. una estructura con una rotación suave del campo magnético β baja, campo magnético engrandecido y baja temperatura de protones, que se marcó con un óvalo a partir de las 16 hrs, ver figura (3.11).

En las componentes normales del campo magnético se observa un gran FTE tipo N-S con oscilaciones en todas las componentes del campo y un engrandecimiento en la magnitud total, seguido minutos después por un intervalo de ondas tipo espejo (segundo óvalo discontinuo en figura 3.10 cerca de las 20hrs) y también perturbaciones antes (primer óvalo), viviendo en

la magnetofunda. Por otro lado, si se hace un acercamiento profundo se verá que todo el día está lleno de perturbaciones de altas frecuencias. El análisis de los intervalos con probables ondas se muestra en la figura (3.12).

Las oscilaciones en la magnitud del campo magnético total en coordenadas normales y sobre todo en la magnitud del campo parecen ondas tipo espejo (3.12 (a)), la línea amarilla larga representa el intervalo analizado por FFT y máxima entropía, mientras que la línea roja corta es el intervalo de mínima varianza. El análisis de FFT (3.12 (d)) arrojó valores compresivos con picos en frecuencias de 17.73 y 33.25 segundos, mientras utilizando el método de máxima entropía (3.12 (c)) se encuentran picos compresivos de 31.25 y 15.28 segundos. Variación mínima (3.12 (b)) nos dió valores de $\widehat{KBo} = 88,28^\circ$ é $\widehat{IBo} = 14,65^\circ$ y un error de $\Delta\theta=6.41^\circ$ lo que nos habla de ondas compresivas casi lineales tipo espejo en la funda, figura (3.12). Tenemos un plasma con anisotropías en la temperatura y/o la presión.

Las diferentes medidas realizadas por ACE del viento solar muestran una nube magnética figura (3.11) con Bz sur por más de 9 hrs, rotación del campo, beta y temperatura bajas. La nube es coincidente con el FTE, representado en la figura por una línea vertical discontinua.

La distribución espacial de todo este conjunto de FTEs con perturbaciones lejanas se muestra en la figura (3.13), donde del lado derecho están todos los eventos, y del derecho con cruces y rombos los FTE con Bz sur o norte respectivamente. Con respecto al conjunto de las perturbaciones aledañas tenemos una muestra menor y mucho más colimada hacia la nariz de la magnetosfera, más cerca del punto subsolar y distribuidos a bajas y medias latitudes.

En la figura (3.14) están resumidas las características de las perturbaciones lejanas encontradas por el método de FFT y mínima varianza. La polaridad del FTE y donde se encuentran las perturbaciones, los ángulos con respecto a las direcciones de máxima y mínima variación, el error angular, el cociente de los valores mínimos e intermedios, la cantidad de datos tomados, el tipo de onda y la rotación que esta tiene, sus frecuencias de oscilación características y la clasificación de la onda. De los 10 casos analizados sólo tres presentan componentes compresionales, todos los demás tienen componentes transversales en los modos encontrados vía Fourier y Máxima Entropía.

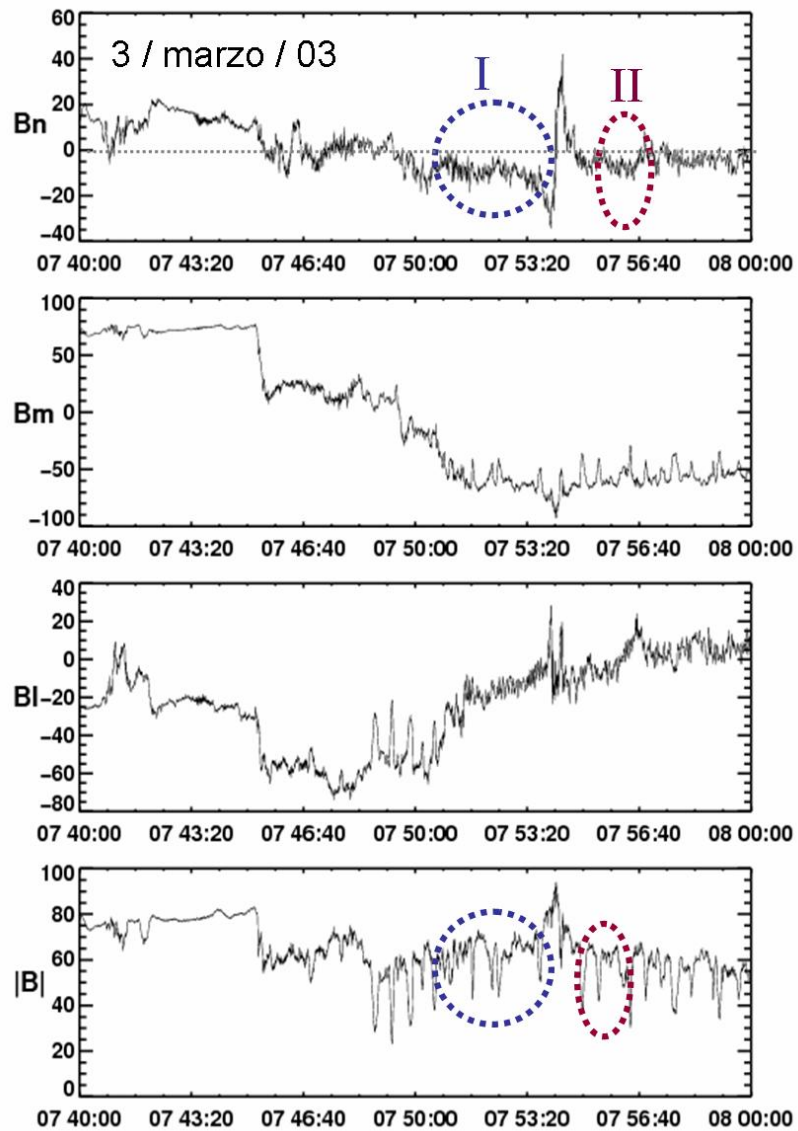


Figura 3.2: FTE 3/mar/03 en coordenadas NLM

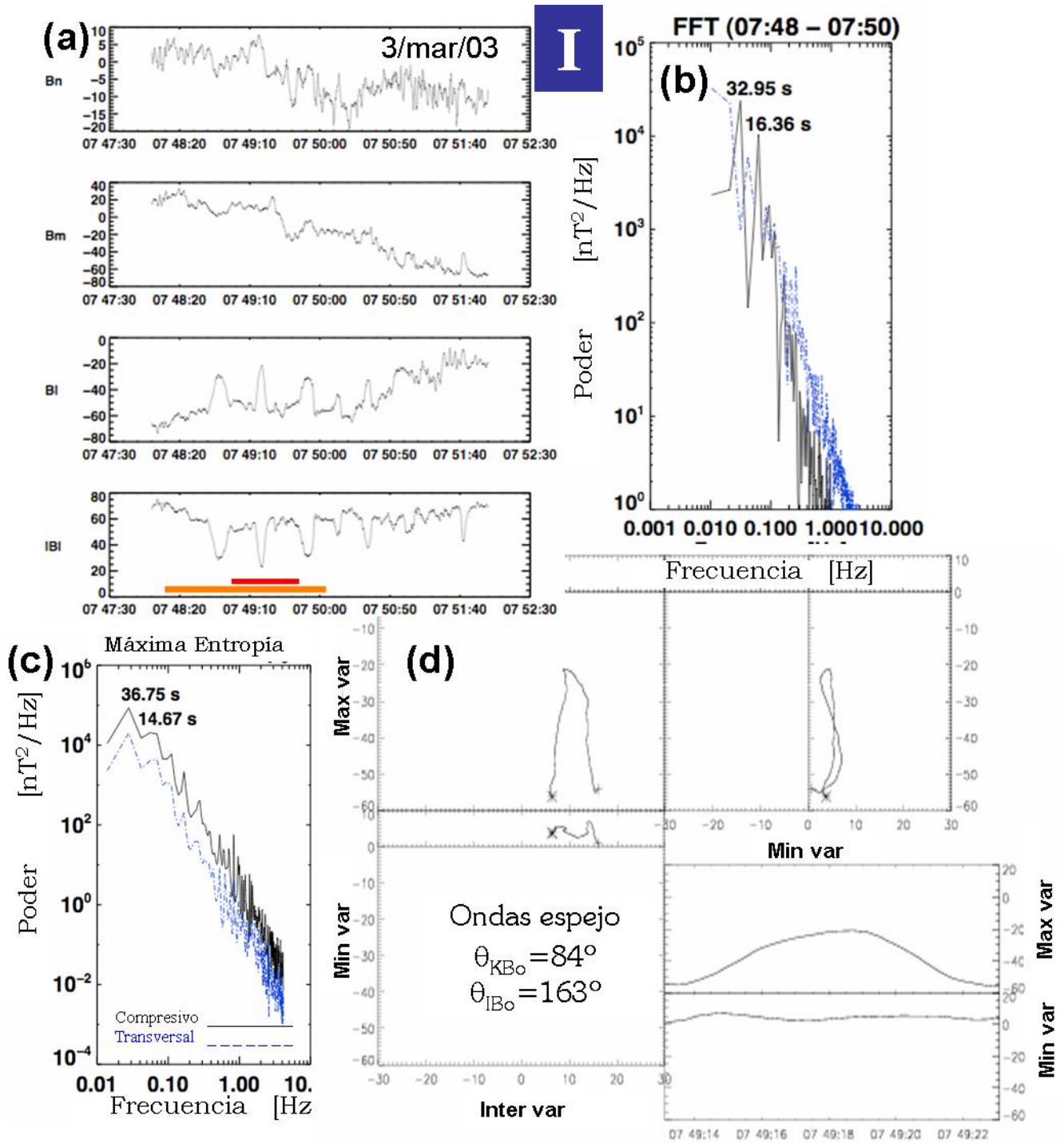


Figura 3.3: (a) Campo magnético de las perturbaciones antes del FTE, (b) espectro de poder FFT (c) Máxima entropía y (d) Mínima varianza

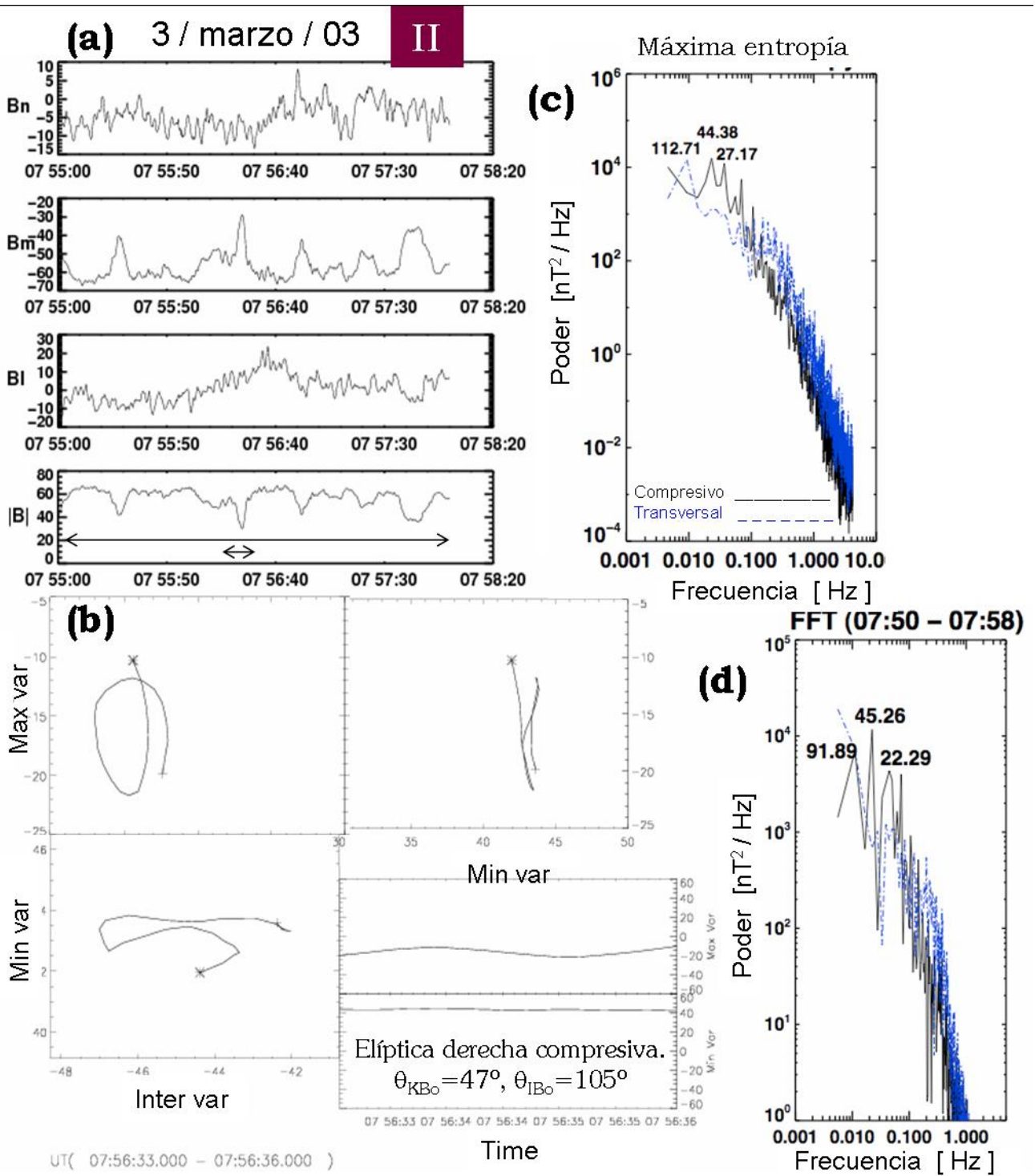


Figura 3.4: (a) Perturbaciones después del FTE en coordenadas NLM, (b) espectro de poder, (c) hodosogramas. El trazo comienza en la cruz y termina en el asterisco.

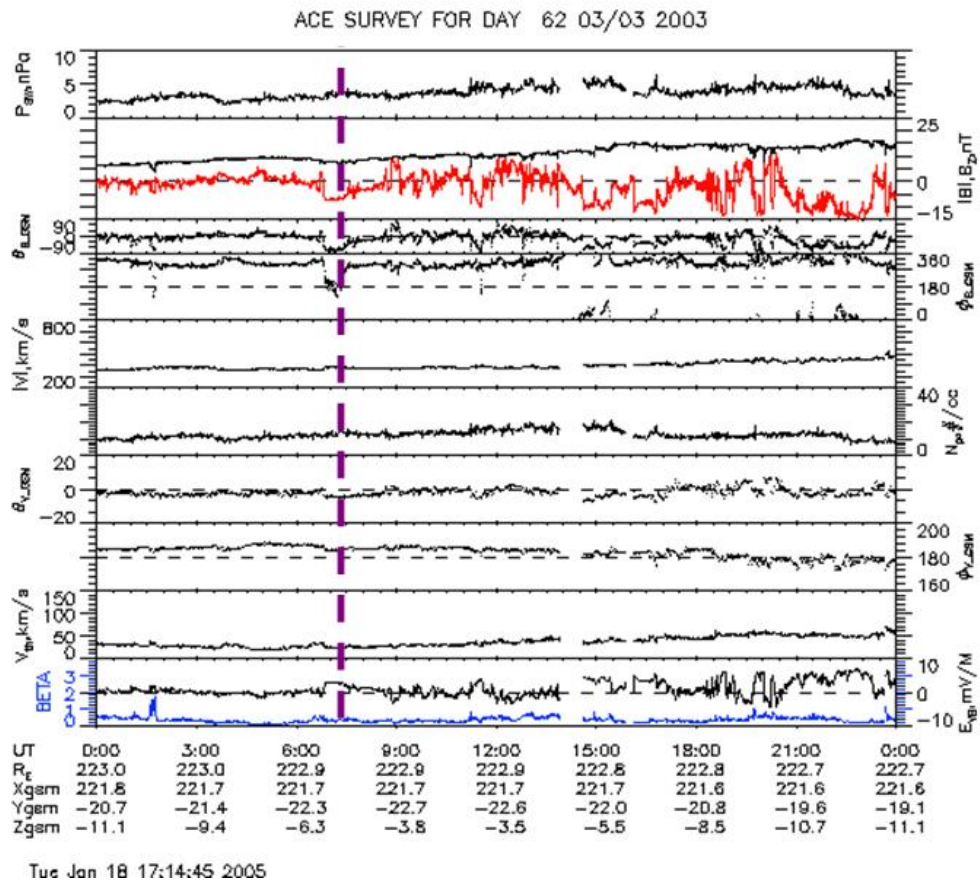


Figura 3.5: Medidas de ACE para el día 3/marzo/03

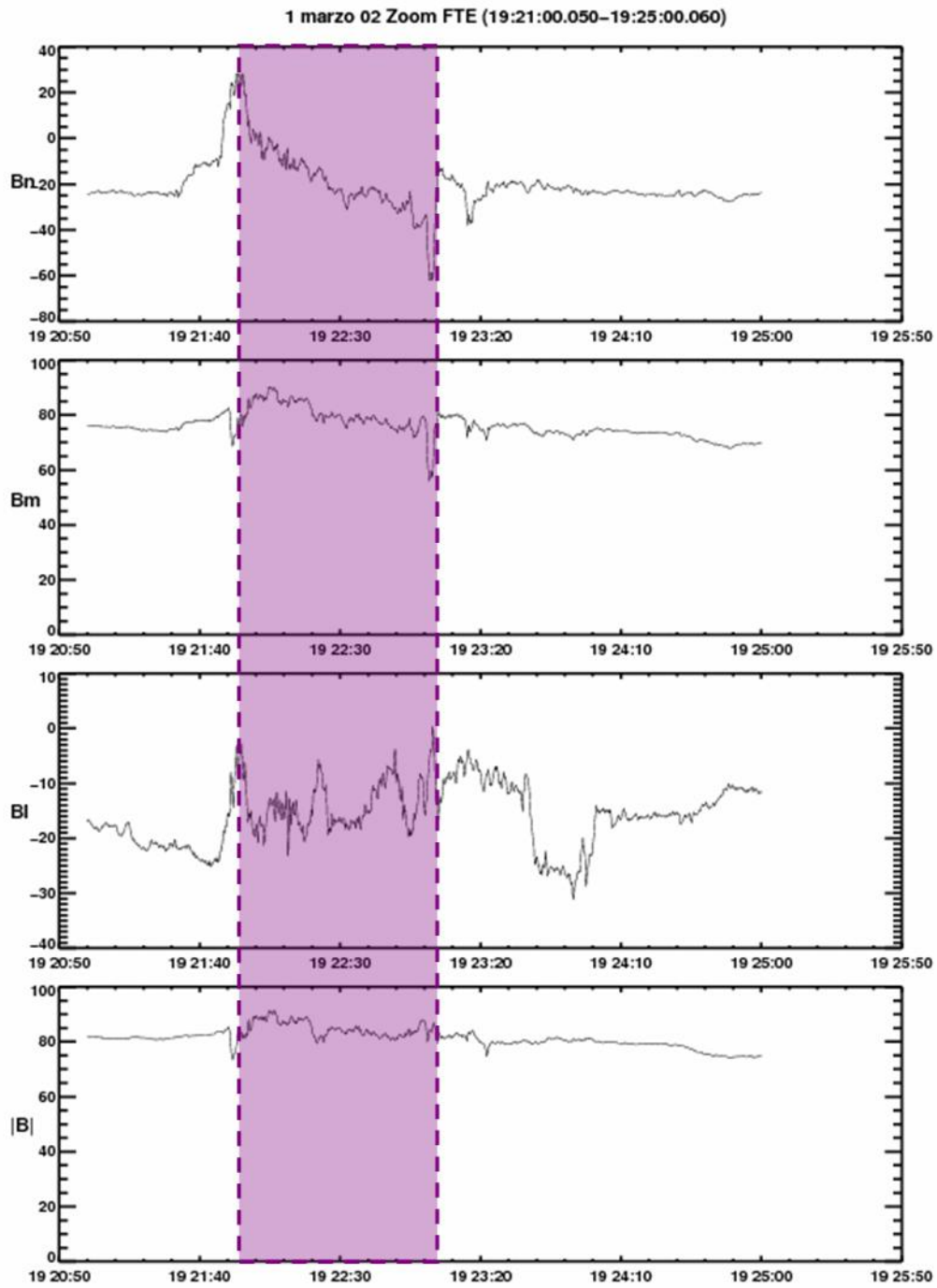
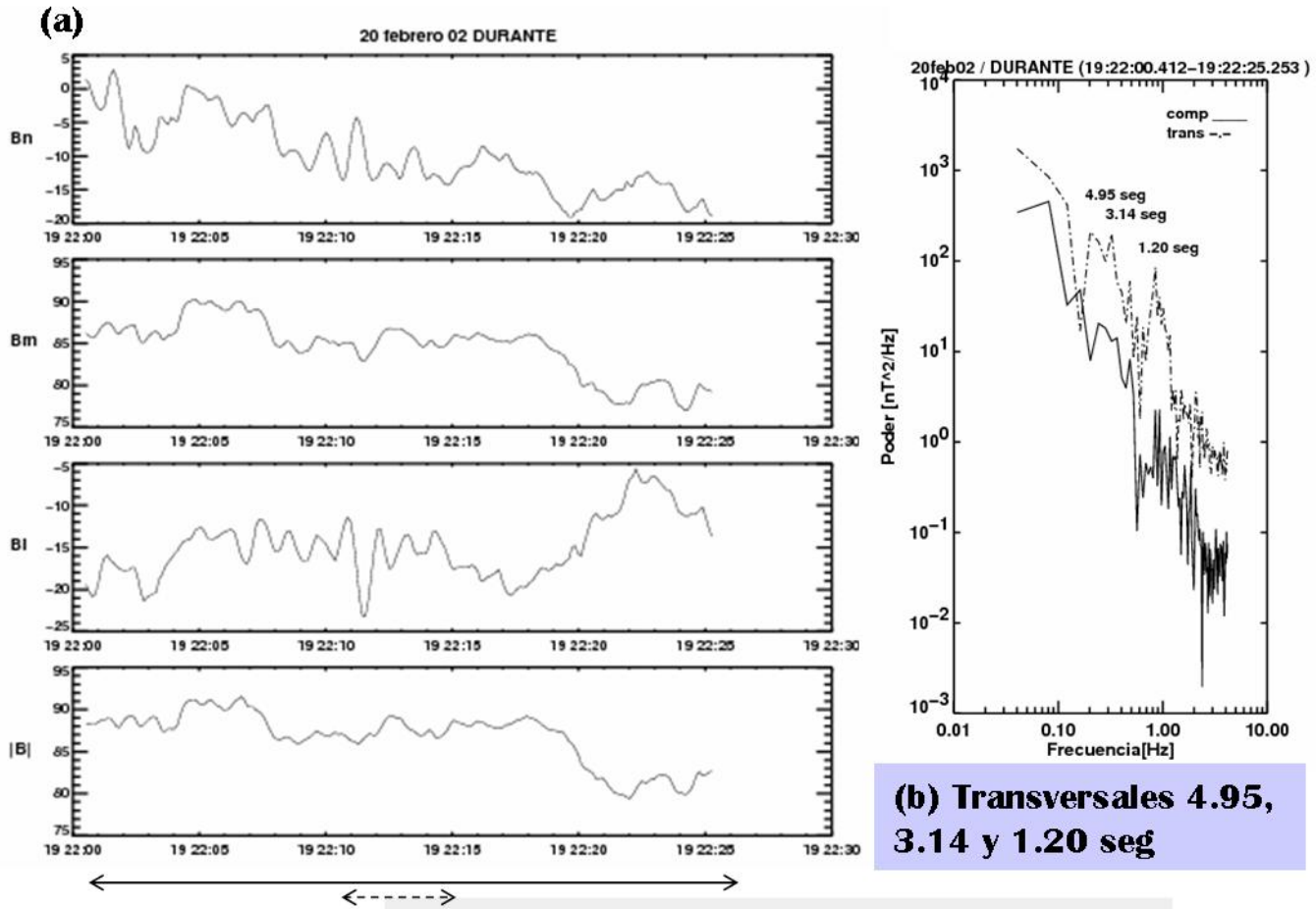


Figura 3.6: Perturbaciones en el centro del FTE en coordenadas NLN



(c)
 $KBo=12.6755$
 $IBo=82.0843$
Polarización
circular, rotación
izquierda.

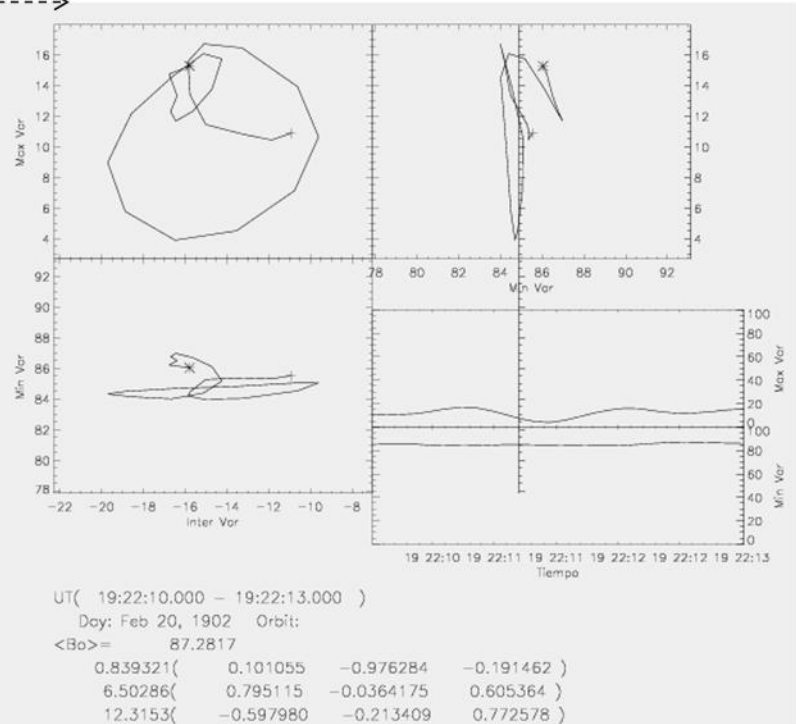


Figura 3.7: (a) Perturbaciones en el centro del FTE en coordenadas NLM, (b) análisis de Fourier, (c) hodograma

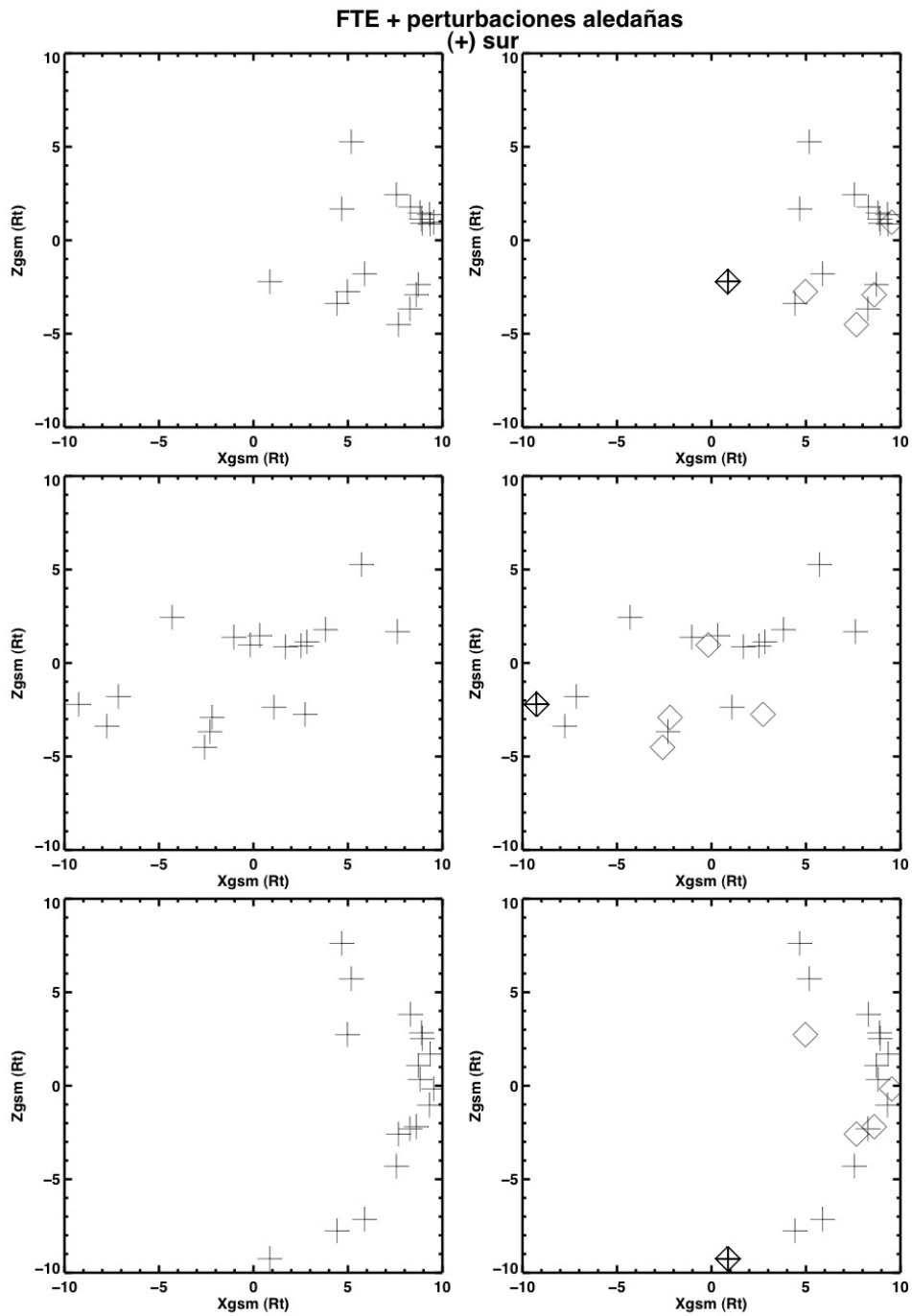


Figura 3.8: Distribución de los FTEs con perturbaciones aledañas. Derecha: todos los eventos, izquierda: sur (cruces), norte (rombos)

FTE + ondas aledañas									
Fecha	FTE		MV				Comentario MV	FFT	Clasificación
			KBo (grados)	IBo (grados)	$\Delta\theta$ (grados)	n			
9-May-00	N-S	Antes	86.1416	8.46632	3.45	84	Elípticas compresivas amorfas	C 6.82	Espejo
		Después	84.3414	90.7271	13.17	67	Elípticas compresivas	C 6.39s, T 3.17 y 1.47 s	
23-Mar-01 parte 2	N-S	Antes	81.02	26.23	7.83	126	Compresivas amorfas	C 4.04 s	
		Después	34.7432	92.3378	3.61	51	Elípticas transversales der	C 10.99, T 13.41 C 18.31 s	Magnetosónicas derechas
19-Jan-02	N-S en RT D' B'	Antes	86.5668	23.6816	4.68	43	Elípticas compresivas	C 3.96, 2.97 y 1.45 s	Espejo
		Después	40.7561	126.377	4.14	26	circulares_derechas oblicuas	T 91,57, c 26,86 T 49,59s	Magnetosónicas derechas
20-Feb-02	N-S en M	Antes	38.9729	93.0108	38.41	51	Transversales	T 12.14 y 6.96s	
		Durante	12.6755	82.0843	4.73	26	Circulares izquierdas	T 4,95, 3,14 y 1,20	Ión ciclotrón
		Después	16.4701	92.0856	2.27	51	Elípticas transversales izq.	T 12,74 8,07 y 5,28	Ión ciclotrón
1-Mar-02	S-N en M	Antes	41.4887	119.693	4.96	26	Transversales elípticas izq	T 5,71 2,40 y 0,65 s	
		Después	17.5427	78.0205	6.18	43	Casi lineales transversales	T 5.74 3.77 y 2.70 s	
10-Mar-02	S-N en RT	Antes	70.1986	110.99	6.77		Amorfas	T 2.142 1.729 C 3.083 y 1.254	Amorfas
		Después	88.5996	87.3816	4.30	84	Amorfas	T 8.081, C 2.543 s	Amorfas
21-Mar-02	S-N	Antes	89.699	19.1912	2.23	126	Elípticas compresivas der	C 79.923 29.8802 y 21.366	Espejo
		Después	78.375	152.386	1.46	225	Circulares compresivas der	C 78.15 52.26 y 39.96	Ión ciclotrón
27-Feb-03	N-S	Durante	69.3705	121.634	8.86	51	Circulares derechas	T 12.04 9.68 y 6.97 s	Ión ciclotrón
3-Mar-03	S-N en RT C	Antes	83.8180	163.205	3.16	84	Comp lineales ESPEJO	C 30.77 15.40 y 8.56	Espejo
		Después	47.5744	104.706	3.86	26	Comp elípticas derechas funda	C 44.76, 22.72 y 13.73	Espejo

Figura 3.9: Características de las perturbaciones aledañas

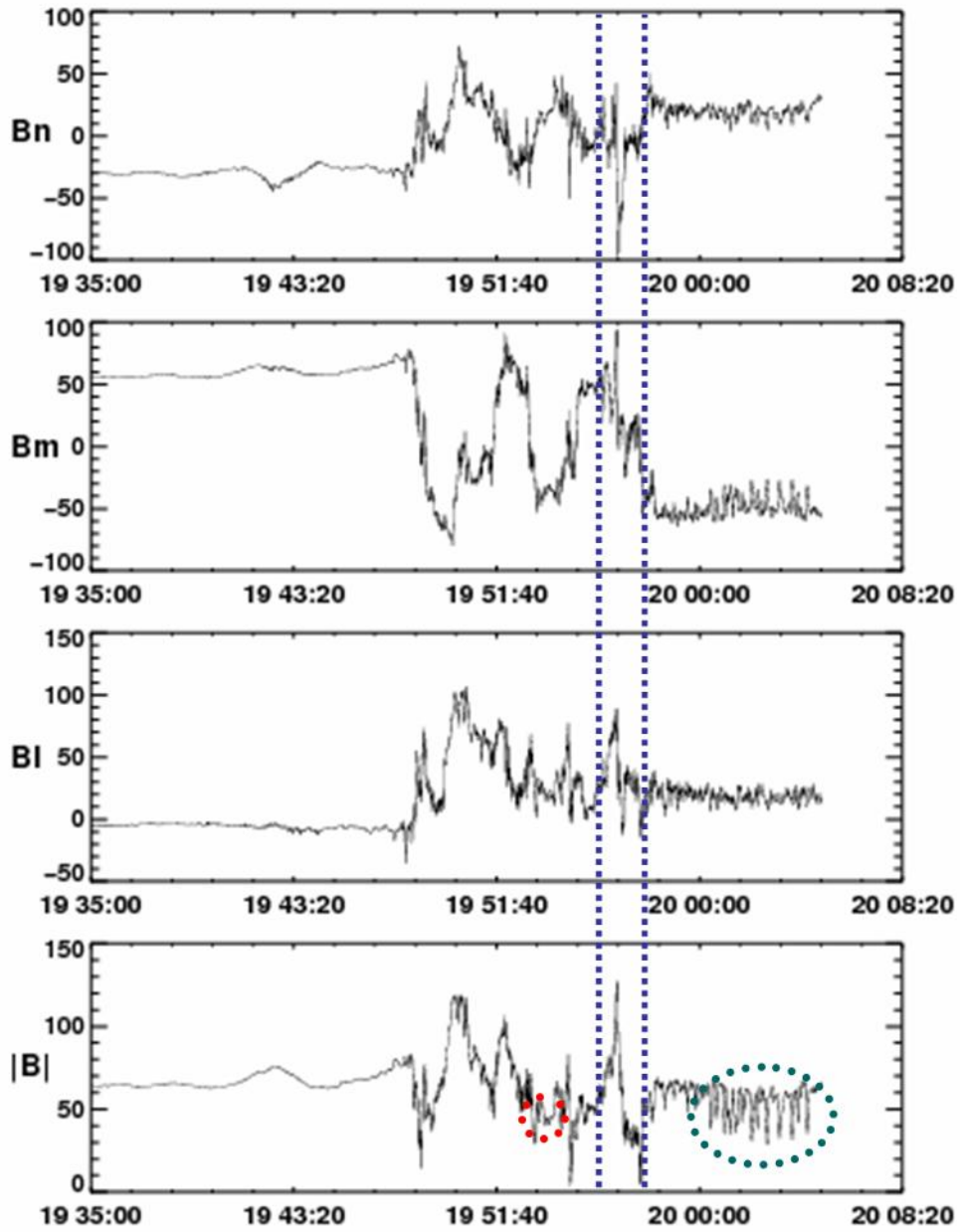


Figura 3.10: FTE con perturbaciones lejanas (4 marzo 01)

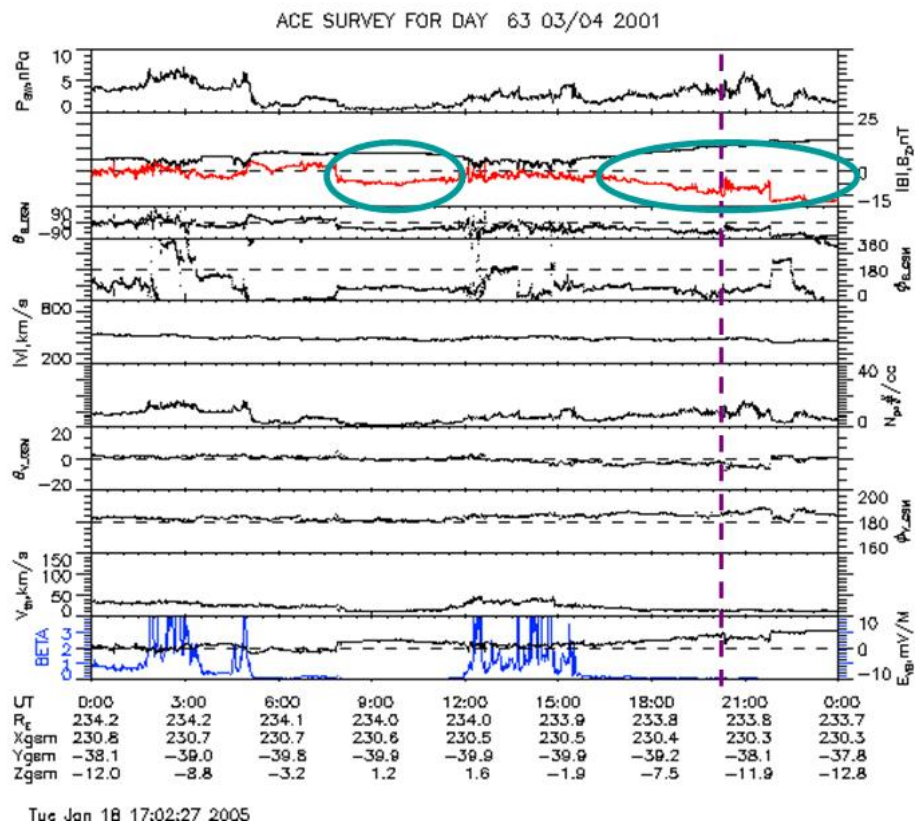


Figura 3.11: Valores de ACE para el FTE (4 marzo 01)

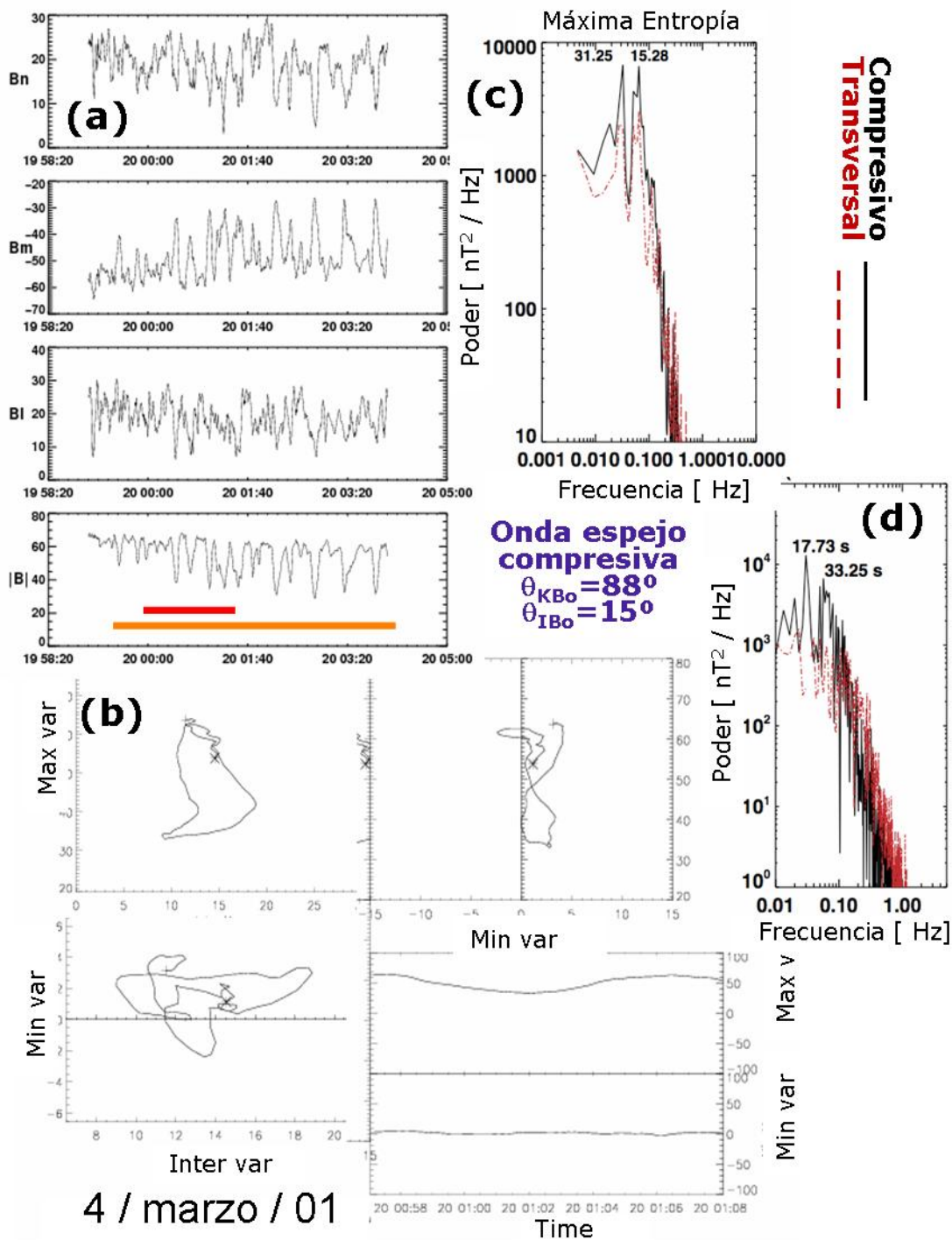


Figura 3.12: (a) Perturbaciones lejanas después del FTE en coordenadas NLM, (b) hodogramas, (c) Máxima Entropía y (d) Espectro de poder FFT para el 4 de marzo del 2001

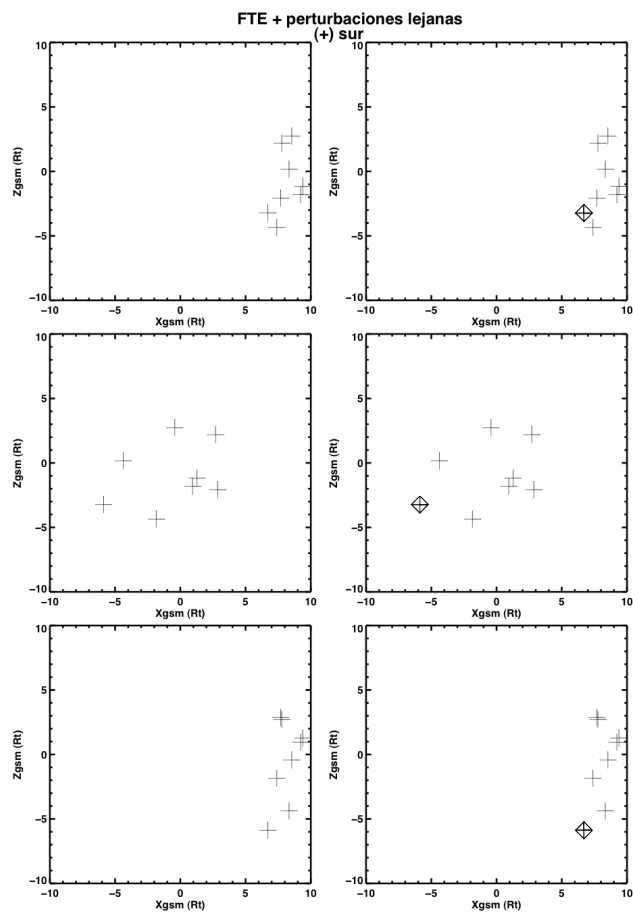


Figura 3.13: Distribución de los FTE con perturbaciones lejanas y dividido por polaridades. Sur (cruz), Norte (rombos)

FTE + ondas lejanas									
Fecha	FTE		KBo	IBo	$\Delta\theta$	n	Comentario MV	FFT	Clasificación
					grados				
4/3/01	N-S en RT	A cerca	76.8929	103.883	34.29	43	Nada	T 3.62 y 7.12 s	Amorfas
		D cerca	29.7800	89.3786	7.28	59	Elípticas transversales	T 3.09 y 4.28 s	Magnetosónica
		Después	88.2806	14.6451	6.61	93	Compresivas lineales	C 33.25 y 17.73 s	Espejo
15-Feb-03	NS	Antes	24.8110	78.736	26.53	26	Transversales circulares izq	T 2.40 1.72 y 1.01 s	lón ciclotrón
	SN	%FTEs	11.6463	83.855	61.99	26	Transversales elípticas izq	T 7.3 4.8 3.8 y 3.43s	Magnetosónica
4-Mar-03	N_S en RT	Después cerca	24.4194	111.991	8.63	34	circulares transversales der	T 3.04 4.30 y 5.99s	Magnetosónica derecha
	A	Ondas 1 des	10.4964	82.044	12.68	42	Elíptica transversal izq	T 11.59 3.62 y 2.73	lón ciclotrón
		Ondas 2	3.7162	86.778	3.27	43	Elípticas transversales izq	T 36.35, 18.60 y 7.34	lón ciclotrón
17-Apr-03	S-N en f	Ondas 1	85.5490	157.009	17.88	51	Compresivas lineales	C 8.87, T 16.13 y 11.96 s	Espejo
	C	Ondas 2	81.2107	121.866	15.16	63	Compresivas elípticas izq	T 37.95, C 19.81, T 16.73	lón ciclotrón

Figura 3.14: Características de las perturbaciones lejanas

Capítulo 4

Análisis de perturbaciones y FTEs múltiples

En el capítulo anterior se analizaron y clasificaron las perturbaciones encontradas cerca de diferentes FTEs. En los casos analizados existía una clara oscilación bipolar con las características de un FTE. En este capítulo se describen los eventos con más de un FTE en un intervalo de 40 minutos centrado en el evento de transferencia y las perturbaciones encontradas cerca (a cinco minutos del FTE ó dentro del mismo), o lejos (a lo más a 20 minutos antes ó después de la oscilación bipolar).

4.1. FTEs múltiples

Definitivamente esta es una de las secciones más representativas, ya que por sí misma representa más de una cuarta parte de la muestra analizada, además de ser la fracción del total de eventos que más apoyaría la teoría de reconexión intermitente para explicar la formación de los FTEs; así, el hecho de tener conjuntos de FTEs indica que la reconexión es un fenómeno que se da de manera intermitente pero continua en el tiempo. Todos los eventos de FTEs múltiples presentan la característica de tener un FTE mayor que pareciera como si se amortiguara conforme se propaga en el espacio-tiempo, (ver figura 4.2). Así el primer FTE tendrá una duración y amplitud mayor al segundo y así sucesivamente. Aunque en estos eventos se pueden observar hasta 9 FTEs en 20 minutos, al hacer un acercamiento a cada uno de ellos, puede ocurrir que tengan perturbaciones antes y después, sobre todo los de mayor valor pico a pico de la oscilación bipolar. La distribución espacial de los eventos con más de un FTE no muestra una preferencia en el lugar de ocurrencia como lo muestra la figura (4.1) ni siquiera cuando se hace la división de los FTEs con componente B_z sur o norte. Del lado derecho se muestra la distribución de los FTEs de -10 a 10 radios terrestres, la columna izquierda, en el mismo intervalo pero mostrando con cruces los eventos con CMI sur y con un rombo los del CMI norte.

El ejemplo que se muestra con varios FTEs es el día 17 de febrero del 2003 cuando Polar se encontraba cerca del punto subsolar a bajas latitudes en la magnetofunda.

La figura (4.2) muestra los datos del campo magnético registrados por Polar a bajas latitudes del Magnetic Field Experiment (MFE). Se observan claras oscilaciones bipolares,

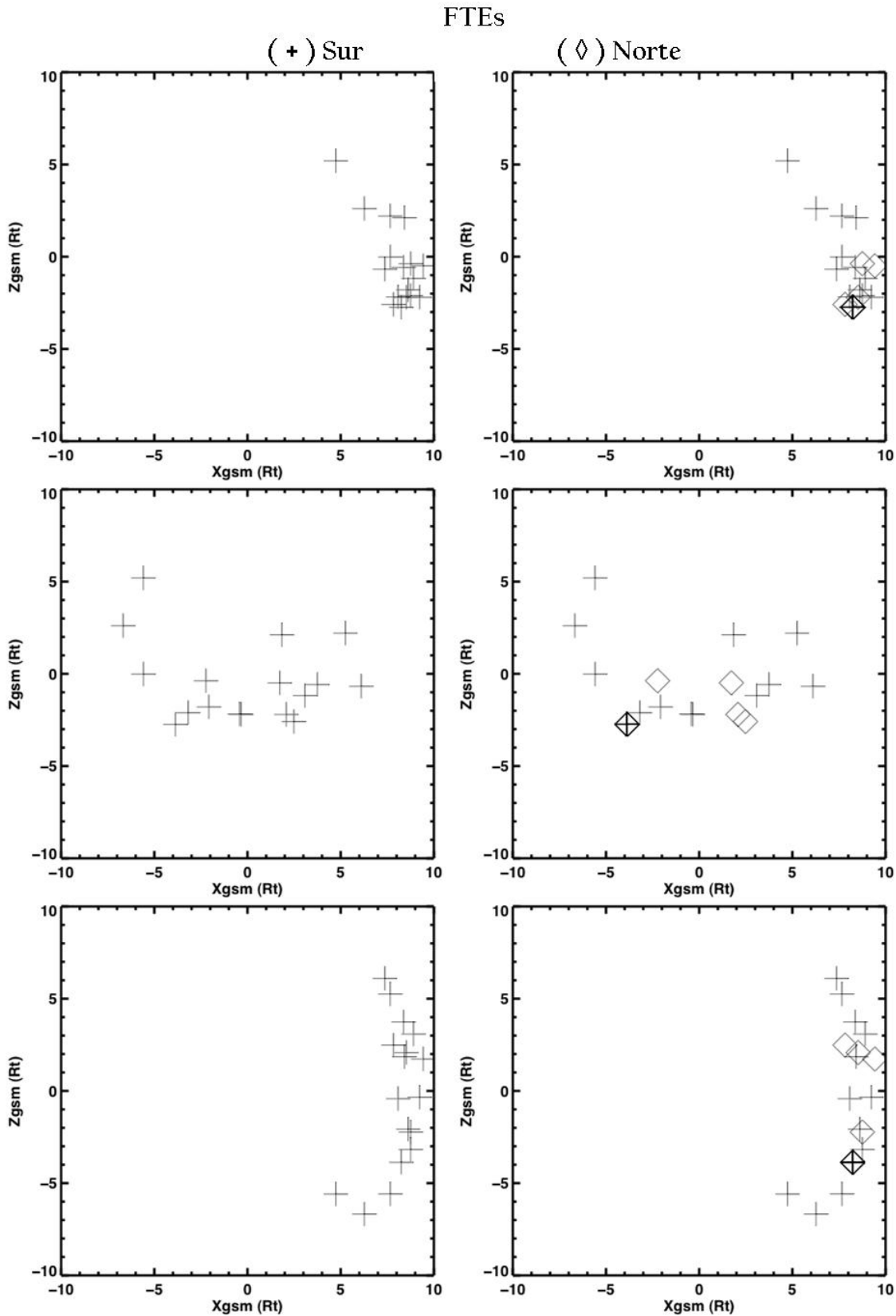


Figura 4.1: Distribución espacial de los FTEs múltiples y su división por polaridad del campo magnético interplanetario observado por ACE. Con rombos se indica la polaridad norte y con cruces los que tienen polaridad sur.

marcadas con recuadros punteados, a lo largo del día. Sin embargo, a las $\sim 12:59$ se observa la oscilación bipolar con mayor amplitud en la componente normal (~ 115 nT), aumento en la magnitud del campo, polaridad reversa y en la componente l muestra también una marcada oscilación bipolar, a este FTE lo llamaré principal. Es notorio que la distancia pico a pico en la componente normal a la magnetopasa en nT va disminuyendo conforme los FTEs se alejan del FTE principal. En este día, todos los FTE presentan polaridad reversa, lo que nos habla de tubos moviéndose hacia el sur.

Durante este intervalo de tiempo ACE se encuentra a ~ 226.7 Re y coordenadas 223.5 en x , -37.7 en y y 5.9 en z , en coordenadas GSM. El campo magnético interplanetario, representado en la figura (4.3) en el segundo panel, muestra una componente z muy perturbada con rotaciones continuas norte y sur. Marcado con una línea vertical discontinua verde está el FTE. Dada esta variación y la distancia a la que se encuentra ACE, es difícil ubicar la parcela de viento solar que pueda producir cada FTE, pero se puede hablar de un día con frecuentes momentos de reconexión ó reconexión intermitente y en el punto subsolar simplemente suponer que la componente z del campo interplanetario está fluctuando entre el norte y el sur. En algunos días la posición de la nave que observa el viento solar (ACE) coincide en longitud con la nave que observa los FTEs (Polar o Cluster); sin embargo existen casos en los que ACE se encuentra a longitudes altas y Polar a bajas o al revés, es en estos casos donde resulta difícil asociar la parcela de viento solar con la zona de reconexión.

En todos los casos en los que tengo varios FTEs seguidos uno de otro, las medidas de ACE de la componente z del campo magnético presenta fuertes oscilaciones en las cuales resulta difícil asociar la parcela del viento solar que produce los eventos de transferencia de flujo, también β oscila fuertemente.

En la figura (4.4) únicamente se muestran las características de polaridad de los FTEs para este conjunto, N-S representa un FTE con oscilación bipolar primero negativa y después positiva. En la tabla se puede observar la dirección de oscilación del FTE y si hay regiones con perturbaciones aledañas (Oa), durante el FTE (Od) y /o lejanas (Ondas n). En algunos casos se encuentra también si los FTEs están en la funda (F), en la magnetosfera (M) y en la región entre la funda y la magnetosfera a la cual se llamó región de transición (RT).

4.2. FTES múltiples + perturbaciones aledañas + perturbaciones lejanas

Esta es la sección en donde se encuentran los eventos con el mayor número de perturbaciones y eventos de transferencia de flujo, los eventos que tienen varios FTEs con perturbaciones cercanas (antes, durante o después del FTE) y con oscilaciones como ondas lejanas. Probablemente estos sean los ejemplos más complejos y de los que podamos aprender más; desgraciadamente también son los más escasos. El ejemplo característico es el del día 18 de febrero del 2003, el cual, en las medidas de campo magnético en Polar muestra como en 20 minutos puede presentarse más de 1 FTE y contar con estructuras aledañas (antes, durante y después de la oscilación bipolar pronunciada) y lejanas (4.5).

Las medidas del campo magnético de Polar (figura 4.5) muestran un día muy perturbado en las altas frecuencias y con estructuras características de FTE de gran amplitud. Con dos rectángulos rojos discontinuos se han encerrando 2 FTEs, el primero con estructuras aledañas

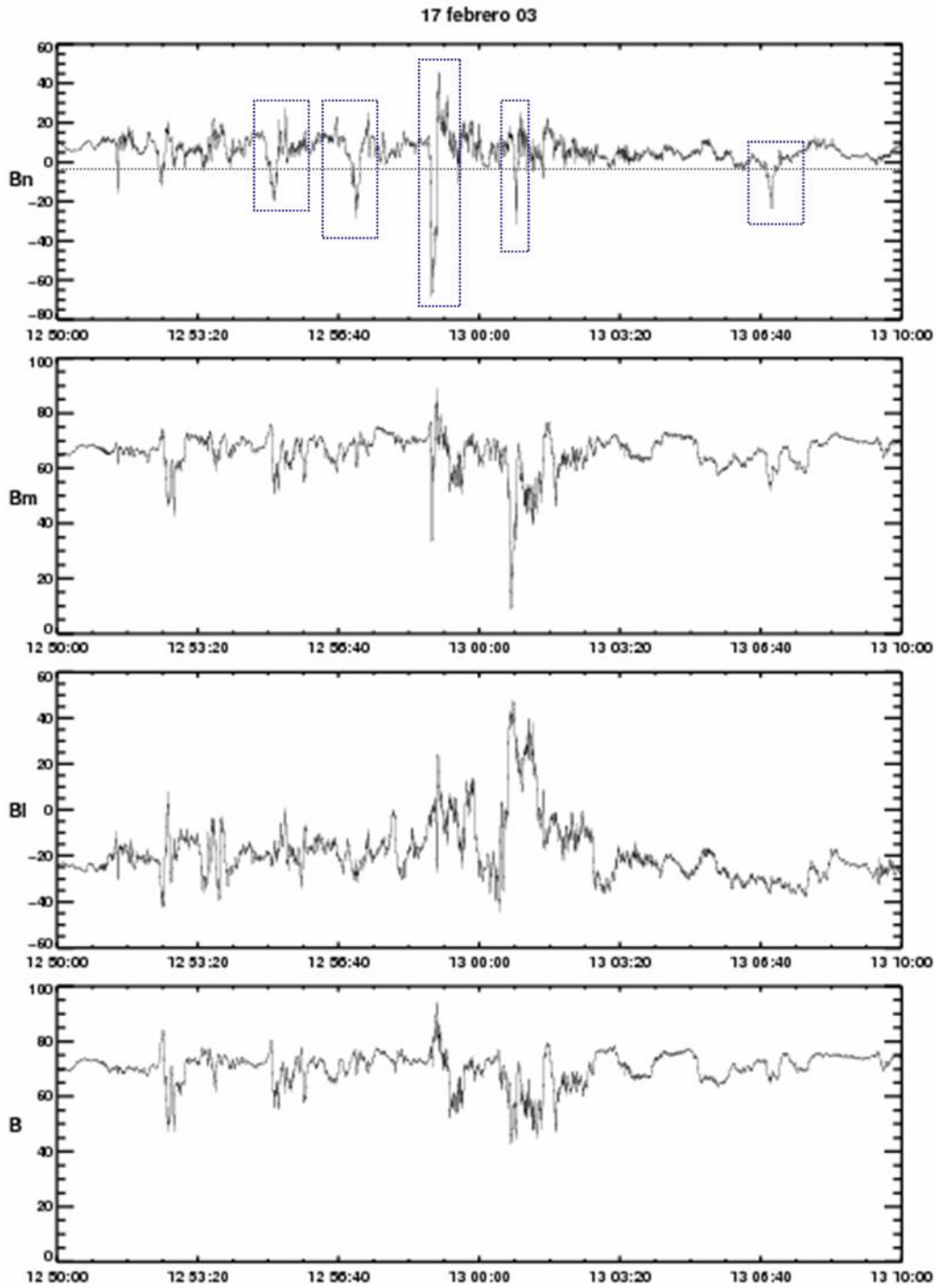


Figura 4.2: 17 de febrero del 2003 / Medidas del Campo magnético (MFE) de Polar. Entre cada recuadro punteado se encuentra un FTE

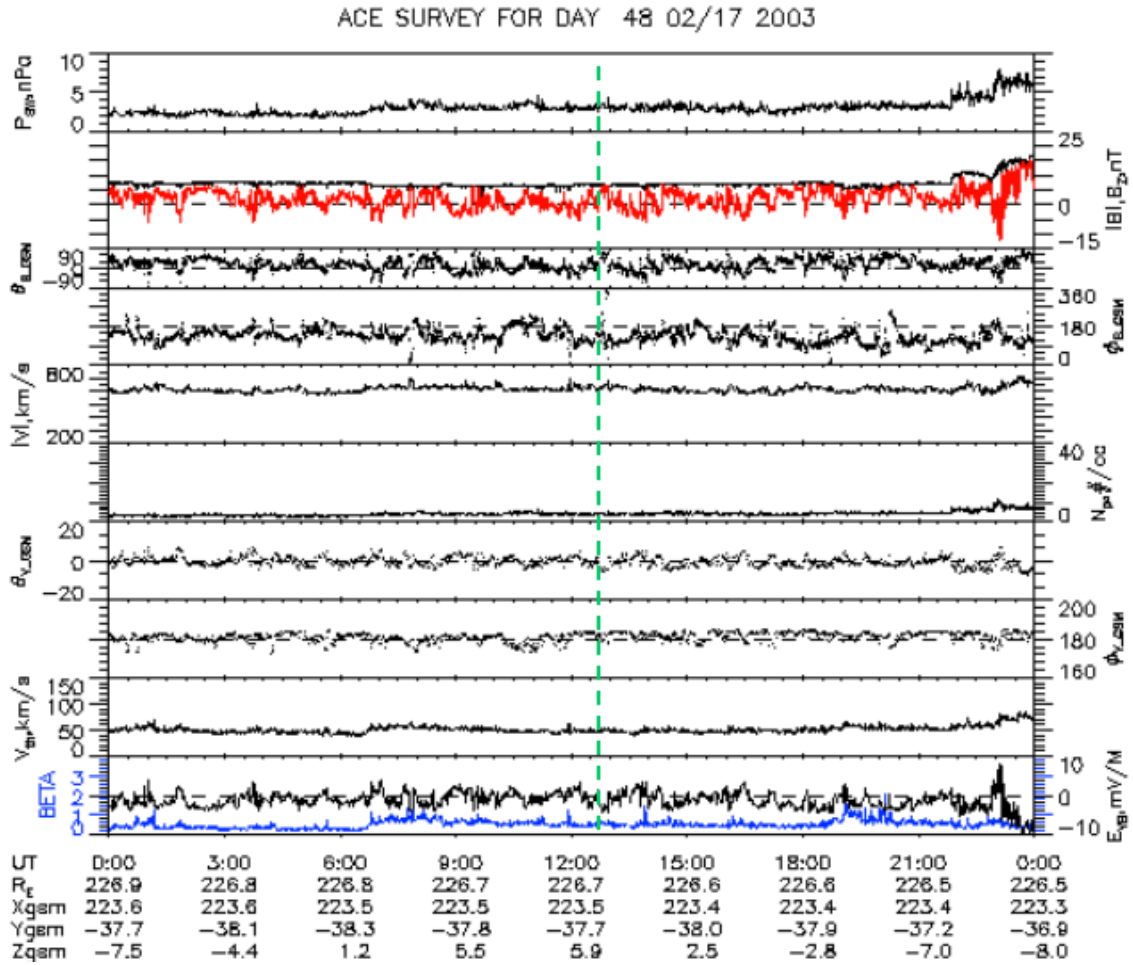


Figura 4.3: Medidas del campo interplanetario / ACE 17 de febrero 2003 FTES múltiples

(FTE I con perturbaciones, antes, durante y después) y el segundo (FTE II) con la misma oscilación N-S pero más pequeña. A lo largo del día hay más oscilaciones caracterizables como FTE. La figura también muestra dos intervalos con ondas analizadas (los óvalos discontinuos rotulados 1 y 3).

Se analizaron las diferentes perturbaciones asociadas a este evento, en Ondas 1. En la figura (4.6) están el acercamiento a la componente normal del campo magnético (a), el hodograma tratando de mostrar sólo una rotación de estas ondas (b) y las representaciones gráficas del poder espectral de la componente transversal (línea punteada) y la compresiva (línea continua) obtenido por FFT (c) y máxima entropía (d). Este intervalo tiene ondas transversales izquierdas elípticamente polarizadas con $\widehat{KB}o = 20^\circ$ ó $\widehat{IB}o = 86^\circ$, un error de $\Delta\theta_{kB} = 0,05^\circ$ y picos transversales en los dos poderes espectrales. Dado que el ángulo de propagación es cercano al campo magnético ambiente y que las fluctuaciones son transversales con polarización elíptica, podría pensarse que se trata de ondas ión ciclotrón.

El óvalo punteado numerado 3 en la figura (4.5) está representado en la figura llamada Ondas 2, figura (4.7), en donde se muestran ondas con polarización elíptica con forma irregular,

FTEs múltiples						
Fecha	Región	Polaridad		Fecha	Región	Polaridad
14-Jun-00	FTE 1	S-N		14-Feb-03	FTE1	N-S
	FTE 2	N-S			FTE 2	S
	FTE 3	N-S			Ondas	
	FTE 4	N-S			FTE 3	S-N
7-May-01	FTE 1	S-N de varice pasce		17-Feb-03	A2	S-N
	FTE 2	S-N			A1	S-N
	FTE 3	S-N			P	S-N
	FTE 4	S-N			D1	S-N
		FTE6	N-S		D2	S-N
		FTE 6	S-N	20-Feb-03	FTE 1	S-N
		FTE 7	S-N		FTE2	S-N
		FTE 8	N-S		O. Aledañas	
	FTE 1	S-N B'	FTE-P		S-N	
22-May-01	FTE 2	N-S D		FTE3	N-S	
	Oa			FTE4	N-S	
24-Mar-02	FTE1	S-N		Ondas d		
	Ondas int		28-Feb-03	Ondas i1		
	FTE2	S-N		Ondas i2		
Ondas d		FTE 1		N-S		
2-Apr-02	FTE 1	N-S		FTE 2	N-S	
	FTE 2	N-S	1-Mar-03	FTE 1	N-S (M)	
	FTE 3	S-N		Ondas int (BT)		
	FTE 4	N-S		FTE 2	S-N (f B')	
	FTE 6	S-N		FTE 3	S-N (f)	
FTE 1	FTE de varios pasce	13-Mar-03		FTE 1	S-N	
Ondas 1			Ondas a-2			
Ondas 2			FTE 2-P	S-N con estructura		
Oa			Ondas d-2			
FTE 2	S-N		FTE 3	S-N		
	Od		Ondas d-3			
	FTE 3	N-S	Ondas d			
29-Jan-03	FTE1	S-N (M)	28-Mar-03	FTE 1	N-S (B B')	
	OdFTE1			FTE2	N-S (DB')	
	FTE 2	S-N (M)		FTE -P	S-N	
	O2-3		FTE 3	S-N		
	FTE 3-P	S-N (BT)	2-Apr-03	FTE 1	S-N (BT)	
	OdFTE3			FTE 2	S-N (BT)	
FTE 4	S-N(f)	FTE 3		S-N (BT)		
	Ondas L d	9-Apr-03	Ondas antes			
3-Feb-03	FTE1		S-N (f)	FTE 1	N-S	
	FTE 2		N-S (f)	FTE 2	S-N (BB')	
	FTE 3	N-S (f)	Ondas d			
12-Feb-03	FTE1	B' (BT)	Ondas 1			
	FTE 2	D' (BT)				
	Antes o durante					
	Después (f)					
	FTE 3	A (f)				

Figura 4.4: Características de los FTEs y perturbaciones aledañas y/o lejanas, para los eventos con muchos FTEs seguidos

4.2. FTES MÚLTIPLES + PERTURBACIONES ALEDAÑAS + PERTURBACIONES LEJANAS51

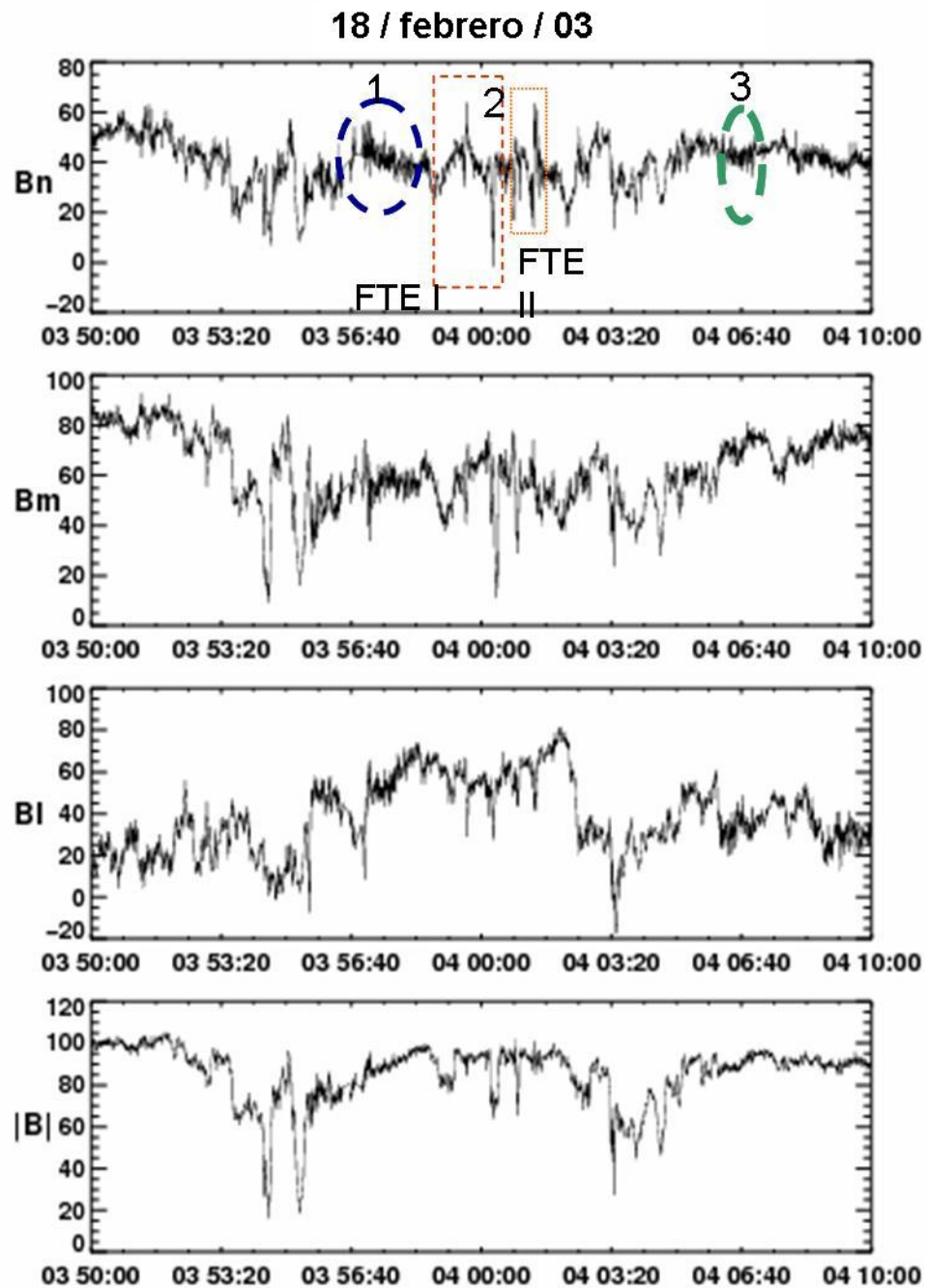


Figura 4.5: FTES múltiples (FTE I y II) + perturbaciones aledañas (cerca de FTE I) + perturbaciones lejanas (ondas 1 y 2)

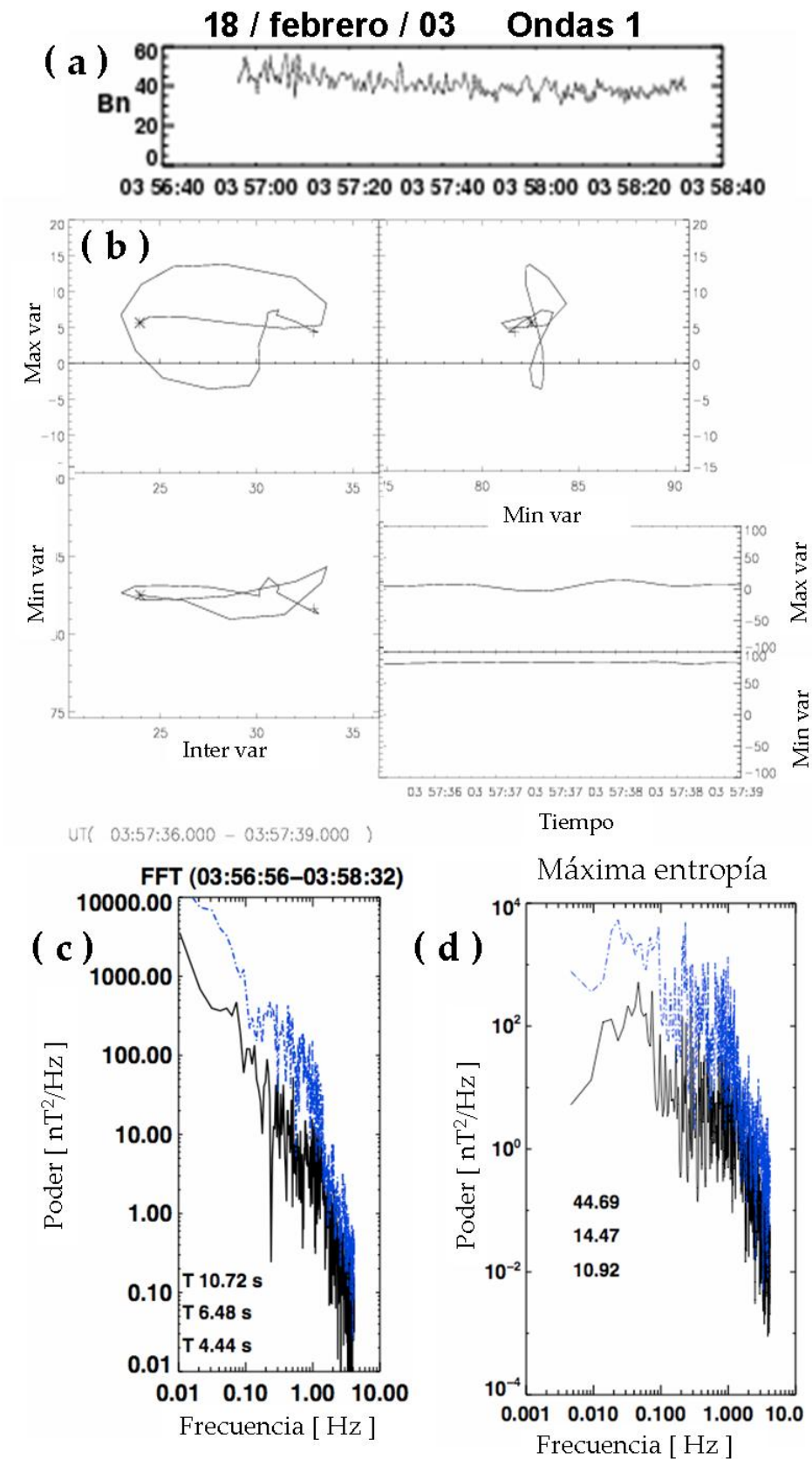


Figura 4.6: Ondas 1, 18 febrero 2003 (a) Componente normal del campo magnético, (b) Mínima varianza, (c) FFT, componente tansversal (línea punteada), compresiva (línea continua) y (d) Máxima entropía

transversales izquierdas con $\widehat{KBo} = 2^\circ$ é $\widehat{IBo} = 91^\circ$ y picos transversales en Fourier de 2.44, 4.11 y 7.23 segundos.

A partir de un conjunto de FTEs ubicados en diferentes lugares de la magnetofunda y de la magnetosfera se hizo el análisis de las perturbaciones encontradas. En el subconjunto que forman los eventos con más de un FTE en un intervalo de al menos 20 minutos se encontró, como se esperaba, fluctuaciones del campo magnético tipo ondas cerca y también a la distancia de los eventos de transferencia de flujo. Las ondas halladas son casi lineales compresivas tipo espejo y transversales circulares o elípticas casi todas derechas tipo magnetosónicas derechas.

La figura (4.8) representa los porcentajes en la taxonomía realizada a todos los eventos de transferencia de flujo. El 39 % de los casos los FTEs presentan ondas aledañas, perturbaciones antes, durante o después del evento de transferencia, 37 % de los casos son eventos con más de un FTE, el 17 % tienen FTEs con ondas a lo más a 20 minutos de distancia y sólo el 7 % de todos los eventos tiene todas las características taxonómicas, ondas dentro, antes o después del FTE, a la distancia y más de un FTE. Las perturbaciones en los alrededores del FTE o dentro de sí mismos fueron analizadas con los métodos de FFT y variación mínima descritos en el capítulo (A). Encontré diferentes ondas tipo espejo, ión ciclotrón y magnetosónicas.

Es notable que más de la mitad de los FTEs (el 63 %) presentan perturbaciones tipo ondas ya sea contiguas al fenómeno o distantes. El análisis de las perturbaciones cerca de los FTEs nos hace pensar en que cerca de los eventos de transferencia de flujo el plasma está perturbado con anisotropías $T_{per}/T_{par} > 1$ en la temperatura. Logramos identificar algunos modos característicos como el tipo espejo, ondas ión ciclotrón y magnetosónicas, aunque al carecer de los datos del plasma la caracterización de las ondas no está completa, en particular para el modo espejo sería necesario observar la anticorrelación de la densidad y el campo en los intervalos analizados.

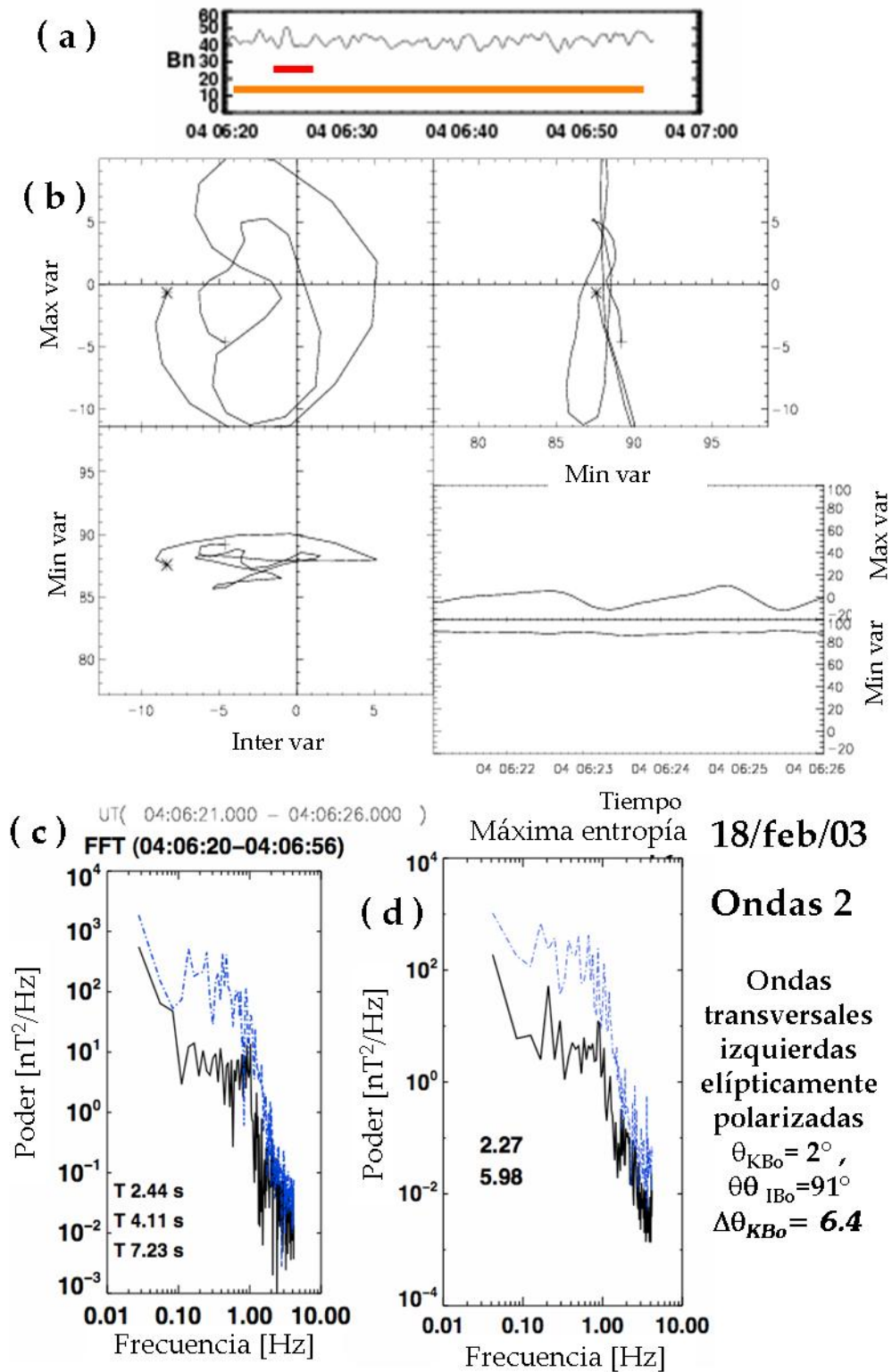


Figura 4.7: Ondas 2, 18 febrero 2003, (a) Zoom a la componente n del campo magnético, (b) hodograma, (c) espectro de Fourier, componente transversal (línea punteada), componente compresiva (línea continua), y (d) Métodos de Máxima Entropía

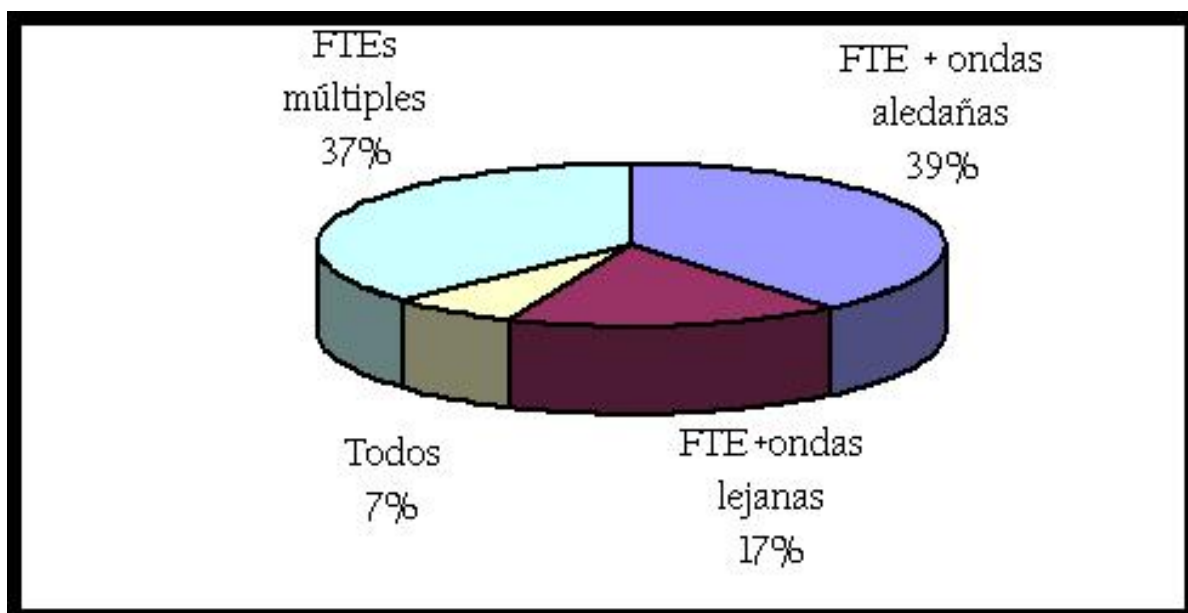


Figura 4.8: Los porcentajes de los FTEs y su formas.

Capítulo 5

Distribución espacial, viento solar y FTEs

Introducción

En este capítulo se exponen las diferentes características de los FTEs (polaridad, duración, amplitud y ubicación espacial) y sus correlaciones con parámetros del viento solar (el campo eléctrico convectivo, los valores de B_z , la presión dinámica y los ángulos cone y clock).

5.1. Ubicación de los FTEs

La distribución espacial de los FTEs de nuestro estudio se muestra en la figura (5.1). Del lado izquierdo de la figura se muestra la distribución de los 54 FTEs analizados en una región de 20 radios terrestres (r_T). Del lado derecho se ilustran las líneas de fuerza del campo magnético terrestre aproximadas por el modelo T96 [Tsyganenko et al, 1995] de -20 a 20 r_T y en un recuadro punteado la región analizada. En el plano meridional de medio día XZ podemos notar que tenemos FTEs de bajas, medias y altas latitudes localizados en la magnetosfera y en la magnetofunda. La distribución longitudinal, plano YZ muestra un amplio espectro, permitiendo pensar que tenemos FTEs cerca de los cusp (o conos polares) y de la plasmaesfera o de la región de los cinturones. El plano ecuatorial se representa en el plano XY, la distribución de los FTEs es mayor cerca del punto subsolar pero se extiende a lo largo de -10 a 10 r_T en Y. Pareciera como si los FTEs estuvieran cerca de la magnetopausa.

La figura (5.2) muestra la ubicación de los FTEs dependiendo de la latitud a la que se encuentren. En el primer recuadro, el plano XZ, están clasificados como FTEs de latitudes bajas aquellos que se encuentren entre -1.5 y 1.5 r_T (cuadrados), de latitudes medias los que se encuentren entre -1.5 y -3 y también de 1.5 a 3 (cruces), y finalmente las latitudes altas que corresponden a las franjas de -3 a -6 y 3 a 6 (triángulos). A latitudes bajas (cuadrados) tengo a la mayoría de los FTEs cerca del punto subsolar aunque también hay 2 eventos con FTEs en la magnetosfera interna. Longitudinalmente están distribuidos de manera que abarcan casi los 20 r_T . A latitudes medias (cruces) tengo eventos con FTEs cerca de la magnetopausa, en la magnetofunda y en ambas cuñas polares. Longitudinalmente abarcan casi los 20 r_T , pero más cercano al lado día tengo menos eventos. A latitudes altas (triángulos) hay eventos con

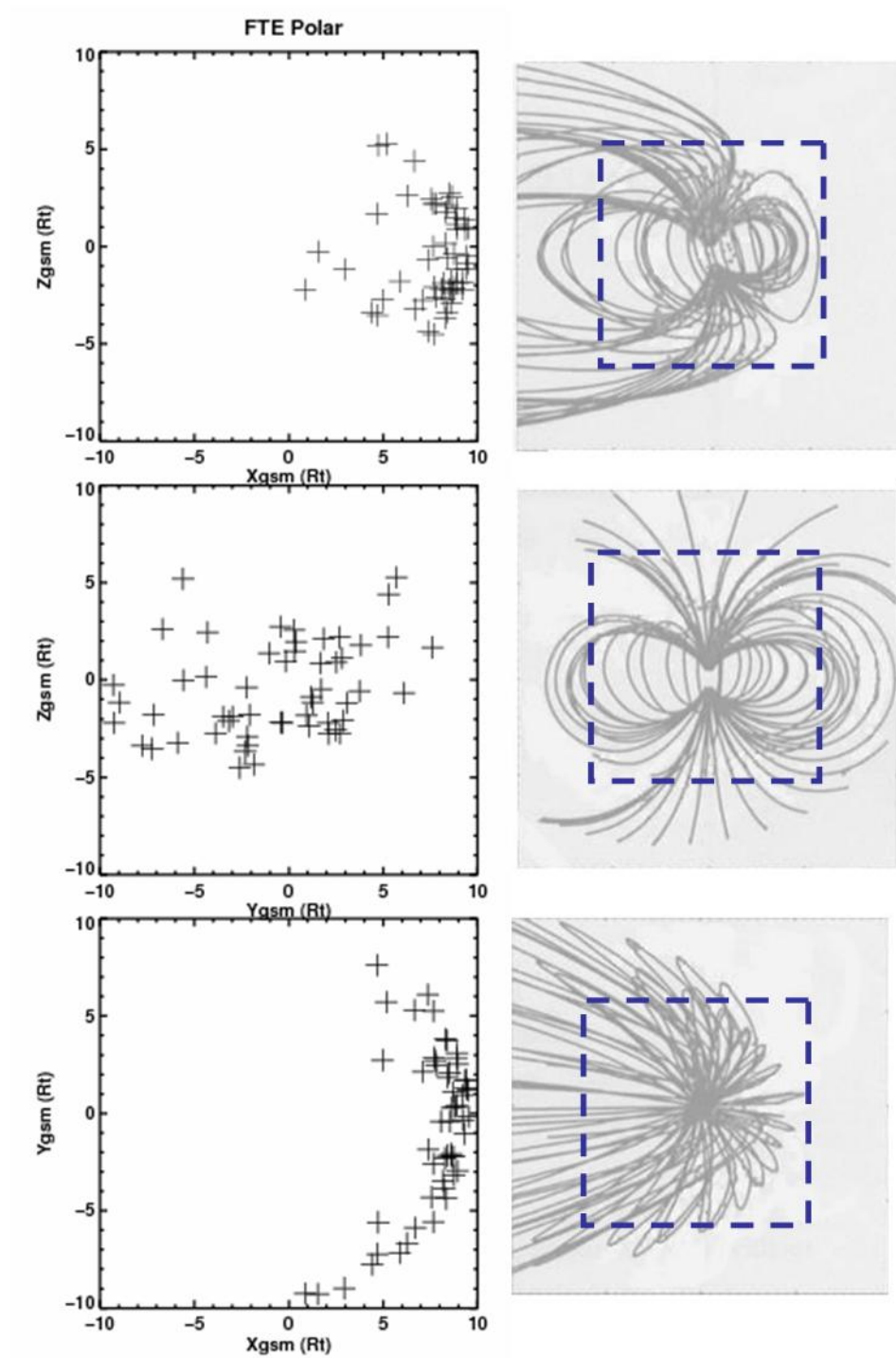


Figura 5.1: (izq) Ubicación de los FTE vistos por Polar en coordenadas GSM (geocentric solar magnetospheric coordinates, con el eje x dirigido al Sol, z en dirección del dipolo y el eje y completa la triada), (der) modelo T96 [Tsyganenko et al, 1995].

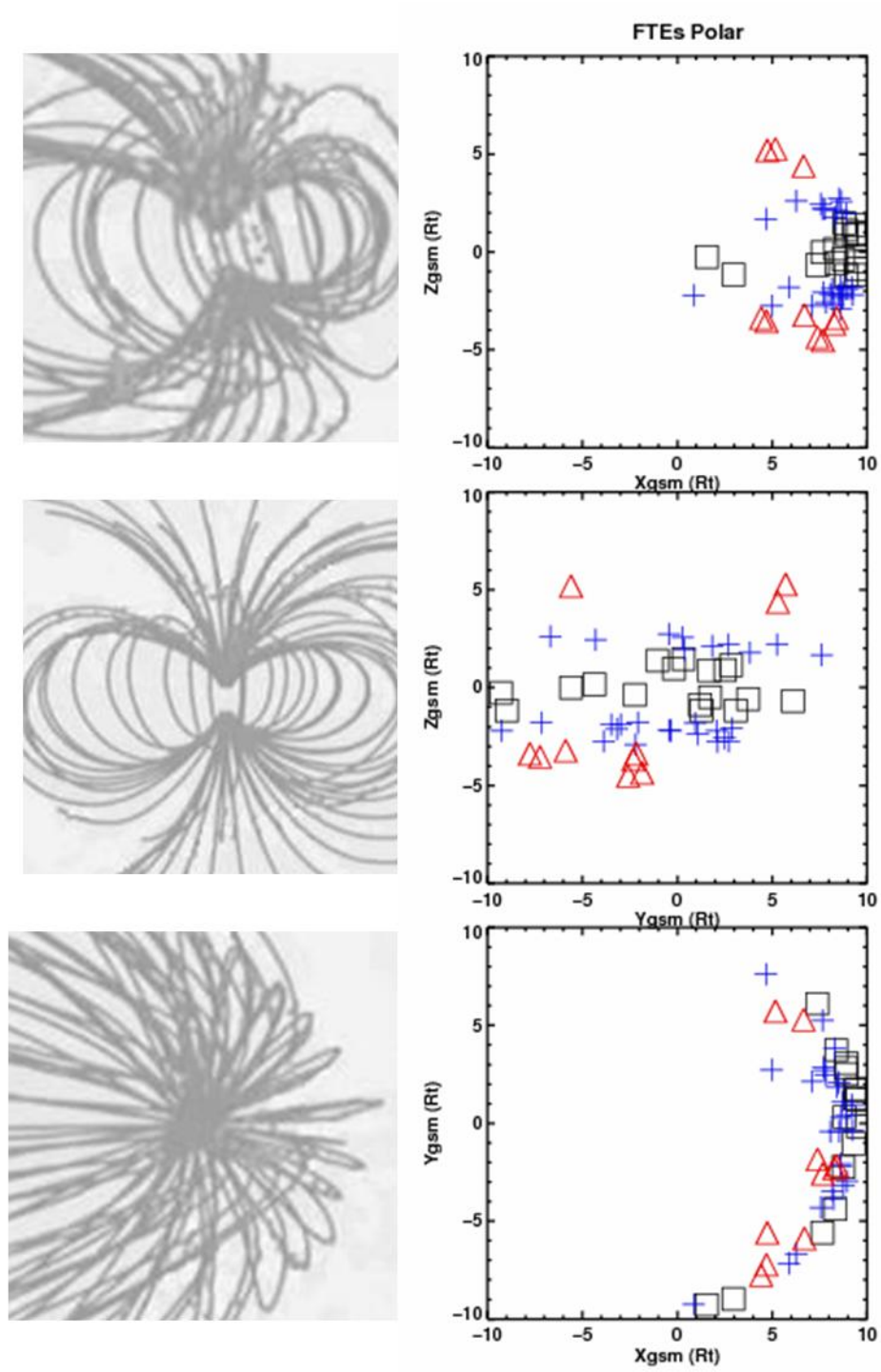


Figura 5.2: División de los FTES por latitudes: (cuadrado) latitudes bajas, (cruz) latitudes medias, (triángulo) latitudes altas

FTEs en la magnetopausa, en la funda y en la magnetosfera interna a latitudes de 3 a 6 r_T . Longitudinalmente la mayoría de los eventos están cerca del lado noche. Es interesante notar como en el plano ecuatorial XY los FTEs de bajas latitudes forman la frontera entre la influencia del Sol y la de la Tierra, ie., mapean la magnetopausa.

5.2. Características del viento solar y los FTEs

Dada la importancia de las características del campo magnético interplanetario (CMI) en la reconexión magnética, y por lo mismo en los FTEs, se dedica toda una sección para analizar los diferentes parámetros del viento solar y compararlos con algunos de los FTEs. Para ello, tomamos datos de ACE correspondientes al mismo intervalo de tiempo que los FTEs observados por Polar; dependiendo de las características del campo interplanetario tomamos un intervalo de tiempo en el cual la componente z del campo magnético tuviera un valor positivo o negativo (B_z sur o norte), de este intervalo obtuve promedios y los valores extremos de la componente z del campo magnético.

El día del evento ejemplo (23 de marzo del 2002) ACE registró los siguientes datos, figura (5.3). La figura (5.3 (a)) muestra todo un día de medidas de ACE de presión del viento solar, magnitud, componente z (nT), y ángulos del campo magnético, magnitud de la velocidad del plasma (km/s), densidad de protones, ángulos del vector velocidad, velocidad térmica (km/s), campo eléctrico (mV/m) y beta del plasma. Marcado con una línea discontinua vertical la hora aproximada del primer FTE registrado en las medidas de campo magnético de Polar. Se observa una parcela de viento solar con componente B_z sur durante casi una hora y media antes del FTE y un aumento en la beta del plasma. La parte (b de (5.3)) es un zoom de dos horas de los datos de campo magnético (10:10 - 12:25) mostrando la parcela de viento solar que se asocia al fenómeno de transferencia (marcada con un óvalo en a). Esta gráfica se obtuvo del sitio en internet de la nave ACE donde " RBx "[" nT "] = b_x/b_t . Dentro de este intervalo tomé el valor promedio de la componente z del campo (B_z pro) y el valor extremo, mínimo o máximo (B_z ext). En este caso la parcela analizada tiene una duración de cerca de una hora y media, con un valor promedio de B_z de -0.17 nT y un valor extremo B_z ext de -0.9 nT , la parcela tiene casi en su totalidad componente B_z sur. Dada la posición de la nave en el viento solar y de los valores de B_z sur, es posible asociar esta parcela de viento solar como responsable del FTE visto cerca de las 12:10 en Polar. Es interesante notar como en los datos de ACE se muestran diferentes parcelas de viento solar con componente sur y en los datos de campo magético de Polar se registran diferentes FTEs.

Para cada día se hizo un análisis similar y se encontraron algunas correlaciones lineales entre los datos del viento solar y los parámetros de duración y amplitud del los eventos de transferencia de flujo. Se correlacionó el valor de B_z promediado durante la parcela y su valor máximo ó B_z ext, el campo eléctico convectivo promedio y extremo ($\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$), la presión dinámica y los ángulos cone (el ángulo entre el vector velocidad del viento solar y el campo magnético interplanetario) y clock (el ángulo entre la orientación del campo magnético interplanetario y un plano perpendicular a la línea Sol-Tierra) contra la duración (en segundos) y la amplitud (en nT) de los FTEs.

Las correlaciones entre la duración y la amplitud de los FTEs y los parámetros del viento solar son muy pobres, como se muestra en el cuadro 5.1. Uno de los mayores problemas es la asociación entre la parcela del viento solar y el evento de transferencia de flujo; suele pasar

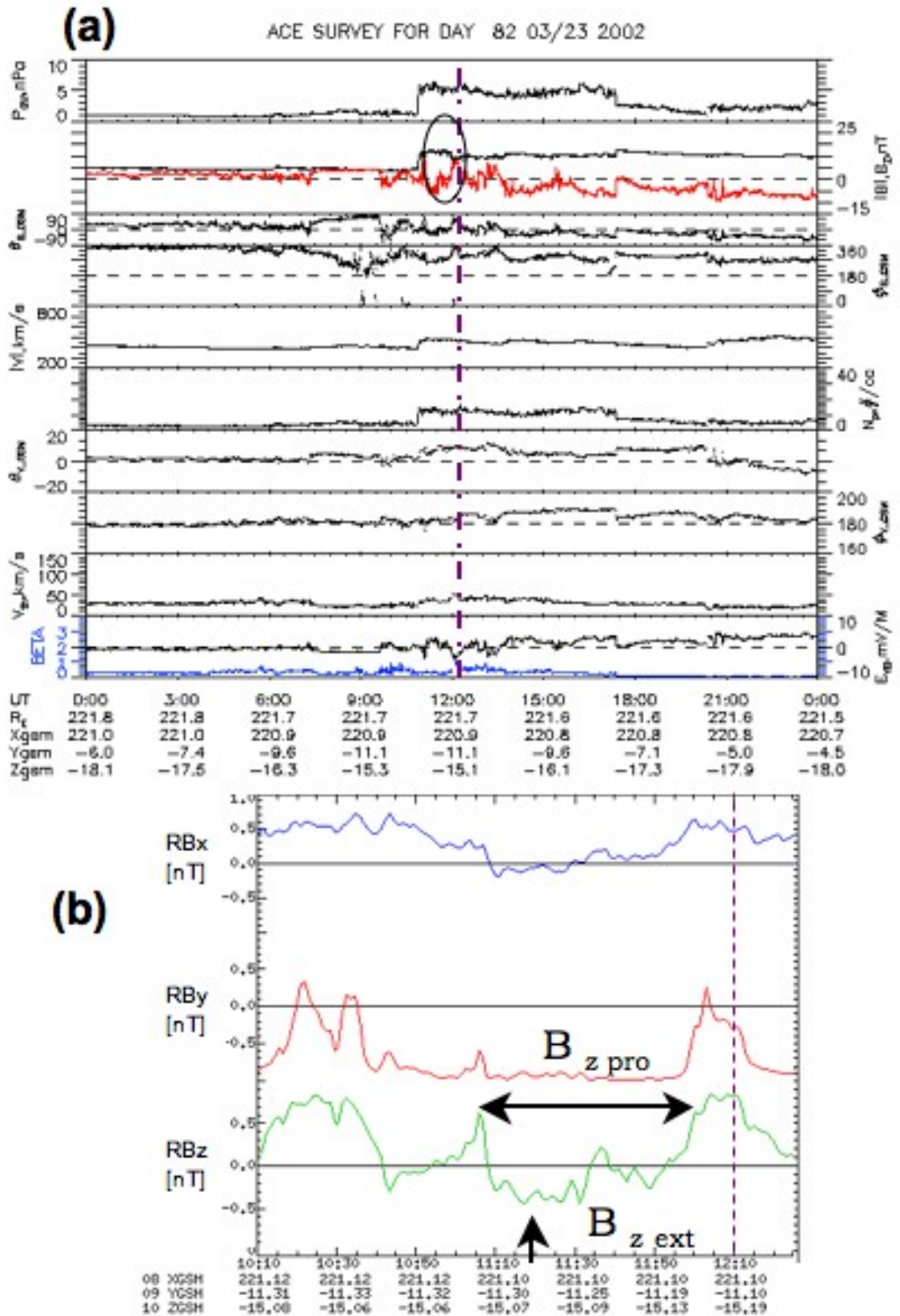


Figura 5.3: Registros de ACE para el 23 de marzo del 2002 (a) todo el día, (b) la parcela de viento solar asociada al FTE, donde "RBx" = b_x/b_t .

que la nave que proporciona los valores del campo magnético interplanetario (ACE) no se encuentra alineada con la nave en la funda o en la magnetosfera (Polar).

Cuadro 5.1: Correlaciones entre los parámetros del viento solar y los de los FTEs.

	Duración FTE [s]	Amplitud FTE [nT]
B _z pro	0.15	0.22
B _z ext	0.18	0.25
E pro	0.075	0.31
P din	-0.02	0.22
A cone	-0.08	0.09
A clock	-0.06	-0.06

En la literatura existen muchos artículos que tratan de encontrar correlaciones entre los FTEs y el viento solar, en particular Wang et al [2005] hacen una revisión de FTEs en los primeros tres años de Cluster. Encontramos similitudes en nuestro estudio, por ejemplo, a) se observan FTEs tanto a altas como a bajas latitudes, con campo magnético interplanetario sur y norte, b) se observan FTEs en la magnetofunda y en la magnetopausa, c) existe un movimiento de los FTEs, originados a bajas latitudes del lado día y encontrados después a mayores latitudes, ellos calculan el tiempo de ocurrencia entre cada FTE con un promedio de 7.09 minutos, nosotros no calculamos este parámetro para todos los casos, pero en el apartado de FTEs múltiples nos acercamos a este número. Rehacen su análisis cambiando un poco los umbrales en la definición de FTEs (por ejemplo tomando un intervalo de amplitudes menores a 10 nT o menores en duración) para demostrar que pequeños cambios en la definición de FTEs no cambian la estadística realizada.

También se pueden agrupar los FTEs dependiendo de si el campo magnético interplanetario es sur o norte. La figura (5.4) muestra la distribución espacial de los FTEs divididos en dos conjuntos, con cruces negras los FTEs que tienen B_z sur en ACE y con un rombo azul aquellos que tuvieron un valor mayor a cero en la componente zeta del campo magnético.

En esta división tengo 39 eventos con B_z sur en ACE y 15 con B_z norte, ie, el 72.22 % con B_z sur y el 27.78 % con B_z norte. La mayoría de nuestros FTEs están a bajas y medias latitudes, varios de los eventos con componente norte están cerca de los cusp y los de componente sur cerca del punto subsolar, como se esperaba, aunque tengo eventos de transferencia dentro de la magnetosfera, lo que implicaría un movimiento de los FTEs de la zona de reconexión hacia la magnetosfera interna.

Una vez dividido el conjunto con base en la polaridad que se tenga de la componente z del campo magnético interplanetario se calcularon las correlaciones lineales entre los parámetros del viento solar y de los eventos de transferencia, en el cuadro 3.2 se encuentran los valores de las correlaciones dependiendo de la polaridad del CMI.

Al dividir nuestros eventos en polaridades sur y norte se encuentra que las correlaciones son muy bajas, ie. no hay correlación aparente entre los parámetros analizados, teniendo los mejores valores con respecto a la amplitud de los FTEs, llegando a tener correlaciones del 50 % con el ángulo cone en el caso norte.

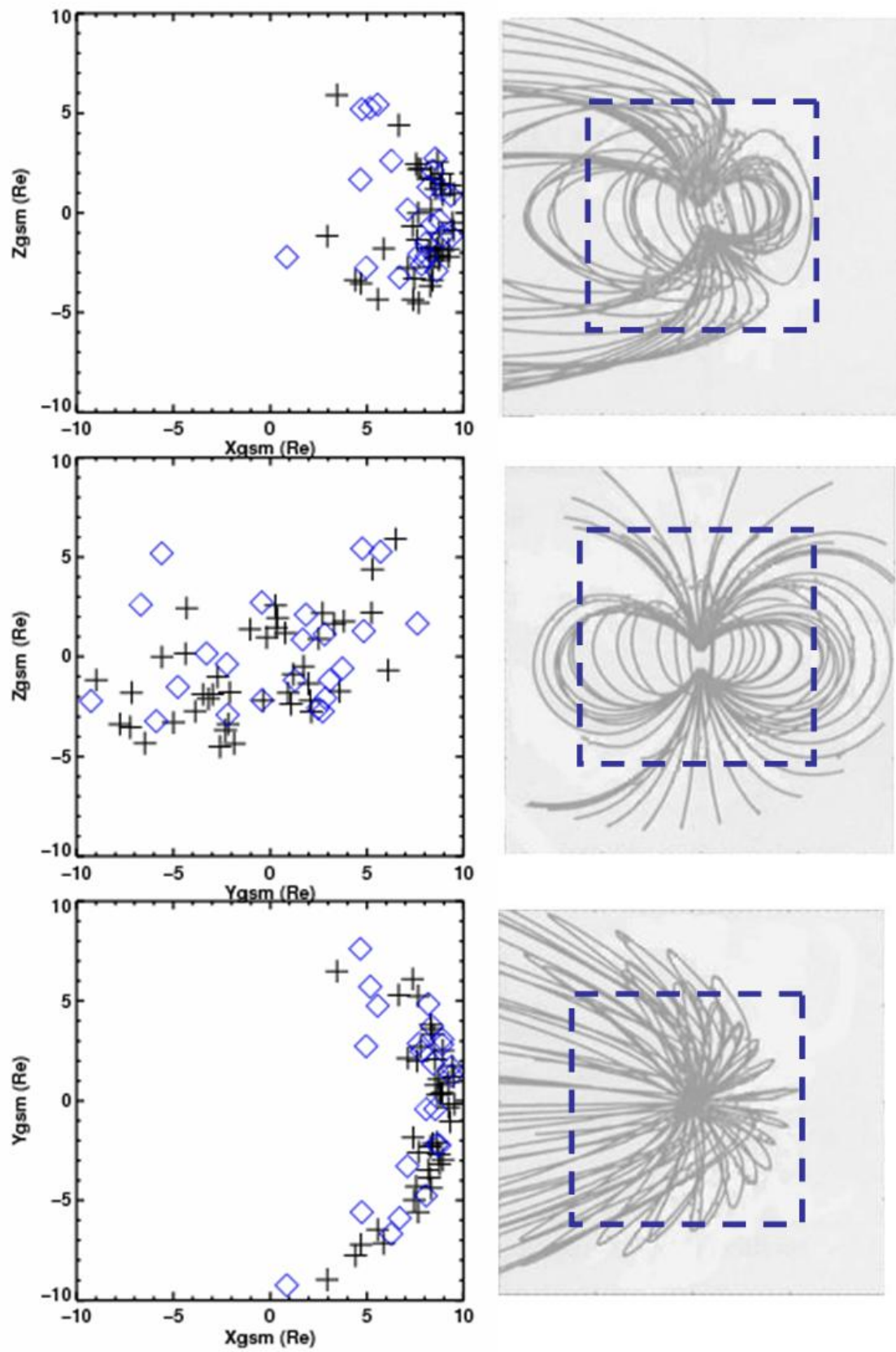


Figura 5.4: Localización de los FTES con bz sur (cruces) y norte (rombos)

Cuadro 5.2: Valores de correlaciones lineales entre los FTES y el viento solar dependiendo de la polaridad del CMI

	CMI - SUR		CMI - NORTE	
	Duración FTE [s]	Amplitud FTE [nT]	Duración FTE [s]	Amplitud FTE [nT]
B _z pro	-0.04	0.10	0.35	0.11
B _z ext	0.16	0.17	0.12	0.16
E pro	-0.12	0.23	0.16	0.26
P din	0.06	0.11	-0.29	0.38
A cone	-0.02	0.17	-0.22	0.50
A clock	-0.06	-0.06	0.15	0.35

Buscando mejores correlaciones dividí nuevamente el conjunto de 54 FTES dependiendo de su ubicación espacial (esta división es la misma que se explicó en la sección 5.1). El siguiente conjunto de gráficas (5.5 y 5.6) muestran las correlaciones entre los valores de duración y amplitud de los FTES y los parámetros del viento solar dependiendo de la latitud. Con cruces negras las latitudes bajas, con rombos rojos las medias y con cuadrados azules las altas, la ubicación espacial de este conjunto se muestra en la figura (5.2). Encontramos que los rangos en las duraciones y amplitudes de los FTES van decreciendo conforme cambia la latitud. La duración y la amplitud de los FTES disminuye a mayores latitudes, es decir, los FTES de altas latitudes tienen duraciones y amplitudes menores que a bajas latitudes. El rango para las latitudes bajas es de 0 a 400 segundos en la duración y de 0 a 200 nT en amplitud, a latitudes medias tengo de 0 a 250 s y de 0 a 150 nT y finalmente para las altas de 20 a 160 s y de 0 a 80 nT en duración y amplitud respectivamente.

Afiné más la búsqueda corriendo el riesgo de quedarme cada vez con un conjunto menor de datos y que los valores de las correlaciones comiencen a perder sentido. Ahora tomo en cuenta la ubicación espacial de los FTE (latitudes bajas, medias y altas) y también la dirección del CMI (B_z sur o norte) para calcular las correlaciones, los valores numéricos se encuentran en el cuadro 5.3. A manera de ejemplo, la figura (5.7) muestra las mejores correlaciones encontradas para latitudes bajas tomando en cuenta cuando el CMI es norte o sur. En la parte inferior derecha de la figura se muestran los valores de las correlaciones para ambas polaridades.

El cuadro 5.3 muestra los valores de las correlaciones dependiendo de la latitud y de la polaridad de B_z para todos los eventos.

A latitudes bajas las mejores correlaciones se encuentran con la amplitud del FTE. Cuando el campo magnético interplanetario tiene componente B_z sur, el lugar de la reconexión es cerca del punto subsolar, de esta forma, los FTES son creados cerca del lugar en donde los encontramos, conservando sus amplitudes reales, es decir, son fenómenos que casi no han evolucionado desde su creación, esto hace que sus características reflejen más las propiedades del viento solar.

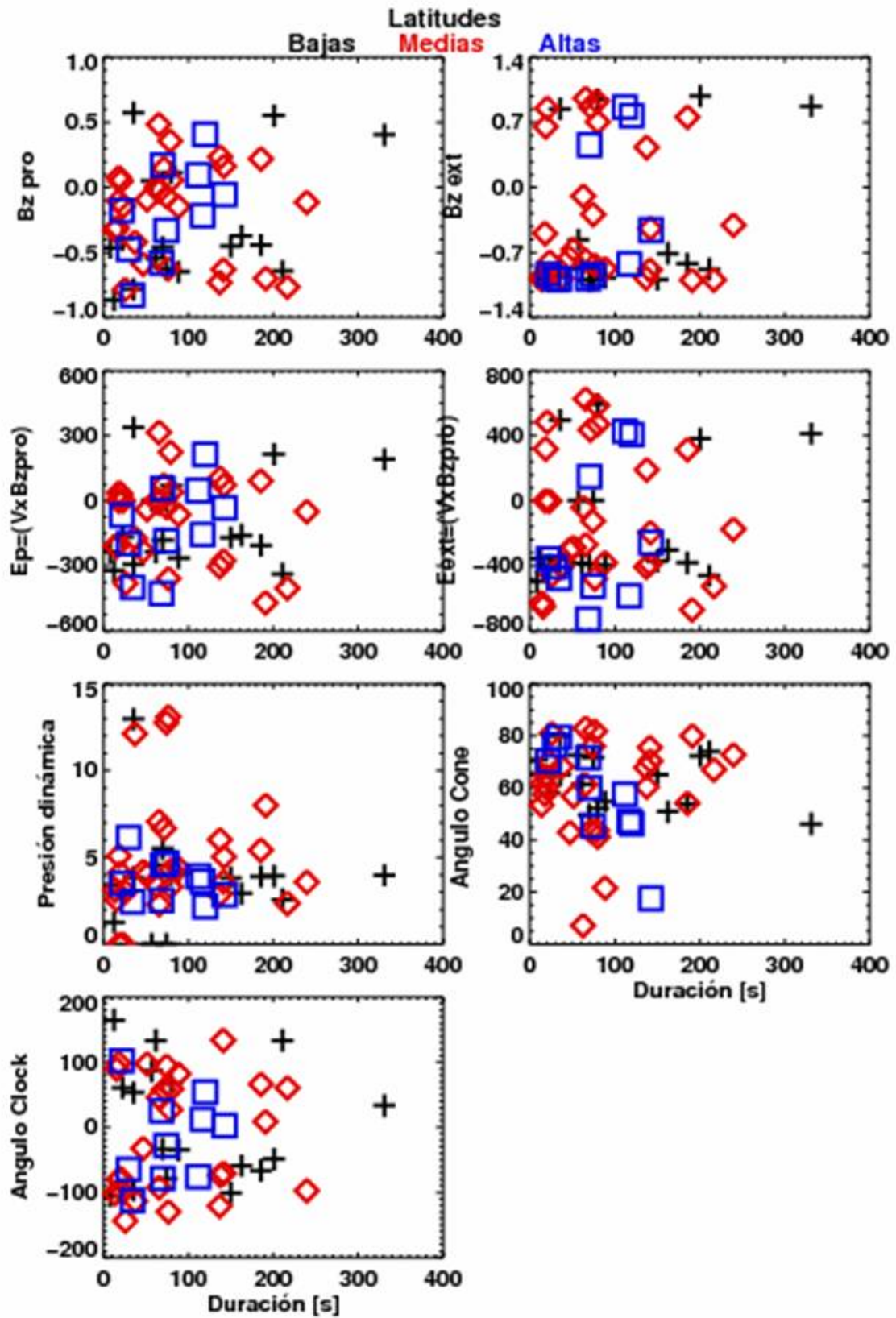


Figura 5.5: Parámetros del viento solar vs duración del FTE para diferentes latitudes. Bajas (cruces), Medias (rombos), Altas (cuadrados)

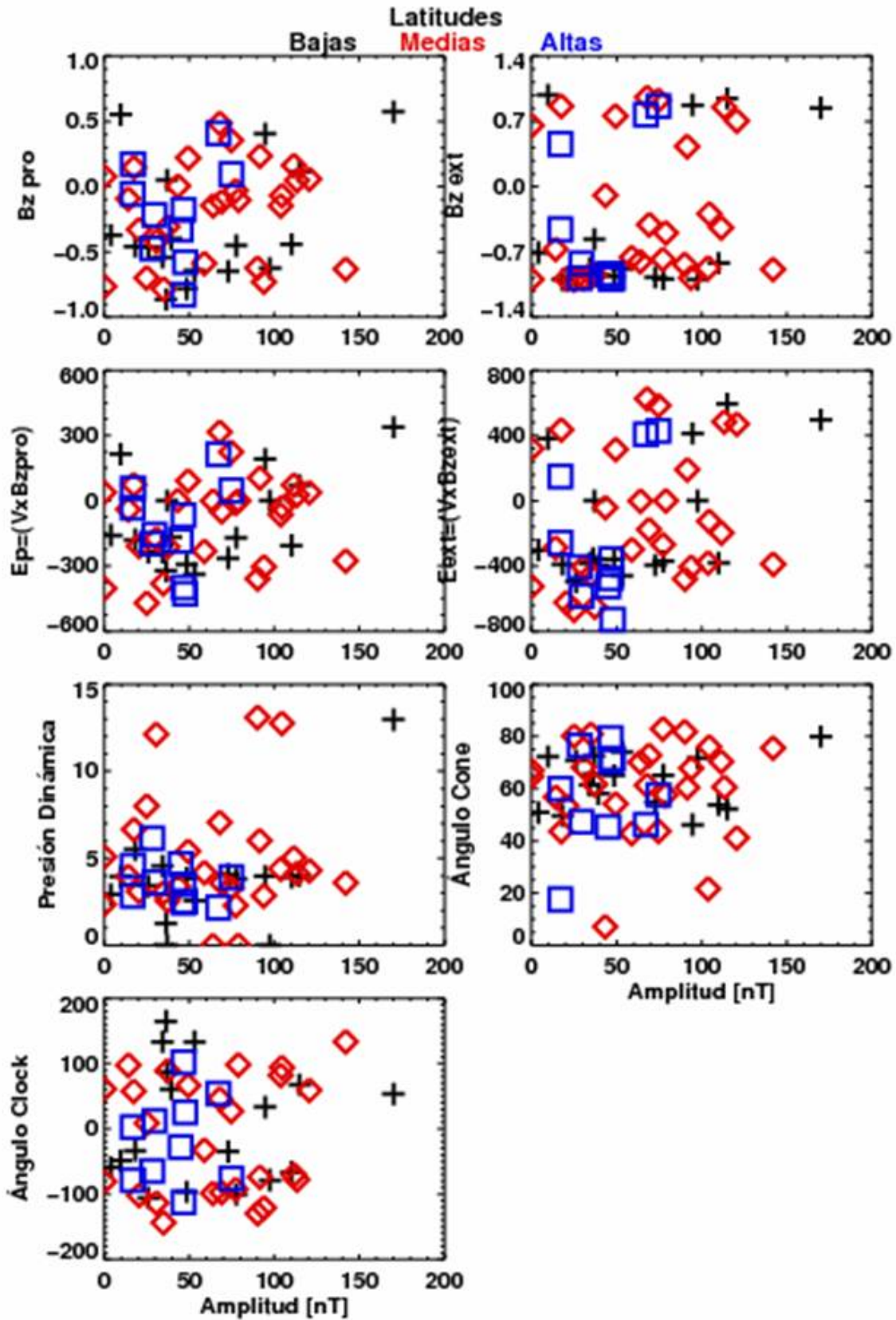


Figura 5.6: Parámetros del viento solar vs amplitud del FTE para diferentes latitudes. Bajas (cruces), Medias (rombos), Altas (cuadrados)

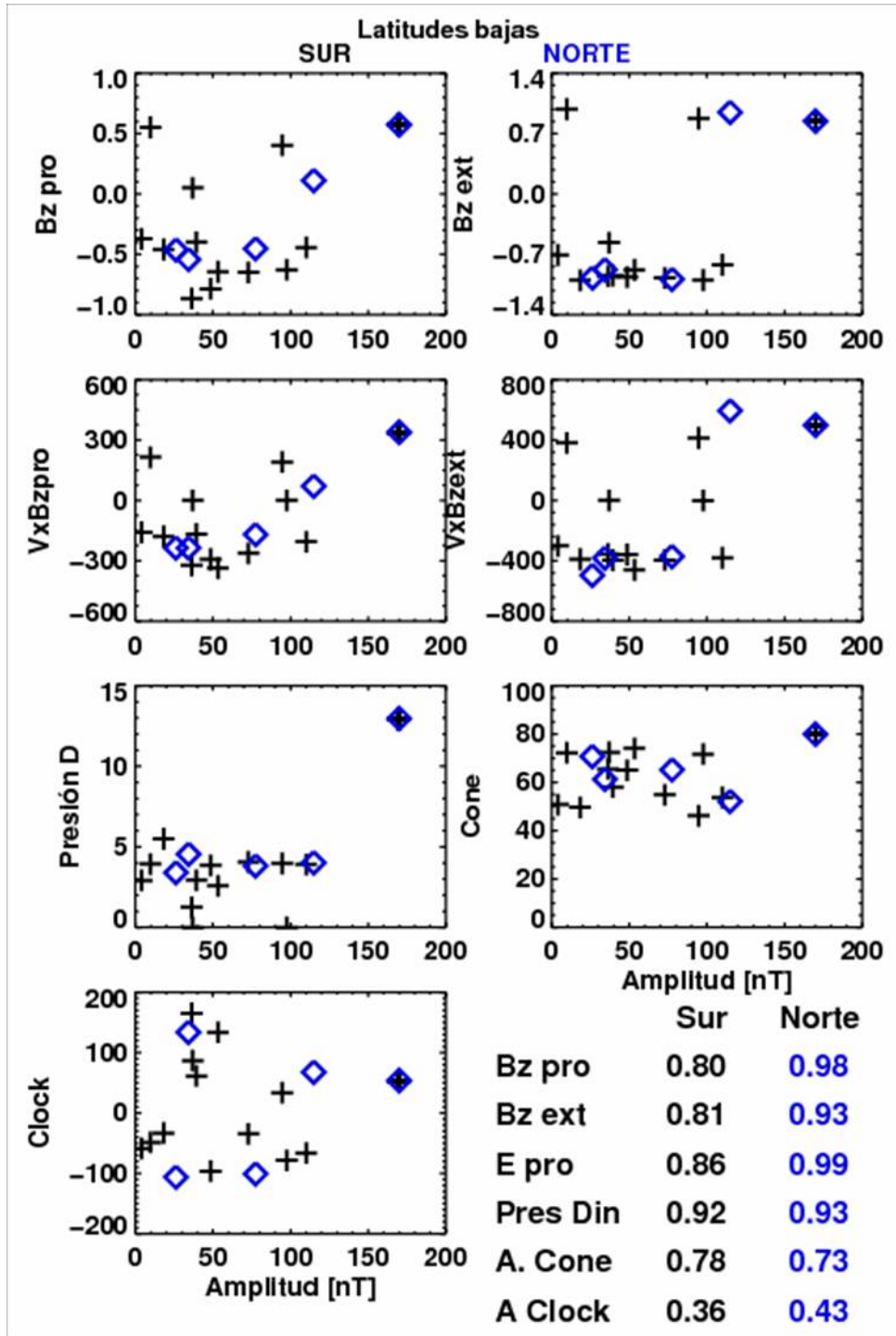


Figura 5.7: Correlaciones a latitudes bajas con componente sur y norte. Campo magnético interplanetario con componente sur (cruces), norte (rombos)

Cuadro 5.3: Tabla de correlaciones a diferentes latitudes y con polaridad sur y norte

Latitudes BAJAS (-1.5,1.5) r_T				
	Duración [s]	Duración [s]	Amplitud [nT]	Amplitud [nT]
	CMI-Sur	CMI-Norte	CMI-Sur	CMI-Norte
B _z pro	-0.29	-0.50	0.80	0.98
B _z ext	-0.24	-0.43	0.81	0.93
E pro	-0.38	-0.47	0.86	0.99
P din	-0.55	-0.54	0.92	0.93
A cone	-0.63	-0.60	0.78	0.73
A clock	-0.31	-0.30	0.36	0.43

Capítulo 6

Eventos conjuntos de Polar y Cluster

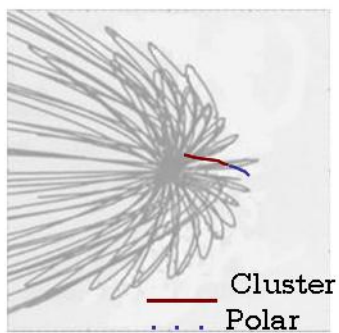
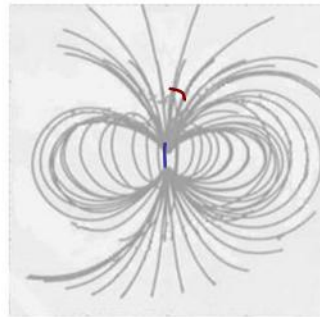
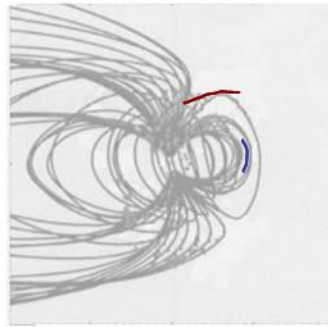
Se han analizado las características de los FTEs vistos por Polar, se han encontrado las correlaciones entre los parámetros del viento solar con los datos de la nave ACE y se han estudiado las características de las perturbaciones encontradas en los diferentes eventos. Sin embargo, la visión que tenemos del fenómeno de transferencia de flujo es completamente plana. No podemos hablar de evolución de estos tubos de flujo pues sólo tenemos información de un punto determinado del espacio-tiempo, es por ello que se necesita de la ayuda de otra nave para tener una visión con mayores dimensiones. Actualmente existe una misión que consiste en más de una nave registrando los valores del plasma al mismo tiempo, Cluster, así que se hará una comparación entre los datos de Cluster y Polar para probar si los FTEs son eventos que pueden seguirse de una nave a otra, o si existen perturbaciones en el plasma que podamos inferir su evolución a partir de los registros de diferentes naves.

6.1. Altas y bajas latitudes

El 21 de marzo del 2002 es uno de los eventos analizados cuando Polar se encontraba muy cerca del punto subsolar a muy bajas latitudes, en la magnetofunda cerca de la magnetopausa ecuatorial moviéndose del hemisferio sur al norte, la figura (6.1) muestra con una línea discontinua y azul la posición de Polar para este día. Del análisis realizado a los FTEs sé que este día está caracterizado como un evento de FTE+ondas adyacentes. Por otro lado, este mismo día Cluster se encontraba a altas latitudes cerca del cusp, moviéndose del polar cusp a la magnetofunda, como lo muestra la línea continua y roja en la figura (6.1)

De los datos de campo magnético obtenidos por la nave Polar se puede observar claramente un FTE bastante grande en amplitud y duración, ver figura (6.2), de hecho, en la literatura no hay un artículo con un FTE tan grande. Con un rectángulo de color se muestra la duración del FTE con perturbaciones antes y después; las líneas punteadas marcan el centro de la oscilación o núcleo del FTE. La oscilación bipolar está acompañada de un acrecentamiento de la componente total del campo y oscilaciones en las otras componentes, claras características de los eventos de transferencia de flujo.

Se analizaron las perturbaciones antes y después pero cerca del FTE. Las figuras (6.3) y



Modelo T96 [Tsyganenko, 1995]

Figura 6.1: Ubicación de las naves el 21 de marzo del 2002

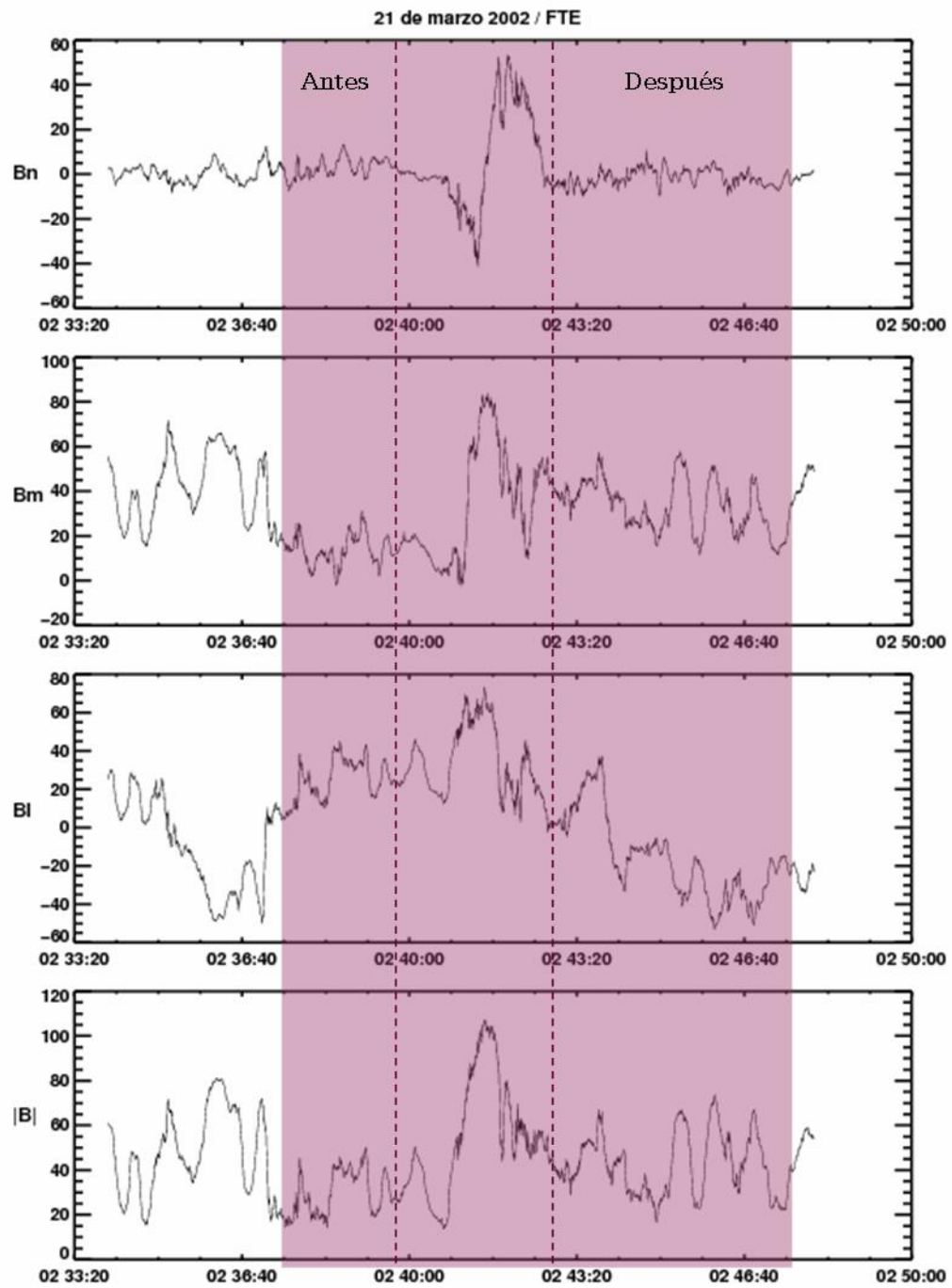


Figura 6.2: FTE en coordenadas NLM observado por la nave Polar el día 21 de marzo del 2002

(6.4) muestran los acercamientos a las perturbaciones, los hodogramas y el espectro de poder de la componente transversal (línea discontinua) y compresional (línea continua). Antes del FTE las perturbaciones son compresivas con rotación irregular con un ángulo entre el vector de propagación y el campo magnético promedio de 90° , con un error de $\Delta\theta_{kB} = 2.23^\circ$. Después del FTE las perturbaciones son compresivas derechas y el ángulo que se forma es de 78° con error $\Delta\theta_{kB} = 1.4^\circ$. En este caso la rotación también es irregular. Por las características encontradas puede tratarse de ondas magnetosónicas derechas.

A mayores latitudes Cluster (yendo del cusp a la funda) observa una oscilación bipolar del campo magnético aproximadamente 2 minutos después que Polar. La figura (6.5) muestra la comparación de las medidas del campo magnético para Polar y Cluster. El FTE observado por Polar es una oscilación bipolar grande en duración y amplitud, el centro del FTE se muestra con un línea vertical roja. Dado que la nave se encuentra cerca del punto subsolar los campos se dan en el sistema de coordenadas NLM. Los datos de campo magnético de Cluster muestra una oscilación a las 02:43:20 marcada con una línea vertical azul discontinua, como la nave está lejos del punto subsolar es difícil encontrar la normal a la magnetopausa para hacer el campo de coordenadas a NLM, es por ello que para Cluster las componentes del campo se muestran en coordenadas GSM. La oscilación tiene polarización S-N como en Polar en la componente n pero no es una oscilación bipolar tan clara. El tiempo de retraso entre un evento y otro es de aproximadamente 2 minutos, tiempo razonable para un tubo de flujo que convecta de la región subsolar a los conos polares por el flujo de la magnetofunda. Sin embargo, dada la diferencia entre las oscilaciones en Polar y Cluster, parece que aunque los FTEs son grandes, es difícil poder observar a un mismo tubo de flujo a latitudes diferentes.

En la red existen diferentes lugares donde se encuentran datos de la nave Cluster, en particular existe como parte de la NASA un espacio para bajar datos de Cluster de campo magnético y hacer gráficas de los parámetros del plasma directamente. De los datos de plasma existentes hice una selección dejando únicamente los datos que muestran una variación apreciable a la resolución a la que los encontré, ver figura (6.6). De arriba a abajo se tiene: ángulo θ de campo magnético, ángulo θ de la velocidad de los iones, velocidad de los iones (km/s), energía de los electrones (keV) y las oscilaciones del plasma. En los datos del plasma registrados por Cluster se puede observar una transición a las 2:10, aumenta la velocidad de los iones, cambia la energía de los electrones de baja energía y aumentan las fluctuaciones del campo electromagnético tanto en el campo eléctrico como en el magnético. Sin embargo la resolución es muy mala para ver las variaciones cerca de las 2:40, parece haber cambio en la velocidad de los iones y en la energía de los electrones como se esperaría de un caso de reconexión magnética pero sería necesario tener los datos con mayor resolución para poder concluir algo.

La figura (6.7) es un acercamiento a los datos de Cluster a mayor resolución mostrando los datos del Cluster Ion Spectrometer - Hot Ion Analyzer (CIS-HIA) y del Fluxgate Magnetometer (FGM). De arriba a abajo se tiene: el espectrograma de la energía, la densidad, la velocidad de bulo y la temperatura de los iones, las componentes magnéticas en coordenadas GSM y el campo magnético total. Combinando la trayectoria de la nave y los datos del plasma puedo concluir que Cluster se encontraba inicialmente en el lóbulo norte de la cola moviéndose hacia el cono polar 00:20 UT, cruzando la magnetopausa 02:10 UT y en la magnetofunda después.

Si se hace un mayor acercamiento es notorio que a lo largo del intervalo el plasma es del

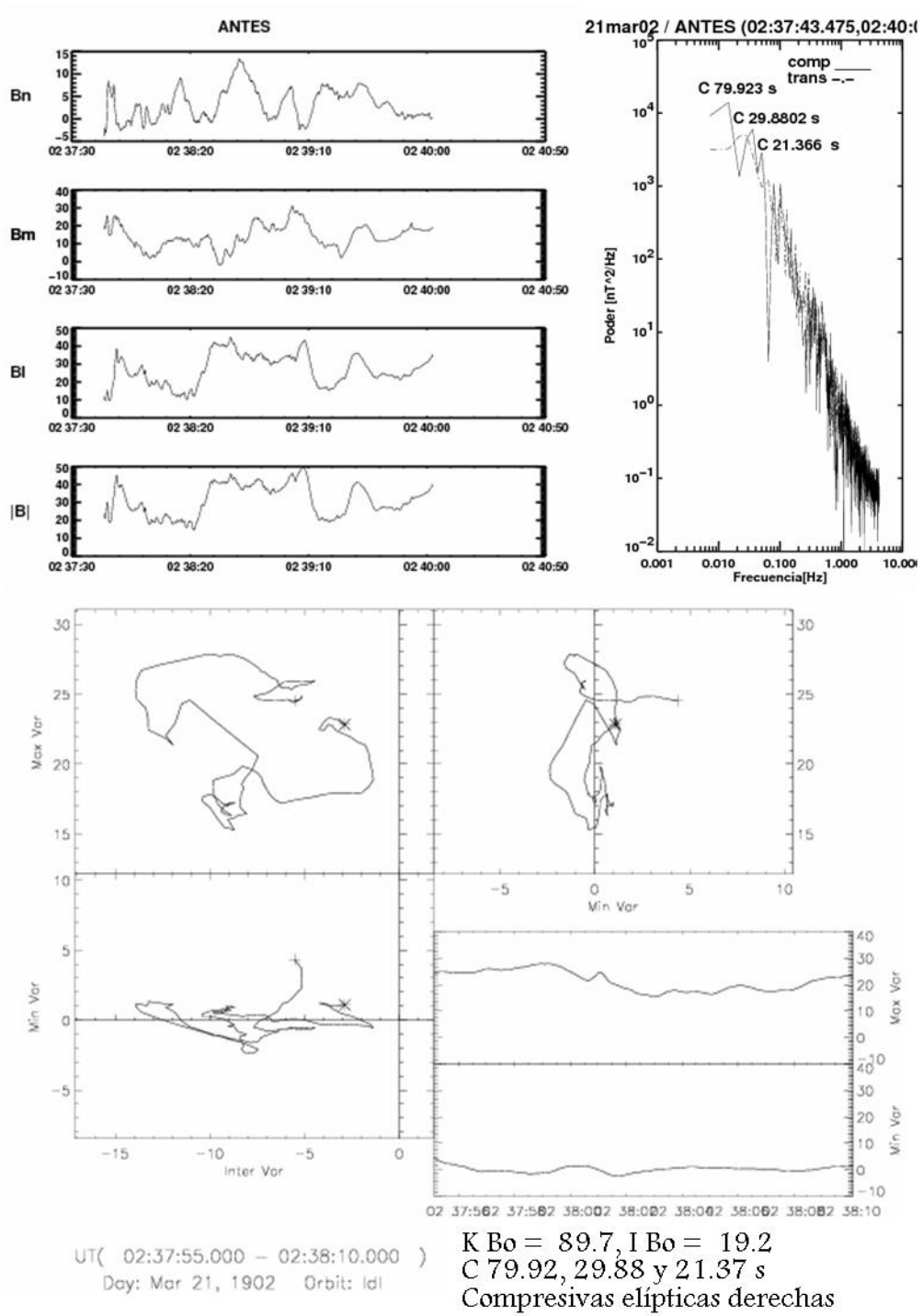


Figura 6.3: Acercamiento a las perturbaciones, hodograma y espectro de Fourier para las oscilaciones ANTES del FTE

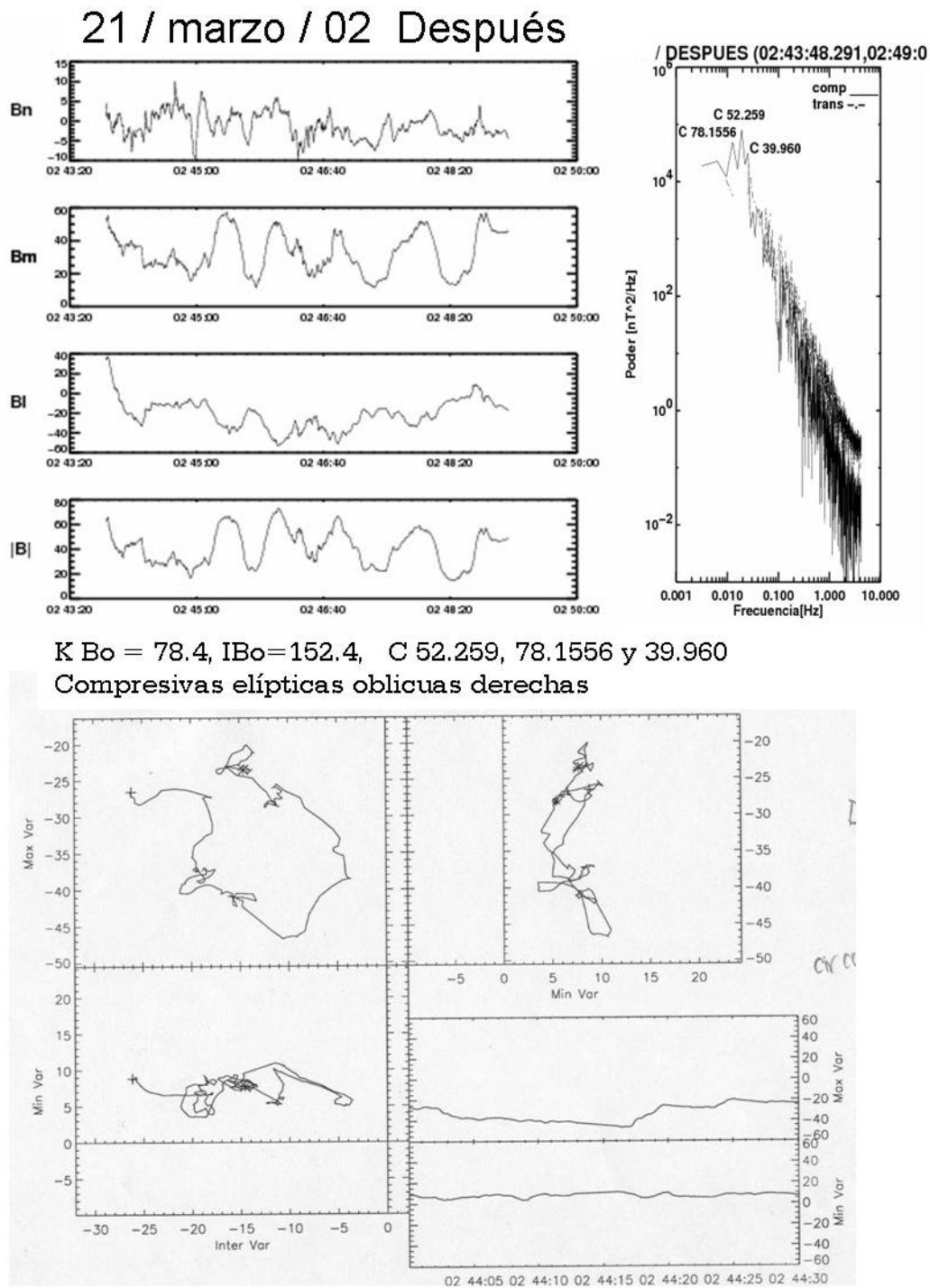


Figura 6.4: Acercamiento a las perturbaciones, hodograma y espectro de Fourier para las oscilaciones DESPUES del FTE

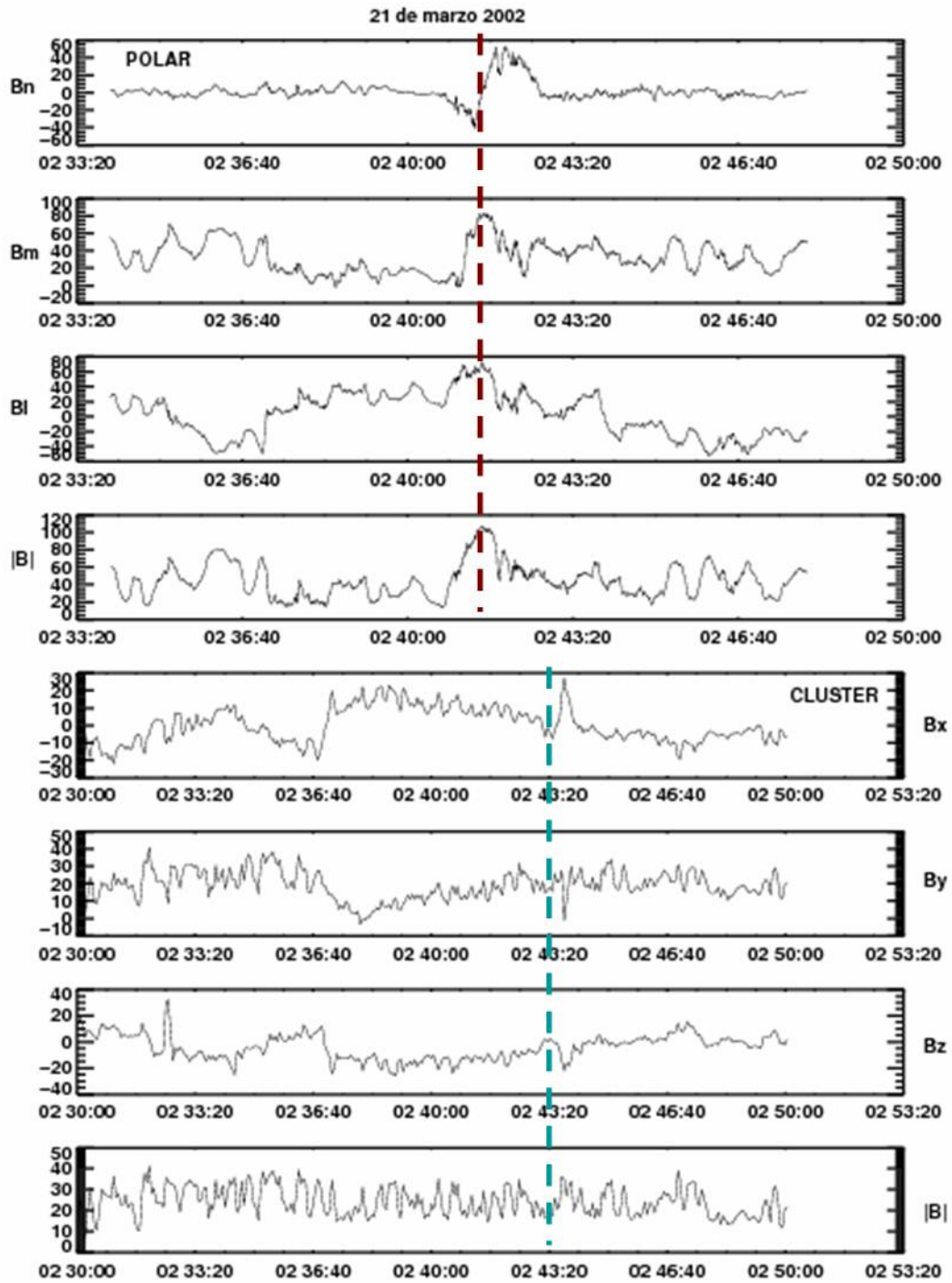


Figura 6.5: Medidas de campo magnético de Polar y Cluster del 21 de marzo del 2002. Con líneas punteadas verticales se muestran los respectivos FTEs

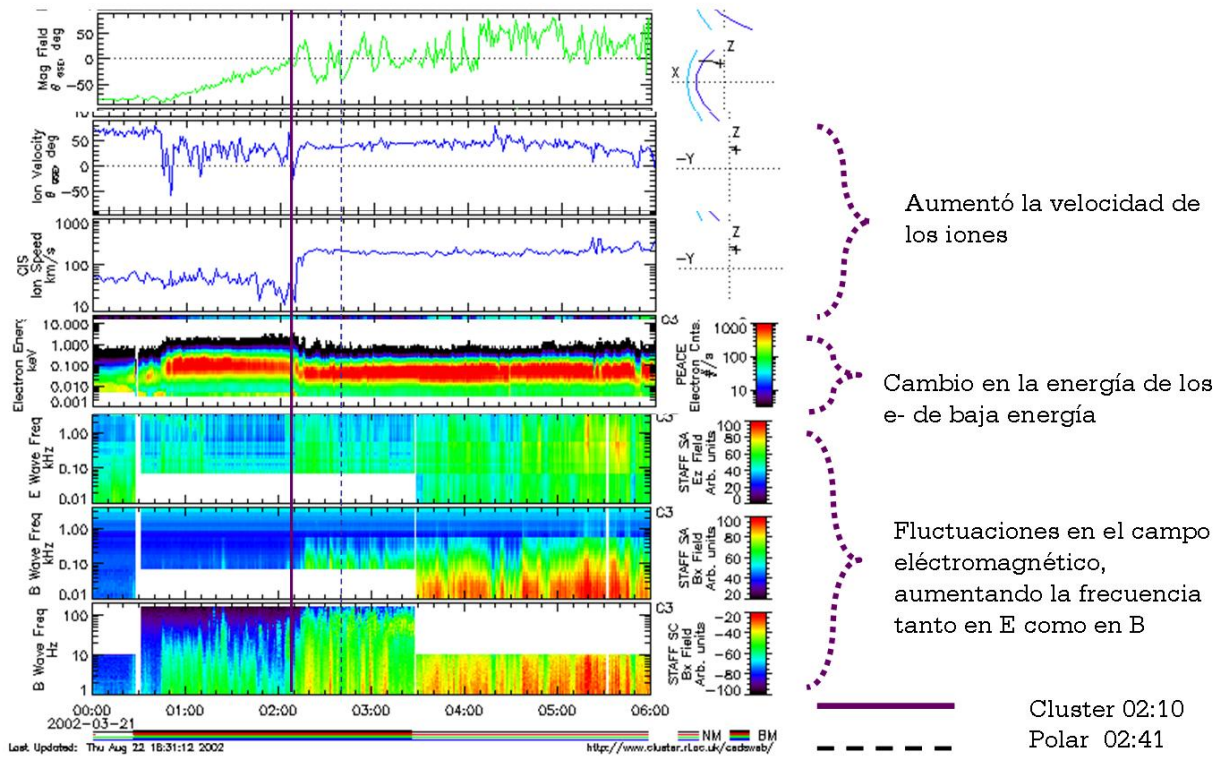


Figura 6.6: Datos de Cluster 1 obtenidos del sitio de Cluster en internet

tipo de la magnetofunda excepto en el momento del FTE, cuando se presenta una población de plasma adicional, ver figura (6.8). Con un rectángulo sombreado se muestra el momento de la oscilación tipo FTE encontrada en Cluster basada en los datos de Polar, se puede apreciar en las medidas de los iones cercanos al FTE (región marcada con un rectángulo sombreado) que el plasma es una mezcla de iones típicos de la funda en un rango de energías de algunos cientos de eV a algunos keV y algunos iones más calientes sobre los 10 keV. La mezcla de las dos poblaciones de iones resulta en una mayor temperatura y una baja en la densidad en el momento del FTE. La velocidad de bulo en el FTE es casi la misma que en la magnetofunda indicando que el tubo de flujo se está moviendo con el flujo de la funda.

Los datos que tengo del viento solar fueron obtenidos por la nave ACE que se encontraba aproximadamente a 221 radios terrestres río arriba y a 20 de la línea Sol-Tierra. Los datos del campo magnético en la componente z presentan componente norte en el momento del FTE pero muchas oscilaciones con bz sur aproximadamente 2 horas antes, ver figura (6.9). Dada la distancia a la que se encuentra ACE, su orientación y a las bajas correlaciones entre los parámetros del viento solar y los FTEs, no puedo asegurar que esta parcela de viento solar represente las condiciones para crear un FTE.

Me ha resultado difícil encontrar un evento en el cual tenga un FTE claramente distinguible en Polar a bajas latitudes y que también lo observe en Cluster a altas latitudes. El campo magnético está muy perturbado en la zona de la magnetofunda y eso impide que los tubos

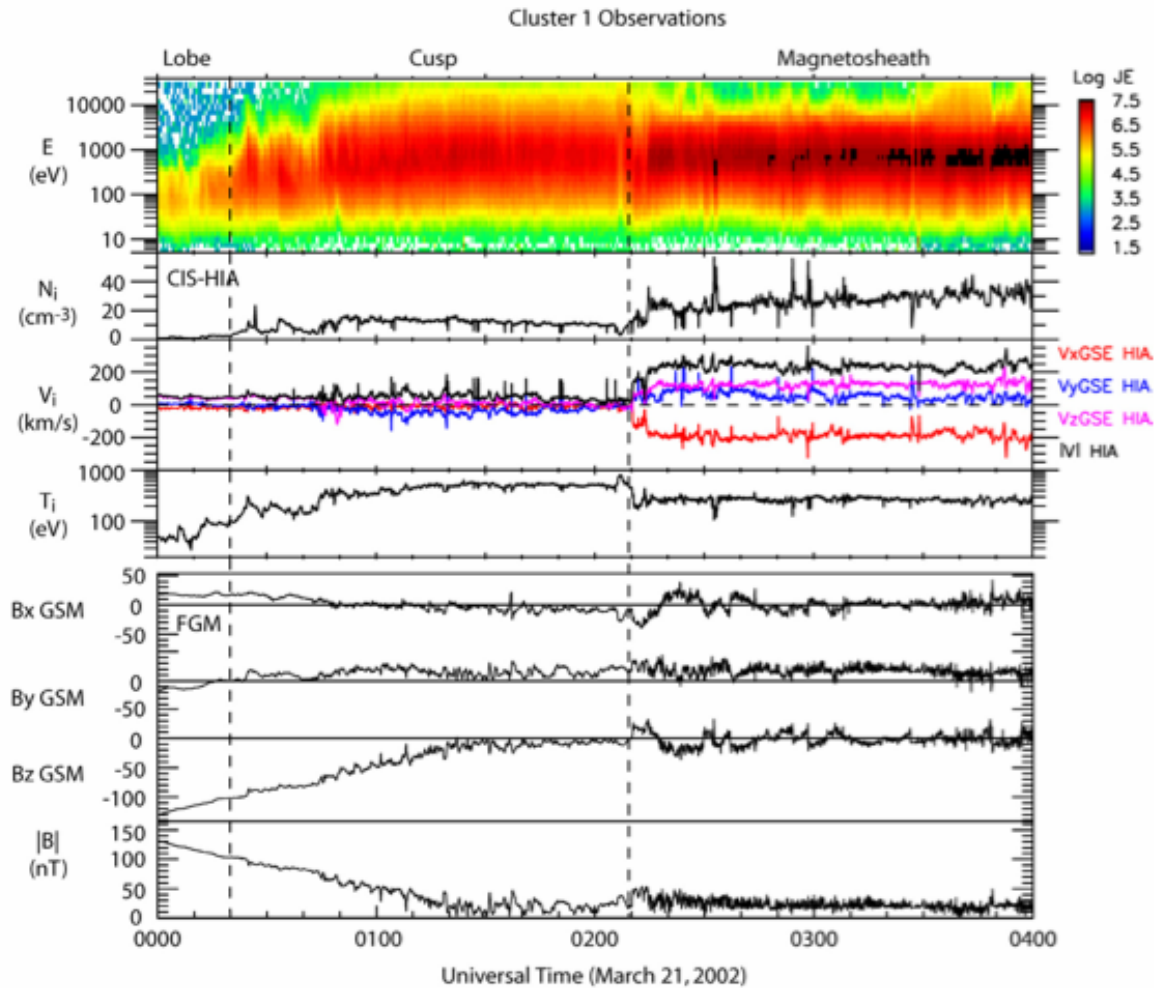


Figura 6.7: Acercamiento a la región cercana al FTE visto por Cluster

de plasma se ven bien a bajas y altas latitudes al mismo tiempo. Como ejemplo de lo que normalmente ocurre con los FTEs tengo el 17 febrero 2003. Polar se encontraba cerca del punto subsolar a bajas latitudes en la magnetofunda, mientras que Cluster se estaba cerca del cusp a más altas latitudes. La figura 6.10 muestra las posiciones de las naves en el día 17 de febrero del 2003, el panel superior representa el plano meridional del día (plano XZ), el panel del medio representa el plano (YZ) y el panel inferior muestra el plano ecuatorial (XY). La trayectoria de Cluster para este evento es una línea morada continua, mientras que Polar son los puntitos azules.

La figura 6.11 muestra los datos del campo magnético registrados por Polar a bajas latitudes del Magnetic Field Experiment (MFE). Se observan claras oscilaciones bipolares, marcadas con regiones de colores diferentes, a lo largo del día. Sin embargo, a las ~12:59 se observa la oscilación bipolar con mayor valor pico a pico en la componente n (~ 115 nT ¡mayor al de Le et al [2007] (supuestamente el mayor en publicarse)!), aumento en la magnitud del campo, polaridad reversa y en la componente l muestra también una marcada oscilación bipolar,

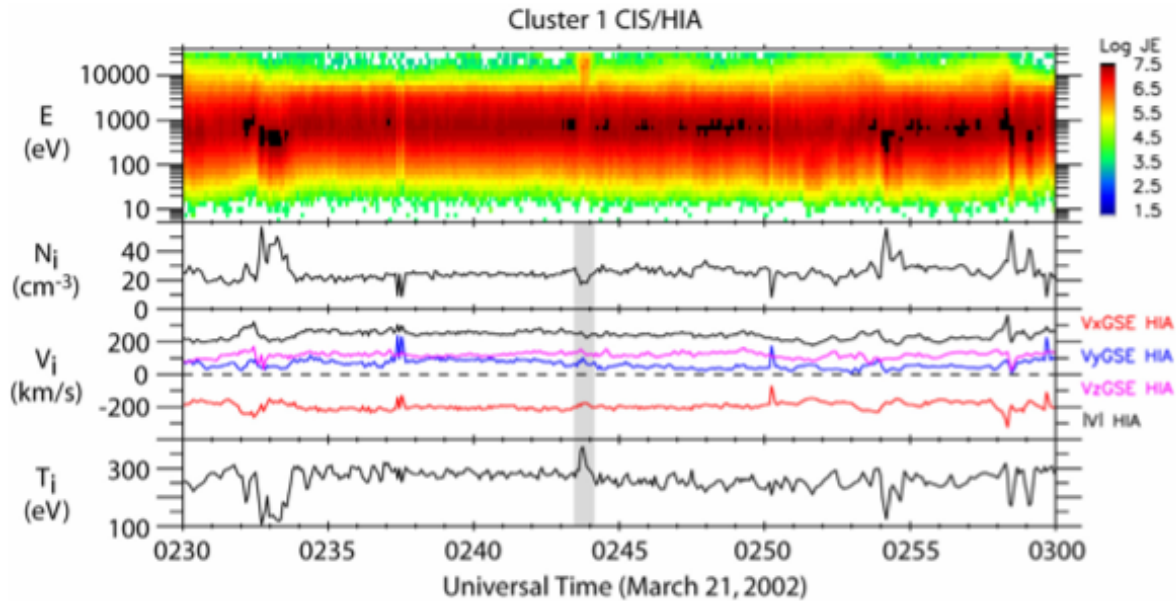


Figura 6.8: Acercamiento al FTE visto por Cluster

a este FTE lo llamaré principal. Es notorio que la distancia pico a pico en la componente normal a la magnetopasa en nT va disminuyendo conforme los FTEs se alejan del FTE principal. Un tubo de flujo moviéndose hacia el norte produce una oscilación bipolar con polaridad normal (+/-) y un tubo moviéndose hacia el sur presenta una polaridad reversa (-/+ [Berchem y Russell, 1984, Rijnbeek et al., 1984]. En este día, todos los FTE presentan polaridad reversa, lo que nos habla de tubos moviéndose hacia el sur.

Las medidas de campo magnético del Cluster 1 se muestran en la figura (6.12) para el mismo intervalo de tiempo que en Polar (12:50-13:10). Las franjas marcan los intervalos en los que se observaron oscilaciones bipolares tipo FTEs en Polar. No es clara ninguna oscilación bipolar en Cluster... El tiempo aproximado para que el FTE convecte del punto subsolar al cusp por el flujo de la magnetofunda es de ~ 2 minutos (Le et al [2007]), por lo que el FTE podría ser el pico u oscilación unipolar con una breve variación del campo total cerca de las 13:03 pero no es claro.

Las medidas del plasma de la nave 3 de Cluster nuevamente no tienen la resolución adecuada para ver variaciones en la escala de tiempo que necesito. En la figura 6.13 se presentan los datos más representativos o con mayor variación del plasma del Cluster 3 y 4. En orden descendiente se tienen, la velocidad y la energía de los iones (CIS), la energía de los protones (RAPID), las oscilaciones del campo electromagnético (STAFF), la energía de los electrones (PEACE) y las oscilaciones del campo en una escala menor (WHISPER). (el panel 5 y el 8 están repetidos) Cerca de la hora del FTE principal de Polar, Cluster observa cambios en sus registros. Un aumento en la velocidad de los iones, posiblemente atribuible a los jets en la reconexión. En la energía de los iones a partir del FTE principal la energía se corre hacia los valores más altos de flujo, aunque en la energía de los protones no hay cambio aparente y no hay datos de la energía de electrones. Con respecto a las oscilaciones del campo eléctrico a

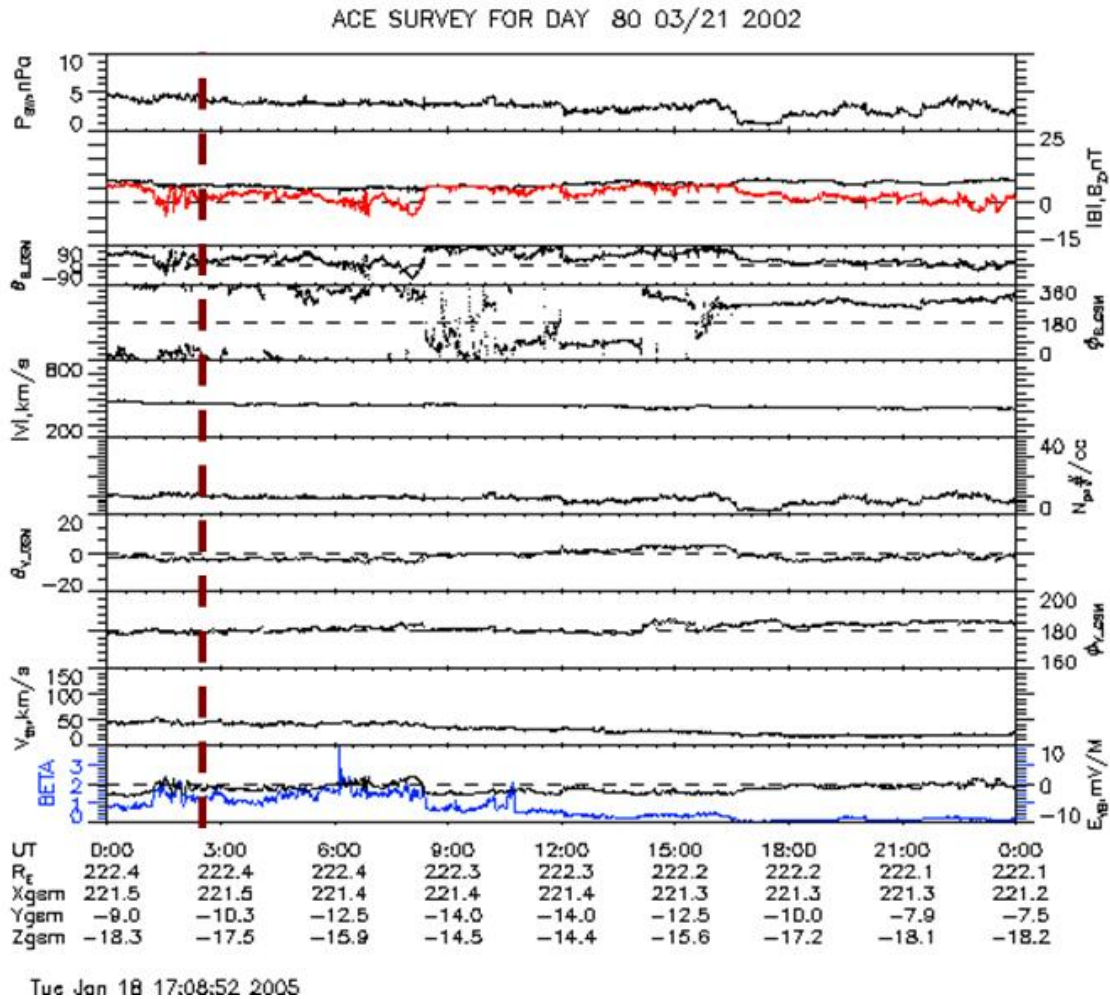


Figura 6.9: Viento solar y FTE marcado con una línea punteada

bajas frecuencias (entre 0.01 y 1 kHz) se observa un tenue aumento en las oscilaciones, pero en altas frecuencias (0-100 kHz) en los tiempos en los que hay oscilaciones bipolares secundarias en Polar, se registran aumentos en las frecuencias de oscilación del campo eléctrico de cerca de 20 kHz.

Durante este intervalo de tiempo ACE se encuentra a $\sim 226.7 R_e$ y coordenadas 223.5 en x , -37.7 en y y 5.9 en z , en coordenadas GSM. El campo magnético interplanetario, representado en la figura 6.14 en el segundo panel, muestra una componente z muy perturbada con rotaciones continuas norte y sur. Marcado con una línea vertical discontinua verde está el FTE. Dada esta variación y la distancia a la que se encuentra ACE, es difícil ubicar la parcela de viento solar que pueda producir cada FTE, pero se puede hablar de un día con frecuentes momentos de reconexión ó reconexión intermitente y en el punto subsolar simplemente suponer que la componente z del campo interplanetario está fluctuando entre el norte y el sur.

Ambos ejemplos muestran cómo las características magnéticas de los FTEs dependen de

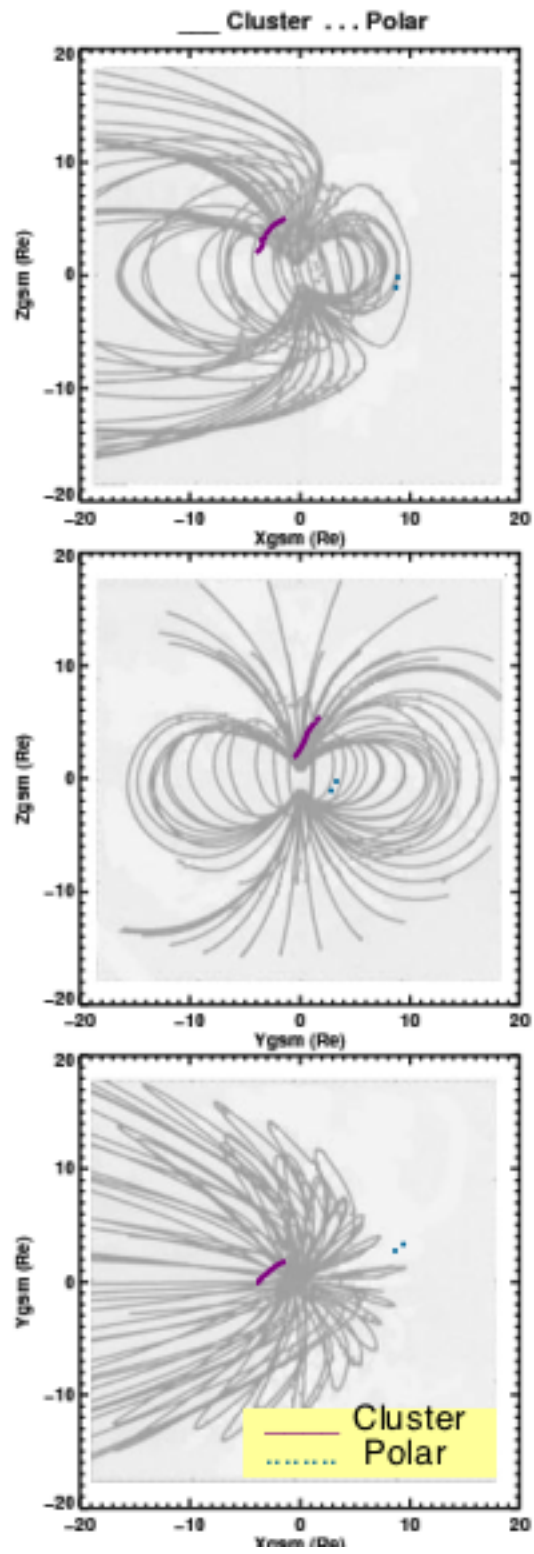


Figura 6.10: Posiciones de Polar y Cluster para el 17 de febrero del 2003

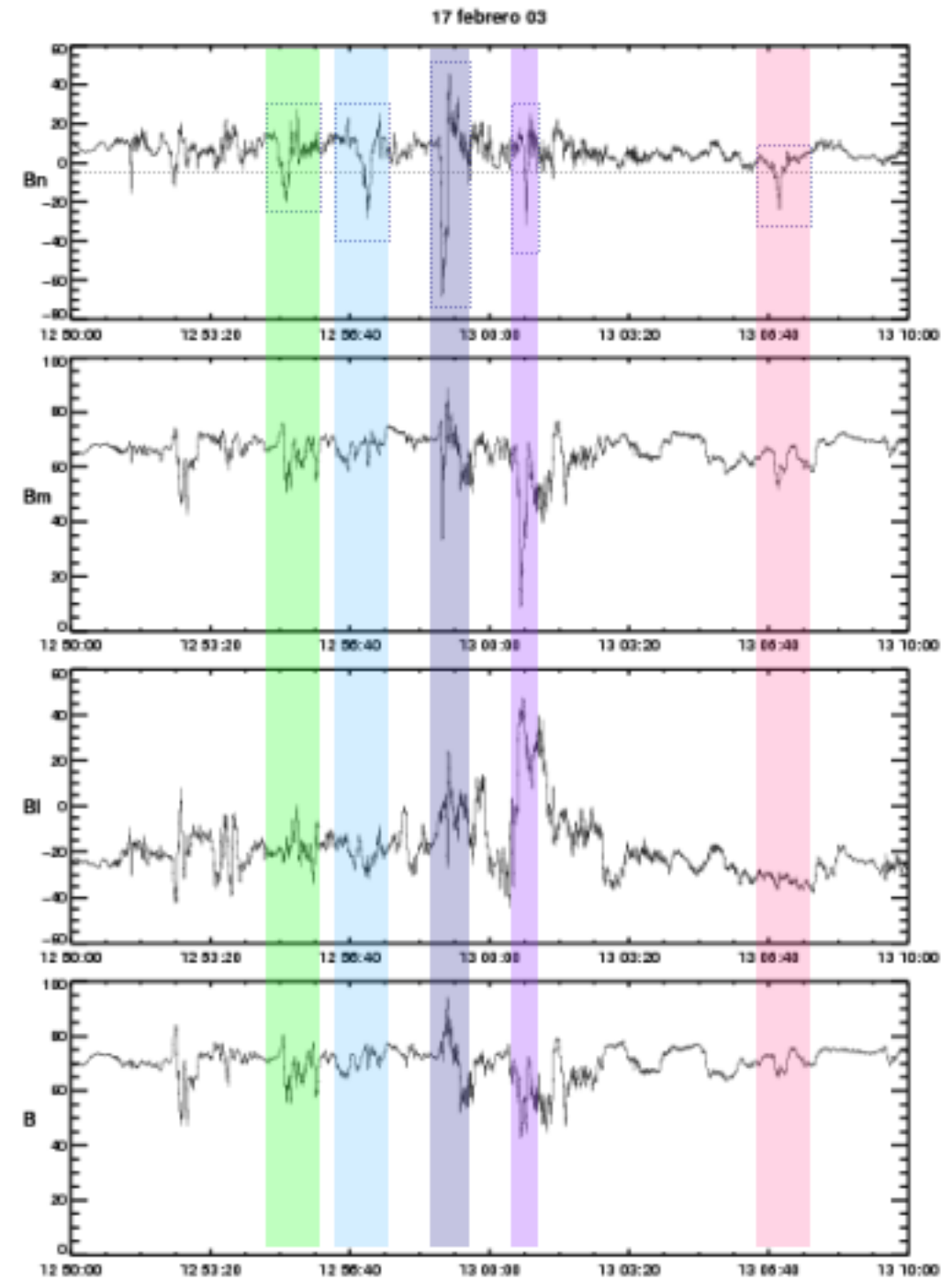


Figura 6.11: 17 de febrero del 2003 / Medidas del Campo magnético (MFE) de Polar. Entre cada región coloreada se encuentra un FTE

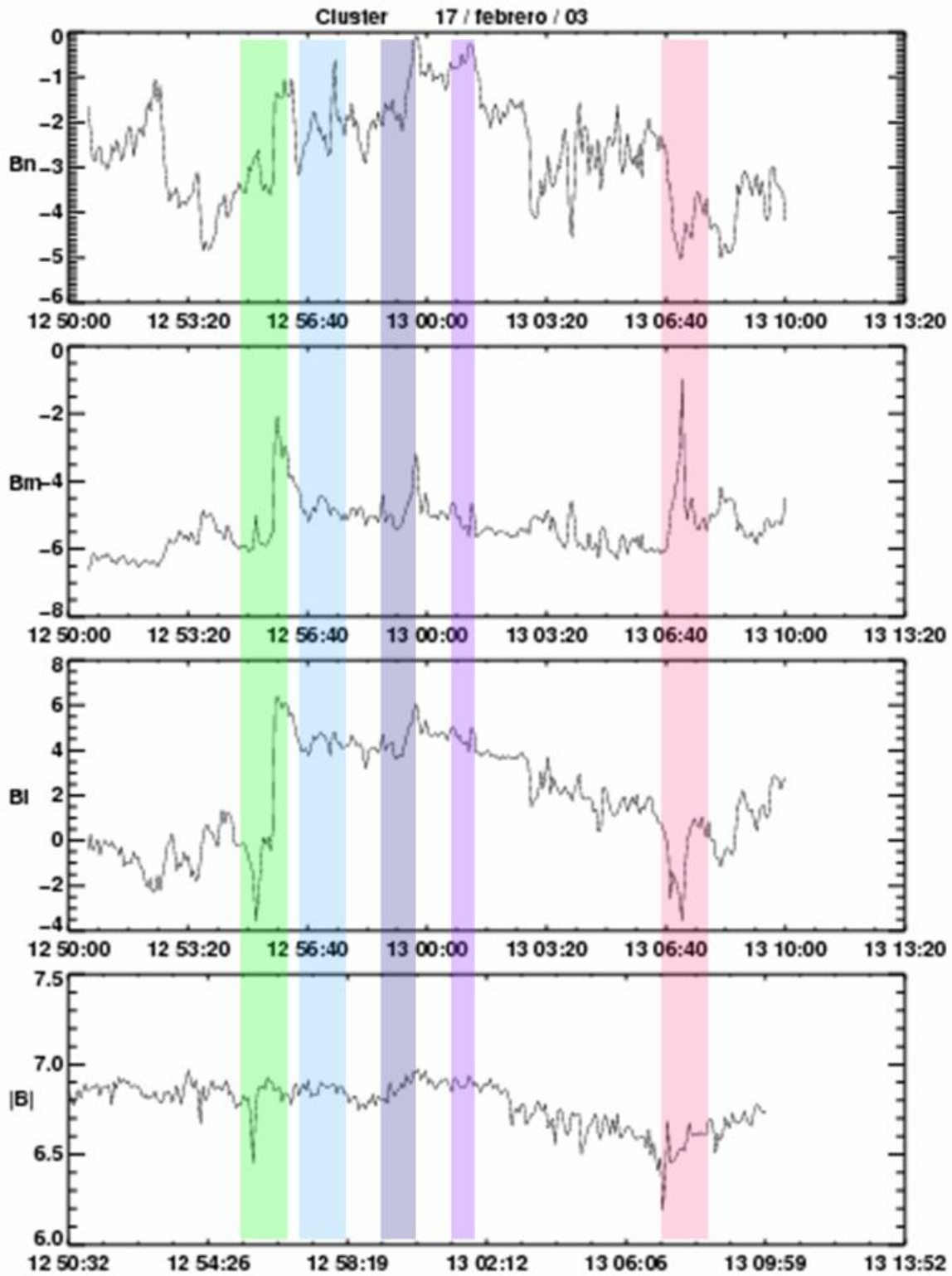


Figura 6.12: Datos del campo magnético de alta resolución de la nave Cluster para el mismo intervalo que Polar (12:50-13:10), mostrado en la figura 6.11

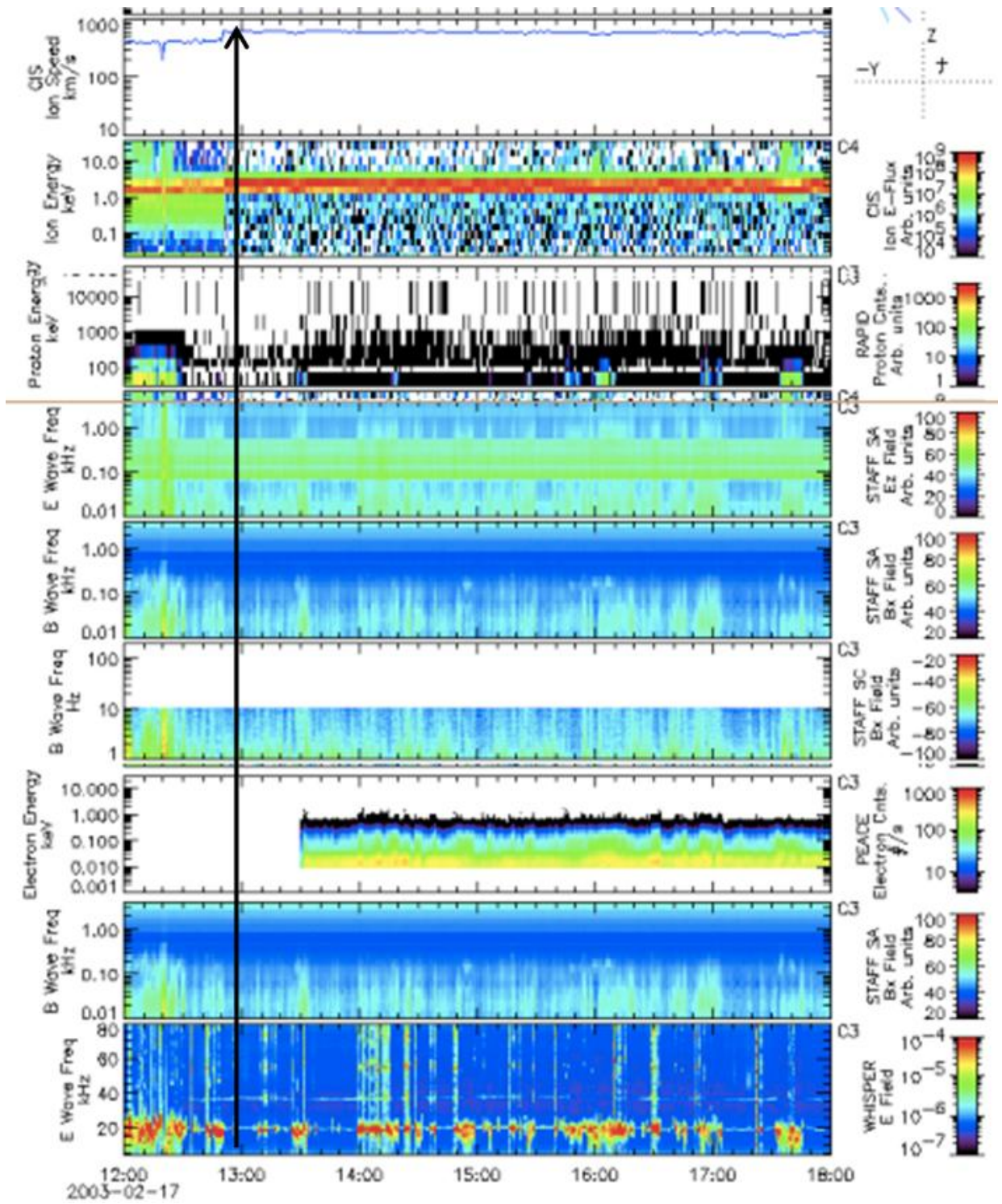


Figura 6.13: Medidas del plasma de Cluster

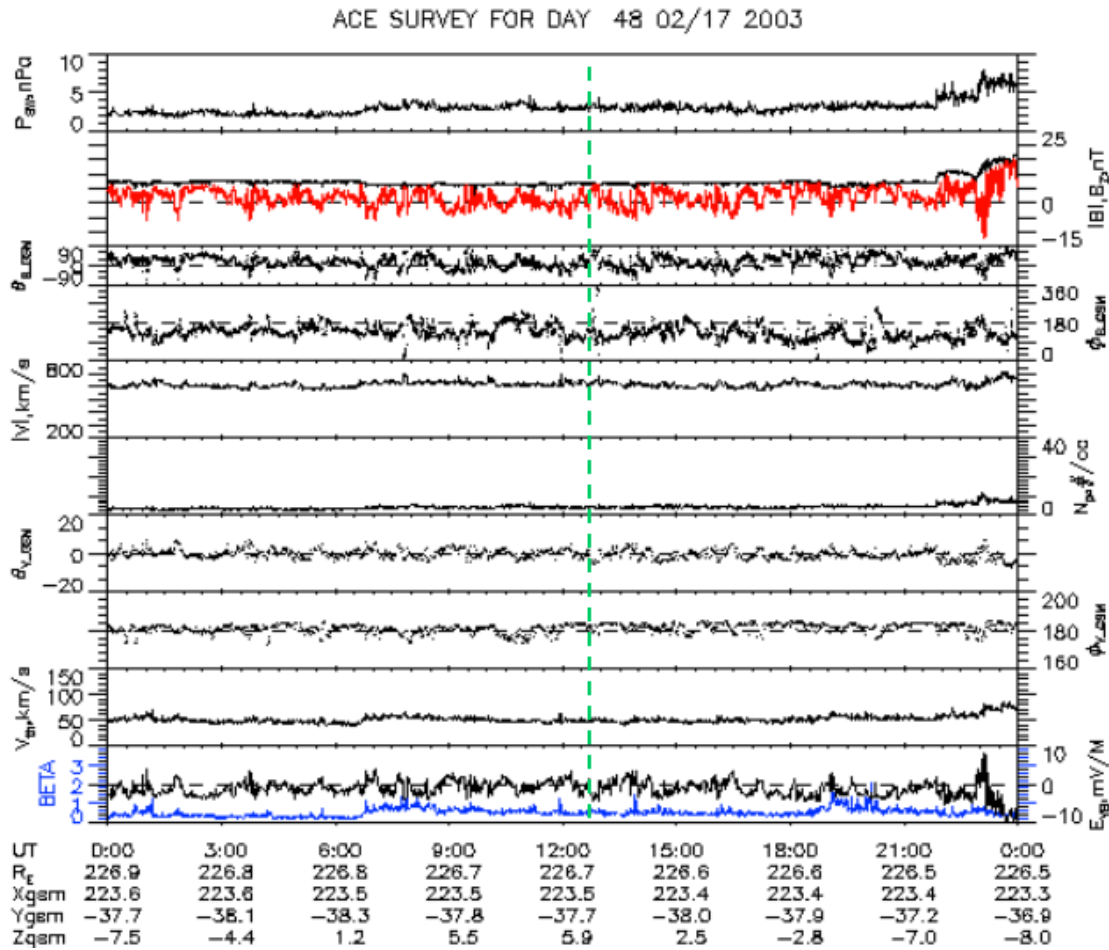


Figura 6.14: Medidas del campo interplanetario / ACE 17 de febrero 2003

la latitud a la que se encuentren. A bajas latitudes las oscilaciones bipolares son marcadas y bien definidas, mientras que a altas las características bipolares van desapareciendo dejando una oscilación casi unipolar. Este comportamiento podría explicarse si suponemos que los tubos de flujo tienen una estructura helicoidal muy torcida cuando se forman, que se va desenrollando conforme los tubos se mueven por el flujo de la magnetofunda. Aunque no hay que descartar el hecho de que en ambos ejemplos la nave haya cruzado el tubo sólo en una parte.

Conclusiones

Dentro del contexto de la física espacial se hizo una revisión del concepto de reconexión magnética y se analizó un fenómeno en particular cerca del entorno terrestre. Primero se expuso sobre la magnetosfera, sus principales características y su dinámica. El concepto de reconexión magnética se vuelve indispensable en el estudio de la magnetosfera y por ello se analizaron diferentes modelos, magnetohidrodinámicos, cinéticos y algunos híbridos que modelaran el fenómeno. En búsqueda de una firma de reconexión magnética que nos permitiera analizar perturbaciones cerca de la región de reconexión encontramos los eventos de transferencia de flujo magnético, o flux transfer events FTE; representaciones de reconexión intermitente. Se discute el fenómeno de los FTE, sus características magnéticas, las propiedades del plasma y de las partículas energéticas. Se discutieron también las características de las funciones de partículas dentro de los FTEs, así como las ondas que han sido observadas cerca de estos eventos y los diferentes modelos que describen a los FTEs. A partir de una muestra de 54 FTEs observados por la nave Polar, analizamos las perturbaciones aledañas y lejanas a los FTEs para conocer un poco más de las regiones que rodean a estos eventos.

Caracterizamos y correlacionamos los FTEs en base a su morfología, a su ubicación en el espacio y a diferentes parámetros del viento solar como la presión dinámica, los diferentes ángulos, la componente z del campo magnético y el campo eléctrico convectivo. Encontramos que cerca del punto subsolar los FTEs tienen mayores amplitudes y duraciones que a latitudes altas, lo que se explica al tomar en cuenta que la mayoría de los FTEs se generan a latitudes bajas y después convectan hacia las altas latitudes con el flujo del plasma de la magnetofunda, siendo comprimidos en el camino.

A continuación buscamos ondas o perturbaciones cerca de los registros de FTEs. Encontramos ondas ión ciclotrón y modo espejo principalmente. Una vez ubicadas las perturbaciones se analizaron vía Fourier, Variación mínima y el método de máxima entropía. Finalmente hicimos una clasificación de los FTEs dependiendo de las perturbaciones magnéticas encontradas con los datos de la nave Polar.

Entre los diferentes días con eventos de transferencia de flujo se encontraron dos subconjuntos: días en los que el viento solar (medido por ACE) tiene una componente magnética definida por al menos 3 horas (norte o sur) que se refleja en eventos en la magnetopausa con FTEs sencillos, es decir, bien espaciados, fácilmente detectables y solitarios, y por otro lado, días con muchas variaciones en las componentes magnéticas del viento solar que se reflejan en eventos de FTEs múltiples, es decir, eventos con muchos FTEs en un intervalo de 20 minutos.

Una vez caracterizados los FTEs observados por Polar seguimos nuestro estudio incorporando una nave más (Cluster). Dado que la región de difusión es pequeña espacialmente, resulta muy poco probable que nos encontremos en la trayectoria de la nave con la región

de reconexión. Sin embargo existen fenómenos que ahí se generan y después se propagan. Observando la evolución de los FTEs a diferentes latitudes y analizando las perturbaciones aledañas a estos con distintas naves podemos comprender un poco más de esta región y hacernos una idea más allá de la que tendríamos con una sola nave.

Con todos estos elementos se busca entender como es que se comportan los FTEs en la magnetopausa y la magnetofunda a diferentes latitudes y en compañía de ondas electromagnéticas.

Se encontraron principalmente ondas tipo espejo, ión ciclotrón y magnetosónicas derechas cerca de los eventos de transferencia de flujo. En los casos en los que se tienen ondas dentro del FTE, éstos presentaron siempre una polarización circular tratándose en la mayoría de los casos de ondas tipo ión ciclotrón. La existencia de este tipo de perturbaciones nos indica que cerca o dentro de los eventos de transferencia de flujo el plasma tiene inestabilidades en la temperatura. La teoría cinética lineal predice que en los casos en que se tiene una β grande y una anisotropía $A_i = T_{per}/T_{par} - 1$ pequeña se tendrá modo tipo espejo, pero si la β es baja y la anisotropía grande lo que tendrá serán ondas tipo ión ciclotrón ($\gamma_{ion} > \gamma_{espejo}$).

Las observaciones realizadas con más de una nave muestran que las características magnéticas de los FTEs son distintas a altas latitudes. Las marcadas oscilaciones bipolares comúnmente usadas para identificar a los FTEs a bajas latitudes no están siempre presentes a altas latitudes. Si se considera que estos tubos de flujo presentan una estructura helicoidal en su interior, se puede pensar en que existe mayor torsión cerca del lugar donde se generan y que conforme convectan hacia el cusp (o cono polar) van perdiendo su estructura helicoidal volviéndose más planos.

Futuras observaciones con más naves (Themis por ejemplo), mayor resolución y cercanía a la región de reconexión, proporcionarán más elementos físicos para explicar el papel de las ondas en los FTEs, así como la evolución de éstos.

Apéndice A

Métodos utilizados

Introducción

En este capítulo se describen los diferentes métodos matemáticos utilizados en el análisis de las perturbaciones magnéticas cerca de los FTEs. Se realizó un análisis de Fourier para conocer las frecuencias características de las perturbaciones. El espectro fué dividido de tal forma que se pudieran observar de manera separada el comportamiento de las componentes transversales y las compresionales. Para verificar que las frecuencias obtenidas por FFT fueran correctas se utilizó el método de máxima entropía separando también la señal en su parte compresiva y transversal. Con el método de mínima variación se encontraron la dirección de propagación de las ondas correspondiente a la dirección de mínima variación del campo magnético, los vectores de variación máxima, intermedia y mínima, el ángulo entre el vector de propagación de las ondas y el vector de campo magnético promedio, la polarización y la dirección de rotación.

A.1. Análisis de Fourier

Un proceso físico puede ser descrito tanto en el dominio del tiempo, por los valores de cierta cantidad h como función del tiempo t , ie, $h(t)$, como también en el dominio de la frecuencia, donde el proceso se especifica por su amplitud H (generalmente un número complejo que indica la fase) y una función de la frecuencia f , es decir $H(f)$, con $-\infty < f < \infty$. Es útil pensar en $h(t)$ y $H(f)$ como dos diferentes representaciones de la misma función. La forma de ir de una representación a otra está dada por las ecuaciones de la Transformada de Fourier:

$$H(f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{2\pi i f t} dt \quad (\text{A.1})$$

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)e^{-2\pi i f t} df \quad (\text{A.2})$$

Si t se mide en segundos, f está en ciclos por segundo o Hertz.

En nuestro caso, la función $h(t)$ está muestreada en un conjunto de datos obtenidos cada cierto intervalo de tiempo. Denotemos por Δ el intervalo de tiempo entre dos muestras consecutivas, el recíproco del intervalo de tiempo Δ es llamada la tasa de muestreo

Para cualquier intervalo de muestreo Δ , existe una frecuencia especial f_c llamada la frecuencia crítica de Nyquist, dada por:

$$f_c \equiv \frac{1}{2\Delta} \quad (\text{A.3})$$

El Poder total o Potencia en una señal es el mismo si se calcula en el dominio del tiempo o de la frecuencia, este resultado es conocido como el teorema de Parseval:

$$\text{PoderTotal} \equiv \int_{-\infty}^{\infty} |h(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df \quad (\text{A.4})$$

Usualmente se requiere conocer qué tanto poder está contenido en el intervalo entre f y $f+df$. En este caso se toma la frecuencia f variando desde 0 hasta ∞ , definiéndose la densidad de poder espectral de un sólo lado como:

$$P_h(f) \equiv |H(f)|^2 + |H(-f)|^2 \quad 0 \leq f \leq \infty \quad (\text{A.5})$$

El poder total es simplemente la integral $P_h(f)$ desde $f=0$ hasta $f = \infty$ y si la función $h(t)$ es real, los dos términos anteriores son iguales de modo que la densidad de poder espectral de un sólo lado sería:

$$P_h(f) \equiv 2 |H(f)|^2 \quad (\text{A.6})$$

Normalmente se trabaja con la densidad de poder espectral por unidad de tiempo, ie, se toman tramos finitos de la función $h(t)$, se calcula la densidad de poder espectral de una función cuyo valor sea igual al de $h(t)$ en el tramo elegido, y cero fuera de éste, finalmente se divide el resultado entre el ancho del tramo utilizado. El teorema de Parseval (A.4) establece que la densidad de poder espectral por unidad de tiempo es igual a la amplitud cuadrada media de la señal $h(t)$.

Si tomamos una muestra de N puntos de la función $c(t)$ a intervalos iguales y usamos la transformada rápida de Fourier para calcular la transformada se obtiene:

$$C_k = \sum_{j=0}^{N-1} c_j e^{2\pi i j k / N} \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (\text{A.7})$$

El espectro de poder está definido para un total de $N/2-1$ frecuencias y queda determinado por las siguientes ecuaciones:

$$P(0) = P(f_0) = \frac{1}{N} |C_0|^2 \quad (\text{A.8})$$

$$P(f_k) = \frac{1}{N} [|C_k|^2 + |C_{N-k}|^2] \quad k = 1, 2, \dots, (N/2 - 1) \quad (\text{A.9})$$

$$P(f_c) = P(f_{N/2}) = \frac{1}{N} |C_{N/2}|^2 \quad (\text{A.10})$$

donde f_k está definido para frecuencias positivas y cero por:

$$f_k \equiv \frac{k}{N\Delta} = 2f_c \frac{k}{N} \quad k = 0, 1, \dots, N/2 \quad (\text{A.11})$$

Para cada uno de los intervalos analizados se hizo una gráfica del poder espectral dividiendo a la señal en su parte compresiva y transversal. La parte compresiva se calcula tomando el poder de la magnitud del campo magnético. La parte transversal es el poder de las componentes menos la magnitud total. A partir de los picos obtenidos en esta gráfica se encontraron las frecuencias características.

A.2. Análisis de variación mínima

El propósito principal del análisis de mínima o máxima varianza es encontrar un estimador de la dirección normal de una capa de corriente unidimensional, un frente de onda, o cualquier otra capa de transición en el plasma [Sonnerup y Cahill, 1967]. En el presente capítulo se desarrolla el método en el contexto del campo magnético, es decir, con el método de variación mínima podemos encontrar, a partir de medidas del vector de campo magnético, la dirección con menor fluctuación del mismo.

Para nuestro estudio analizaremos N medidas del vector de campo magnético \bar{B} en tiempos sucesivos t . El valor promedio de \bar{B} en componentes cartesianas es:

$$\langle \bar{B} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{B}^i \quad (\text{A.12})$$

con $B^i = (B_x^i, B_y^i, B_z^i), i = 1, \dots, N$

Un vector \bar{n} normal a la dirección de mínima varianza de \bar{B} se determina calculando la desviación media cuadrática de los productos individuales $\bar{B}^i \cdot \bar{n}$ de $\langle \bar{B}^i \rangle \cdot \bar{n}$:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{B}^i \cdot \bar{n} - \langle \bar{B}^i \rangle \cdot \bar{n})^2 \quad (\text{A.13})$$

Optimizar la ecuación (A.13) es equivalente a encontrar el mínimo eigenvalor de la matriz de covarianza $M_{\alpha,\beta}$:

$$M_{\alpha,\beta} = (\langle B_\alpha B_\beta \rangle - \langle B_\alpha \rangle \langle B_\beta \rangle) \quad (\text{A.14})$$

con $\alpha, \beta \in \{x, y, z\}$

Los valores individuales de $B_{\alpha,\beta}$ en (A.14) son las componentes cartesianas de \bar{B} para una sola medida. Los tres eigenvectores y eigenvalores calculados de $M_{\alpha,\beta}$ corresponden a las direcciones de mínima, intermedia y máxima varianza de \bar{B} , ie, las direcciones de un nuevo sistema (de mínima varianza). La nomenclatura común en la literatura para los eigenvectores es \hat{e}_i y eigenvalores λ_i es:

- e_1, λ_1 : eigenvector y eigenvalor de la dirección de máxima varianza
- e_2, λ_2 : eigenvector y eigenvalor de la dirección de varianza intermedia
- e_3, λ_3 : eigenvector y eigenvalor de la dirección de mínima varianza

La dirección de mínima varianza da la dirección de propagación con respecto al campo magnético promedio \bar{B}_0 , calculado como el vector de campo promedio durante el intervalo analizado, y nos da el ángulo θ_{kB} entre el vector de onda \bar{k} y \bar{B}_0 . La calidad de esta determinación es medida vía el valor del cociente de los eigenvalores $\lambda_2/\lambda_1 \gg 2$ y el error angular $\Delta\theta_{kB}$ es usualmente estimado asumiendo que λ_3 representa una perturbación tipo ruido de fondo isotrópico, con $\Delta\theta_{kB} = \tan^{-1}(\lambda_3/\lambda_2 - \lambda_3)$ [Hope et al, 1981], a este error lo llamaré error tangencial. Sin embargo, Sonnerup y Scheible (1998) no recomiendan esta fórmula dado que no toma en cuenta el número de medidas del vector de campo magnético utilizadas para el análisis, ellos sugieren utilizar:

$$\Delta\theta_{kB} = \sqrt{\frac{\lambda_3}{(M-1)} \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_3)^2}} \quad (\text{A.15})$$

donde M es el número de vectores [Mazelle et al., 2003], a este error lo llamaré el error angular y lo representaré como $\Delta\theta$.

Para cada evento con FTEs analizado, se realiza un análisis de variación mínima a fluctuaciones tipo ondas, se encuentra el vector de mínima variación \bar{k} , el ángulo entre el vector de varianza mínima \bar{k} y el de campo magnético promedio \bar{B}_0 , el vector de variación máxima \bar{I} y el ángulo entre éste y el de campo magnético promedio \bar{B}_0 . En la representación gráfica se tienen hodogramas en donde se grafican las componentes del campo magnético a lo largo de los ejes formados por los vectores de variación mínima, intermedia y máxima. A partir de los hodogramas se puede determinar la polarización, la dirección de rotación de las ondas, y su forma. Al reportar los resultados todos los parámetros están expresados en grados así como el error tangencial y el angular.

A.3. Método de Máxima Entropía

Es común que los problemas planteados se puedan resolver en base a datos de mediciones realizadas, dadas ciertas condiciones o asumiendo ciertas cosas. Usualmente los datos no son tomados de manera continua, o no están completos y/o existe mucho ruido en las señales, así que resulta difícil encontrar una solución que exista, sea única y además estable. Diferentes métodos, incluyendo el Método de Máxima Entropía (MMM), han inventado diferentes soluciones a estos problemas, en particular MMM establece que: de todas las posibles soluciones, se escogerá aquella que tenga la máxima entropía.

El concepto de entropía es viejo, proveniente de la segunda ley de la termodinámica enunciada por Clausius en el siglo dieinueve. Después Boltzmann derivó la expresión matemática de la entropía en mecánica estadística, ie., la relación de Boltzmann: $S = k \ln W$. La entropía en mecánica estadística es la medida del grado de desorden existente en un sistema termodinámico.

Sin embargo el concepto de entropía dio un giro en 1948 cuando Shannon encontró, en la teoría de la información, una única cantidad H que medía la incertidumbre de una fuente de información. Dada la similitud entre la forma matemática y el significado físico, a la cantidad H se le llamó entropía. Para distinguirla de la entropía termodinámica a H se le llamó entropía de la información ó entropía de Shannon.

Una fuente de información discreta puede ser representada como:

$X : \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{pmatrix}$ donde p_i es la probabilidad de que una variable aleatoria X asuma el valor x_i . Si H cumple con las siguientes tres condiciones: (1) $H(p_1, \dots, p_n)$ es una función continua de p_i , $i = 1, \dots, n$ (2) Si todos los p_i son iguales, la cantidad $H(1/n, \dots, 1/n)$ es una función monótona creciente de n (3) La ley de composición. Si los valores se dividen arbitrariamente en m grupos, $(x_{11}, \dots, x_{1k_1})$, $(x_{21}, \dots, x_{2k_2})$, \dots , $(x_{m1}, \dots, x_{mk_m})$, las probabilidades correspondientes son: $w_1 = p_{11} + \dots + p_{1k_1}$, \dots , $w_m = p_{m1} + \dots + p_{mk_m}$. La medida de H tiene la forma única:

$$H(p_1, \dots, p_n) = -k \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (\text{A.16})$$

donde la constante k depende de las unidades usadas, y usualmente se toma igual a 1. Normalmente se toma la base e teniendo en lugar de \log , \ln .

La cantidad H en A.16 es llamada la entropía teórica de la información, la cual mide la incertidumbre de la fuente de información. Otra interpretación de H es que la incertidumbre se elimina después de recibir el mensaje (una cadena de valores) de la fuente de información; la entropía H es igual, en promedio, a la incertidumbre eliminada, llamada la información recibida, por recibir un valor dado.

Se ha discutido el concepto de fuente de información discreta, pero si la fuente fuera continua, la distribución de la variable aleatoria X se expresará en términos de una función de densidad de probabilidad la cual se asume continua. De esta forma la entropía es:

$$H(p(x)) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log p(x) dx \quad (\text{A.17})$$

Para que $H(p(x))$ no dependa del sistema de coordenadas, se introduce una medida $m(x)$ en la expresión de la entropía, así (A.17) se convierte en:

$$H(p(x)) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log[p(x)/m(x)] dx \quad (\text{A.18})$$

Como consecuencia, si $p(x)$ cambia, $m(x)$ cambia de la misma manera, así que el valor de H permanece inalterado. En MMM $m(x)$ es llamado el estimador de la solución.

Se concluirá esta sección resolviendo un problema sencillo para ilustrar el método. Supóngase que una variable aleatoria X puede asumir los valores de x_1, \dots, x_n , y se pide encontrar la distribución de probabilidades de X .

MMM resuelve el problema de la siguiente manera: Se determina la solución, p_1, \dots, p_n , maximizando

$$H(p_1, \dots, p_n) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (\text{A.19})$$

sujeto a la condición de normalización $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ y se encuentra que: $p_i = 1/n$, $i = 1, \dots, n$

A.4. El sistema de coordenadas LMN

El análisis de las perturbaciones cercanas a los FTEs se realizó en el sistema de coordenadas normal a la magnetopausa [Russell y Elphic, 1978]. La dirección \hat{N} es a lo largo de la normal a la frontera, su dirección es usualmente tomada hacia afuera de la Tierra. La dirección \hat{L} es a lo largo de la dirección del campo geomagnético. La dirección \hat{M} completa el sistema normal de coordenadas y apunta al amanecer de la magnetopausa. Ver figura (A.1). En el punto subsolar de la magnetopausa despreciando las aberraciones causadas por la velocidad de la Tierra a través del viento solar (29.5 km s^{-1}), el sistema de coordenadas LMN coincide con el sistema GSM con: $\hat{N} \rightarrow \hat{x}$, $\hat{L} \rightarrow \hat{z}$, $\hat{M} \rightarrow -\hat{y}$, es por ello que en muchos artículos la transformación sea directa.

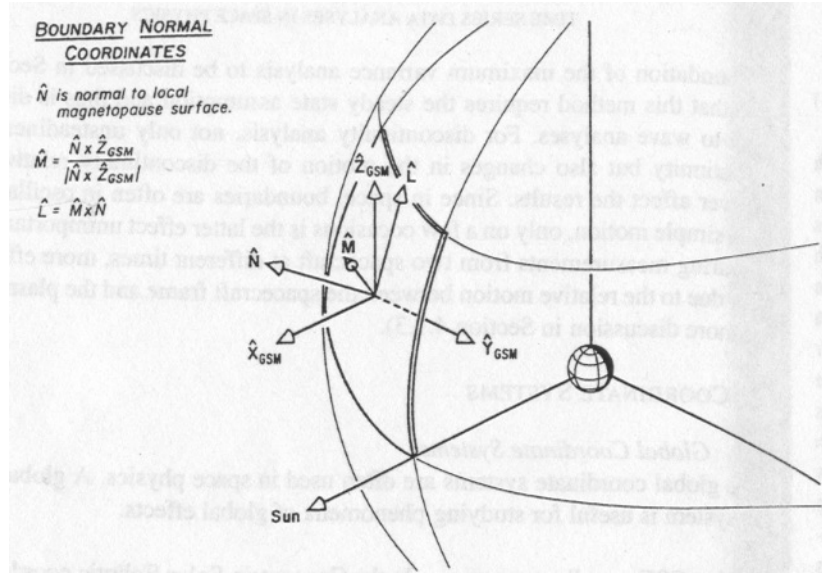


Figura A.1: Sistema de coordenadas normal a la frontera [Russell y Elphic, 1978]

A.5. Análisis de datos de campo magnético

A los datos del campo magnético obtenidos por la nave Polar se le obtuvieron promedios (A.12) y sus variaciones :

$$\delta \mathbf{B} = \mathbf{B} - \mathbf{B}_0 \quad (\text{A.20})$$

A partir de (A.20) se calcula δB_{\parallel} , la componente paralela a B_0 y está dada por

$$\delta B_{\parallel} = \frac{\delta \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}_0}{\|\mathbf{B}_0\|} \quad (\text{A.21})$$

y también la componente perpendicular:

$$\delta B_{\perp} = \delta B - \delta B_{\parallel} \quad (\text{A.22})$$

Se hace un cambio de coordenadas de los datos al sistema NLM (ver A.4) y se adopta como mi sistema, por lo tanto se realizan todos los cálculos en coordenadas NLM.

Para el análisis de Fourier se descompone el espectro en su parte compresiva y su componente transversal. Se considerará el poder espectral compresional igual al poder total de la magnitud del campo magnético, mientras que el poder transversal está dado por la suma de los poderes individuales de cada componente menos el poder de la magnitud total. De esta forma, todos los espectros de Fourier tendrán la superposición de 2 gráficas, una que representa el FFT de la parte compresiva y otra para el FFT de la parte transversal.

La información recabada por el análisis de Fourier puede ser cotejada con la brindada por el método de variación mínima y viceversa.

Los datos del campo magnético interplanetario (CMI) fueron tomados de la nave ACE (mayores referencias en la sección B.1). A estos datos se les tomaron promedios alrededor de

los FTEs y de las variaciones de la componente z del campo magnético. Con estos datos se hicieron correlaciones entre parámetros del viento solar y parámetros de los FTEs.

Apéndice B

Las naves espaciales de los datos utilizados

B.1. Breve descripción de ACE

ACE (Advanced Composition Explorer) fué lanzado en agosto de 1997 por la NASA, cuenta con 9 instrumentos de diferentes clases, 6 de ellos son sensores de alta resolución y tres instrumentos de monitoreo para muestras de partículas del viento solar de bajas energías y partículas galácticas de altas energías, ver B.1.

ACE observa el viento solar, los rayos cósmicos y sirve como una estación de clima espacial. La localización de ACE, en el punto L1 (punto de equilibrio gravitacional entre el Sol y la Tierra), permite la alerta de actividad geomagnética con aproximadamente 1 hora de anticipación. Los instrumentos que tiene ACE son los siguientes: Cosmic Ray Isotope Spectrometer (CRIS), Electron, Proton and Alpha Monitor (EPAM), Magnetometer (MAG), Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer (SEPICA) , Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor (SWEPAM), Solar Wind Ionic Charge Spectrometer (SWICS), Solar Wind Ion Mass Spectrometer (SWIMS), Ultra Low Energy Isotope Spectrometer (ULEIS) Solar Isotope Spectrometer (SIS).

En la red existe un sitio llamado Space Science Center que pertenece a la universidad de California, los Angeles (UCLA), en donde se encuentran los datos utilizados en esta tesis, con resolución de 1 y 5 minutos de diferentes naves que monitorean los parámetros del viento solar (WIND, ACE e IMP8) ([www – ssc.igpp.ucla.edu/forms/polar/corr_data.html](http://www-ssc.igpp.ucla.edu/forms/polar/corr_data.html)). Los parámetros utilizados en esta tesis fueron: la presión dinámica, la velocidad, los ángulos cone y clock, las componentes del campo magnético y a partir de los datos se calculó el campo eléctrico convectivo.

B.2. Breve descripción de Polar

La nave Polar fue lanzada el 24 de febrero de 1996 con una órbita de 1.8 a 9.0 radios terrestres con una inclinación de 86 grados y una periodo orbital de 18 horas. Polar obtiene datos de los polos terrestres tanto a bajas como a altas latitudes (ver B.2).

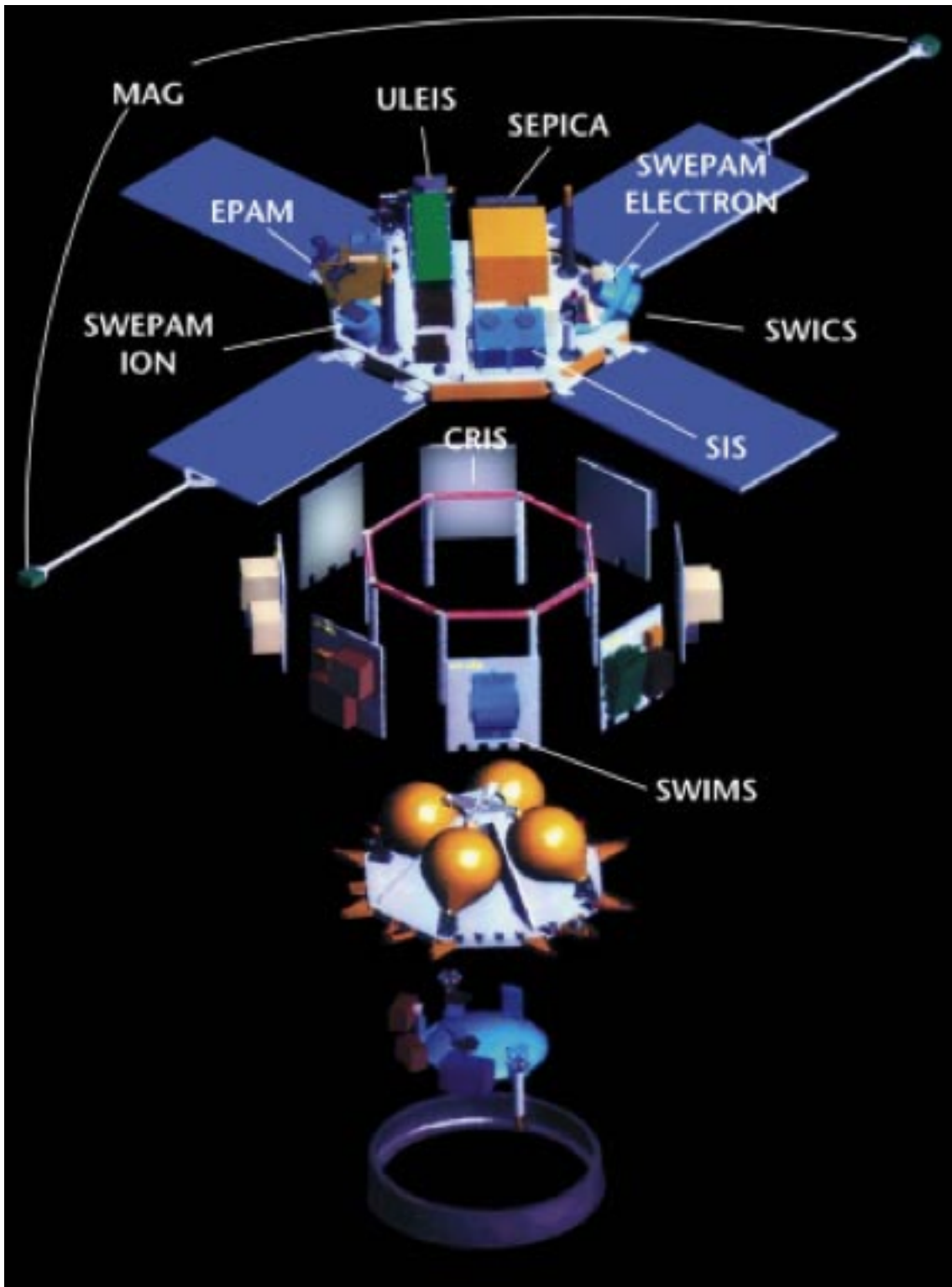


Figura B.1: Dibujo de ACE con sus principales aparatos

Arriba de los polos las partículas del viento solar pueden penetrar a la magnetosfera, a menores altitudes la energía es transferida de los campos eléctricos y ondas electromagnéticas a los electrones que crean la aurora, a latitudes medias la nave pasa cerca de los cinturones de Van Allen. Polar mide flujos de partículas cargadas, electrones, protones y iones, de energías térmicas a MeV. Mide campos eléctricos y magnéticos y ondas electromagnéticas. Los aparatos que tiene la nave Polar son los siguientes: Plasma Waves Investigation (PWI) Magnetic Fields Experiment (MFE) Toroidal Imaging Mass-Angle Spectrograph (TIMAS) Electric Fields Investigation (EFI) Thermal Ion Dynamics Experiment (TIDE) Ultraviolet Imager (UVI) Visible Imaging System (VIS) Polar Ionospheric X-Ray Imaging Experiment (PIXIE) Charge and Mass Magnetospheric Ion Composition Experiment (CAMMICE) Comprehensive Energetic-Particle Pitch-Angle Distribution– Source/Loss Cone Energetic Particle Spectrometer (CEPPAD/SEPS)

También en la red existe un lugar de UCLA en donde se pueden bajar los datos del MFE de la nave con una resolución de 8.3 muestras por segundo (www-ssc.igpp.ucla.edu/forms/polar/).

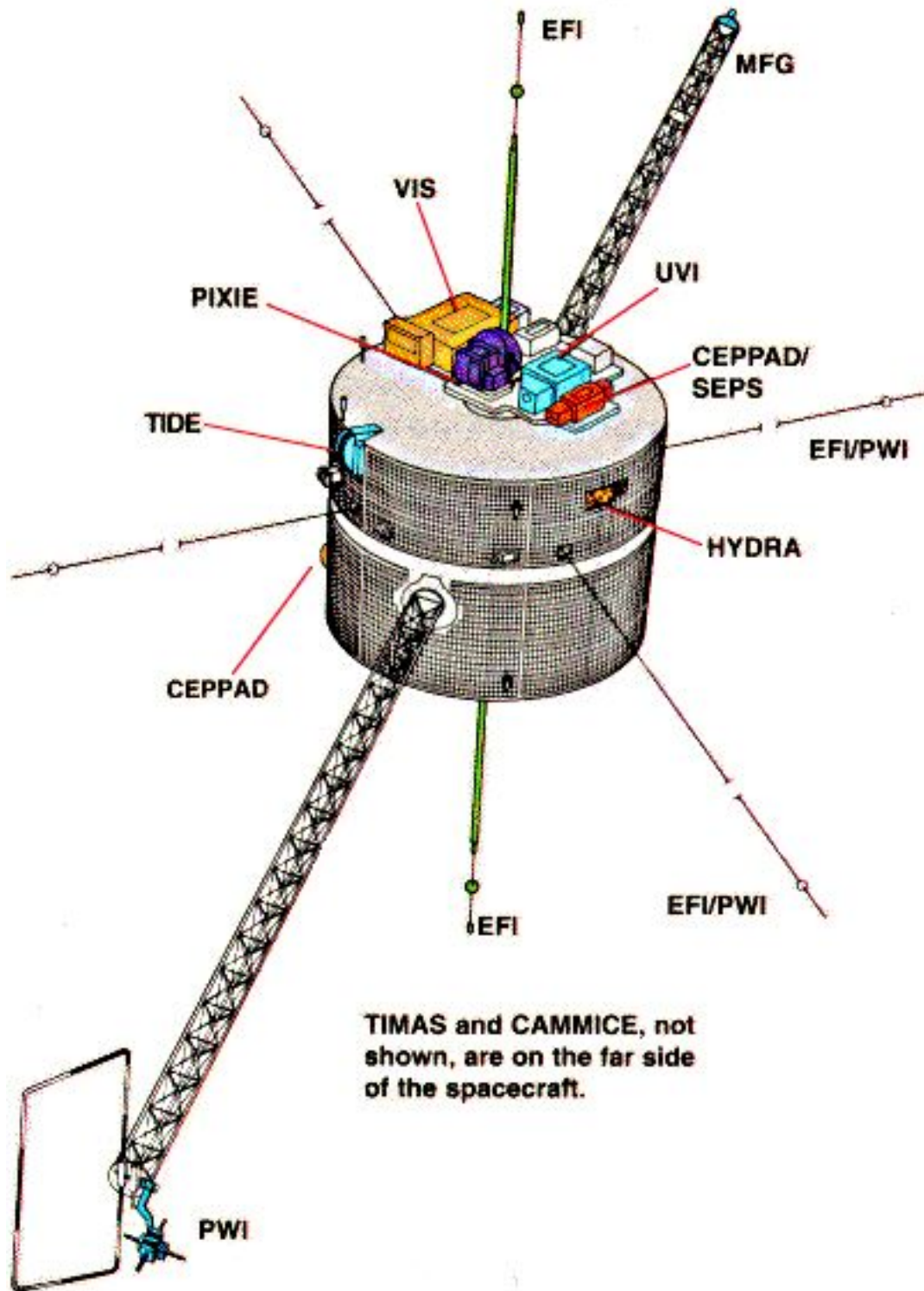


Figura B.2: Dibujo de Polar con sus principales aparatos

Bibliografía

- [Anderson et al., 1982] Anderson R.R., C.C. Harvey, M.M. Hoppe, B.T. Tsurutani, T.E. Eastman y J. ETcheto, *Plasma waves near the magnetopause*, J. Geophys. Res., 87, 2087, 1982
- [Baker, 2003] Baker D.N., *Telescopic and microscopic vies of the magnetosphere: multispacecraft observations*, Space Science Review 109: 133-153, 2003
- [Berchem y Russell, 1984] Berchem, J. y Russell, C.T., *Flux transfer events on the magnetopause: Spatial distributiion and controlling factors*, J. Geophys. Res., 89, 6689, 1984
- [Biernat et al., 1987] Biernat, H.K., M.F. Heyn y V.S.Semenov, *Unsteady Petschek reconnection* J. Geophys. Res, 92,3392, 1987
- [Bogdanova et al.,2005] Bogdanova Y.V. et al, *On the formation of the high-altitude stagnant cusp: Cluster observations*, Geophys.Res. Lett. Vol.**32**, (2005)
- [Bosqued et al., 2005] Bosqued J.M. et al, *Multipoint observations of transient reconnection signatures in the cusp precipitation: A Cluster-IMAGE detailed case study*, J. Geophys. Res., Vol 110, (2005)
- [Büchner 2004] Büchner J., *Three-Dimensional Magnetic Reconnection in Astrophysical Plasmas - Kinetic Approach*,Publicación: Astrophysics and Space Science, Editor: Springer Netherlands, 2004
- [Chaston et al., 2005] Chaston C.C. et al, *Drift kinetics Alfvén waves observed near a reconnection x line in the earths magnetopause.* , Physical Review Letters, **95**, (2005).
- [Cowley 1980] Cowley S.W.H *Plasma populations in a simple open model magnetosphere*, Space Sci. Rev., 26, 217, 1980.
- [Cowley 1982] Cowley S.W.H *The causes of convection in the earth's magnetosphere - A review of developments during de IMS*, Rev. Geophys. Space Phys, **20**, 531
- [Daly et al., 1981] Daly P.W., D.J. Williams, C.T. Russell y E. Keppler, *Particle signature of magnetic flux transfer events at the magnetopause*, J. Geophys. Res., Vol. 86, 1628, 1981
- [Daly y Keppler, 1982] Daly P.W. y E. Keppler, *Observations of a flux transfer event on the Earthward side of the magnetopause*, Planet. Space Sci., 30, 331, 1982
- [Dungey, 1961] Dungey, J.W., *Interplanetary magnetic field and the auroral zones*, Phys. Rev. Lett: **6** 47 (1961).

- [Dungey 1995] Dungey J. W. , *Origins of the concept of reconnection and its application to the magnetopause: A historical Review*, Physics of the Magnetopause, Geophysical Monograph 90, American Geophysical Union, (1995)
- [Deng, 2001] Deng, X. H., H. Matsumoto, H. Kojima, and T. Mukai, *Evidence of whistler-mediated reconnection in the near-Earth space and the characteristics of the associated wave activities*, Proceedings of ISSS-6: 1-4 c Copernicus Gesellschaft (2001)
- [Denton, 1995] Denton, R.E., S.P. Gary, X. Li, B. J. Anderson, J.W. Labelle y M. Lessard, *Low frequency fluctuations in the magnetosheath near the magnetopause*, J. Geophys. Res., 10, 5665, 1995
- [Elphic, 1995] Elphic R.C., *Observations of flux transfer events: A Review*, en Physics of the Magnetopause, Geophys. Monogra. Ser. Vol. 90, edited by P. Song, B.U.O Sonnerup y M.F. Thomsen, p. 225 AGU, 1995
- [Farrugia et al., 1987] Farrugia, C.J. Elphic, D.J, Southwood, D.J. y S.W.H Cowell, *Field and flow perturbations outside thereconnected field line region in flux transfer events: Theory*, Planet. Space Sci., 35, 227, 1987
- [Farrugia et al., 1988] Farrugia, C.J. Rijnbeek, R.P., Saunders M.a. Southwood, D.J., Rodgers, D.j., Smith, M.F., Chaleon, C.P., Hall D.S., Christiansen, P.J y Wooliscroft L.J., *A multi-instrument study of flux transfer event structure*, J. Geophys. Res.
- [Feder et al., 2002] Feder et al, 2002
- [Fuselier et al., 1991] Fuselier S.A., D.M. Klumpar, E.G. Shelley, *Ion reflection and transmission during reconnection at the Earth's subsolar magnetopause* Geophys. Res. Lett., 18, 139,1991
- [Gary 1993] Gary S. P., *Theory of Space Plasma Microinstabilities*, Cambridge Univ. Press, New York, (1993)
- [Giovannelli, 1946] Giovannelli, R.G., *A theory of chromospheric flares*, Nature, **158**, 81, (1946)
- [Giovannelli, 1947] Giovannelli, R.G., *Magnetic and electric phenomena in the sun's atmosphere associated with sunspots*, Mon. Not, Roy. Ast. Soc, 107, 338, (1947)
- [Glassmeier et al., 1993] Glassmeier K.H., U. Motschmann, C. Mazelle, F. Neubauer, K. Sauer, S. Fuselier y M. Acuna, *Mirror modes and fast magnetoacoustic waves near the magnetic pileup boundary of comet P/Halley* J. Geophys. Res., 98, 20,955, 1993
- [Gosling et al, 1990] Gosling J.T., M.F. Thomsen, S.J. Bame, T.G. Onsager, C.T. Russell, *The electron edge of the low latitude boundary layer during accelerated flow events*, Geophys. Res. Lett. 17, 2245, 1990.
- [Gurnett et al., 1979] Gurnett D.A., R.R. Anderson, B.T. Tsurutani, E.J. Smith, G.Pashmann, G. Haerendel, S.J. Bame y C.T. Russell, *Plasma Wave Turbulence at the Magnetopause: Observations from ISEE 1 and 2*, J. Geophys. Res, 84, 7043, 1979
- [Huddleston et al, 1999] Huddleston D.E., R. J. Strangeway, X Blanco-Cano C.T. Russell, M.G. Kivelson y K.K. Khurana, *Mirror mode structures at the Galileo-Io flyby: Istability criterion and dispersion analysis*, J. Geophys. Res., 104, 17479, 1999.

- [Kan, 1988] Kan, J.R., *Theory of patchy and intermittent reconnections for magnetospheric flux transfer events*, J. Geophys. Res, 93, 5613, 1988
- [Karimabadi et al, 2005] Karimabadi H., J. Driscoll, J. Dave, Y. Omelchenko, K. Perumalla, R. Fujimoto, N. Omidi, Lecture Notes in Computer Science, 3732, 573, 2005.
- [Karimabadi et al, 2006] Karimabadi, H., T. B. Sipes, H. White, A. Dmitriev, J. K. Chao, and N. Balac, J. Geophys. Res., 2006
- [Kawano et al., 1992] Kawano H., S. Kokubun y K. Takahasi, *Survey of transient magnetic field events in the dayside magnetosphere*, J. Geophys. Res, 10, 667,1992.
- [Khrabrov, 1998] Khrabrov A.V., B.U.y . Sonnerup, *Magnetic variance analysis form small-amplitude waves and flux transfer events on a current sheet*, J. Geophys. Res, Vol. 103,pp. 11,907-11,918, Junio, 1998.
- [Krauss-Varban et al, 1995] Krauss-Varban, D. and Omidi, N., *Large-scale hybrid simulations of the magnetotial during reconnection*, Geophys. Res. Lett, 22, 3271, 1995.
- [Kuo et al., 1995] Kuo H., C.T. Russell y G. Le, *Statistical studies of flux transfer events*, J. Geophys. Res, Vol. 100 ,pp. 3513-3519, Marzo, 1995.
- [LaBelle et al., 1987] LaBelle et al, *AMPTE IRM observations of waves associated with flux transfer events in the magnetopause*, J. Geophys. Res., Vol. 92, 5827,1987
- [Lanzerotti, 1988] Lanzerotti L., C.G. MacLennan, *Hydromagnetic waves associated with possible Flux Transfer Events*, Astrophysics and Space Science, 144, pp. 279-290, 1988
- [Lavraud B. et al, 2005] Lavraud B. et al, *Characteristics of the magnetosheath electron boundary layer under northward interplanetary magnetic field: implications for high-latitude reconnection*, Journal fo geophysical research, vol **110**, (2005)
- [Lee y Fu, 1985] Lee, L.C. y Fu, Z.F., *A theory of magnetic flux transfer events at the Earth's magnetopause*, Geophys. Res. Lett. 12, 105, 1985.
- [Lee, 1995] Lee, L.C., *A Review of Magnetic Reconnection: MHD Models, Physics of the Magnetopause*, Geophysical Monograph 90, American Geophysical Union, (1995).
- [Le et al., 1999] Le G.,J.T. Gosling, C.T. Russell, R.C. Elphic, M.F. Thompsen y J.A: Newbury, *The magnetic and plasma structure of flux transfer events*, J. Geophys. Res., Vol. 104, No. A1, pp. 233-245, January 1, 1999
- [Levy et al., 1964] Levy R.H., H.E.Petschek y G.L. Siscoe, *Aerodynamic aspects of the magnetospheric flow* AIAA J., 2, 2065, 1964
- [Lockwood y Hapgood, 1997a] Lockwood M.y M.A. Hapgood, 1997, *How the magnetopause transition parameter works*, Geophys. Res. Lett, 23, 373, 1997
- [Lockwood y Hapgood, 1997b] Lockwood M.y M.A. Hapgood, 1997, *On the cause of a magnetospheric flux transfer event*, Geophys. Res. Lett, 103, 26,453, 1998
- [Lui et al., 2005] Lui, A. T. Y.; Jacquey, C, *Critical Issues on Magnetic Reconnection in Space Plasmas*, Space Science Reviews, Volume 116, Issue 3-4, pp. 497-521 02 (2005)

- [Lockwood et al, 2001] Lockwood M et al, *Coordinated Cluster and ground-based instrument observations of transient changes in the magnetopause boundary layer during an interval of predominantly northward IMF: relation to reconnection pulses and FTE signatures*, *Annales Geophysicae* **19**:1613-1640, (2001)
- [Mazelle et al., 2003] C. Mazelle, K. Meziane, D. LeQuéau, M. Wilber, J.P. Eastwood, H. Rème, J.A. Sauvaud, J.M.Bosqued, I. Dandouras, M. McCarthy, L.M. Kistler, B. Klecker, A. Korth, M.B. Bavassano-Cattaneo, G. Pallochia, R. Lundin, A. Balog *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, pp 785-795, 2003
- [Owen et al., 2005] Owen C.J et al, *Cluster electron observations of the separatrix layer during traveling compression regions*, *Geophys. Res. Lett.*, Vol **31**, Issue 3, (2005)
- [Otto, 1990] Otto, A., *3-D resistive MHD computations of magnetospheric physics*, *Comput Phys Commun*, 59, 1990
- [Nishida, 1989] Nishida, A., *Can random reconnection on the magnetopause produce the low latitude boundary layer?*, *Geophys. Res. Lett.* 16, 155, 1989
- [Parker, 1957] Parker, E. N., *Sweet's mechanism for merging magnetic fields in conducting fluids*, *J. Geophys. Res.*, 62,509, (1957)
- [Paschmann et al., 1979] Paschmann G., B. U.Ö. Sonnerup, I. Papamastorakis, N. Sckopke, G. Haerendel, S.J. Bame, J.R. Asbridge, J.T. Gosling, C.T. Russell y R.C. Elphic, *Plasma acceleration at the Earth's magnetopause: Evidence for reconnection*, *Nature*, 282, 243, 1979.
- [Paschmann et al., 1982] Paschmann G., G. Haerendel, I. Papamastorakis, N. Sckopke, S.J. Bane, J. T. Gosling y C.T. Russell, *Plasma and magnetic field characteristics of magnetic flux transfer events*, *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 2159, 1982
- [Paschmann et al., 1986] Paschmann G., I. Papamastorakis, W. Baumjohann, N. Sckopke, C.W. Carlson, B. U.Ö. Sonnerup, H. Lühr, *The magnetopause for large magnetic shear: AMPTE/IRM observations*, *J. Geophys. Res.*, 91, 11099, 1986
- [Paschmann et al., 1989] Paschmann G., S.A. Fuselier, D.M. Klumpar, *High speed flows of H^+ and He^{++} ions at the magnetopause*, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 567, 1989.
- [Petschek, 1964] Petschek, H. E., *Magnetic field annihilation*, in *AAS_NASA Symposium on the Physics of Solar Flares*, NASA Spec. Publ SP- 50
- [Phan et al., 2000] Phan T.D. et al, *Extended magnetic reconnection at the Earth's magnetopause from detection of bi-directional jets*, *Nature*, 404, April 2000 (1964)
- [Pu et al., 1990] Pu, Z. Y., P.T. Huo y Z.H.Liu, *Vortex-induced tearing mode instability as a source of flux transfer events*, *J. Geophys. Res.*, 95, 18861, 1990
- [Retino A. et al, 2005] Retino A. et al, *Cluster multispacecraft observations at the high-latitude duskside magnetopause: implications for continuous and component magnetic reconnection*, *Annales Geophysicae* **23**: 461-473,(2005)

- [Rijnbeek et al., 1982] Rijnbeek R.P.S., W.H. Cowley, D.J. Soutwood y C. T. Russell, *Observations of reverse polarity flux transfer at the Earth's magnetopause*, Nature, 300, 23, 1982.
- [Rijnbeek et al., 1984] Rijnbeek R.P.S., W.H. Cowley, D.J. Soutwood y C. T. Russell, *A survey of dayside flux transfer events observed by the ISEE 1 and 2 magnetometers*, J. Geophys. Res., 89, 786, 1984
- [Rijnbeek, 1987] Rijnbeek R.P.S., *A magnetic boundary signature within flux transfer events*, Planet Space Sci., 35, 871, 1987
- [Russell y McPherron, 1973] Russell, C.T. y L. McPherron, *The magnetotail and substorms*, Space. Sci. Rev. 15,205,1973.
- [Russell y Elphic, 1978] Russell, C.T. y R.C.Elphic, *Initial ISEE magnetometer results: Magnetopause observations*, Space Sci Rev 22, 691, (1978)
- [Russell y Elphic, 1979] Russell, C.T. y R.C.Elphic, *ISEE observations of flux transefer events at the dayside magnetopause*, Geophys. Res. Lett., 6, 33, (1979)
- [Russell et al, 1987] Russell, C.T. , W. Riedler, K. Schwingenschuh y Y. Yeroshenko, *Mirror insstability in the magnetosphere of the comet Halley*, Geophys. Res. Lett., 11, 644, 1987
- [Russell, 1995] Russell C.T., *Advances of Space Research 15: Physics of Collisionless Shocks*, Pergamon, Oxford,1995.
- [Russell et al, 1999] Russell, C.T. , Huddleston, D.E., Strangeway, R.J., Blanco-Cano X., Kivelson, M.G., Khurana, K.K., Frank L.A., Paterson, W., Gurnett, D.A., Kurth W.S., *Mirror-mode structures at Galileo-Io flyby: Observations* J. Geophys. Res., 104, 17471-17478, 1999.
- [Russell et al, 2006] Russell, C.T., J.S. Leisner, C.S. Arridge, M.K. Dougherty, X.Blanco-Cano *Nature of magnetic fluctuations in Saturn's middle magnetosphere* , J. Geophys. Res., Vol. 111, A12205, 2006
- [Sato et al., 1986] Sato, T., R.J. Walker y M. Ashour-Abdalla, *Driven magnetic reconnection in three dimensions: Energy conversion and field-aligned currents*, J. Geophys. Res, 89, 9761, 1984
- [Saunders et al., 1983] Saunders M.A., C.T. Russell y N. Sckopke, *Initial ISEE observations of the magnetopause and low latitude boundary layer: a review*, J. Geophys. **52**, 190, 1983.
- [Saunders et al., 1984] Saunders M.A., C.T. Russell y N. Sckopke, *Flux transfer events: Scale size and interior structure*, Geophys. Tes. Lett. 11, 131, 1984
- [Scholer et al., 1982] Scholer M., D. Hovestadt, F.M. Ipavich y G. Gloecker, *Energetic protons, Alpha particles, and electrons in magnetic flux transfer events*, Geophys. Res. Lett. 11, 131, 1984

- [Scholer, 1988] Scholer M., *Magnetic flux transfer event at the magnetopause based on sigle X line bursty reconnection*, Geophys. Res. Lett. 15, 291, 1988
- [Scholer, 1995] Scholer M., *Models of flux transfer events*, Physics of the Magnetopause, Geophys. Monogr. Ser., vol. 90, edited by P. Song et al, pp. 235, AGU, Washington, D.C., 1995
- [Scudder et al., 1984] Scudder J.D., Ogilvie, K.W y Russell, C.T., *The relation of flux transfer events to magnetic reconnection*, Magnetic Reconnection in Space and Laboratory Plasmas, Edited by Hones, E.W.Jr, p.151 AGU, Washington, D.C., 1984
- [Sonnerup y Cahill, 1967] B.U.Ö . Sonnerup y L.J. Cahill, *Magnetopause Structure and Attitude from Explorer 12 Observations*, J. Geoph. Res.,
- [Sonnerup, 1976] B.U.Ö . Sonnerup, *Magnetopause and boundary layer*, Physics of solar planetary environments, ed. D.J. Williams, AGU, Washington DC, pp. 541-557 1976.
- [Sonnerup et al, 1976] B.U.Ö . Sonnerup, G. Paschmann, I. Papamatorakis, N. Scokopke, G. Haerendel, S.J. Bame, J.R. Asbridge, J.T. Gosling, C.T. Russell *Evidence for magnetic reconnection at the Earth's magnetopause*, J. Geophys. Res., 86, 10 049,1981
- [Smith y Owen, 1992] Smith M.F. y C.J. Owen, *Temperature anisotropies in a magnetospheric FTE*, Geophys. Res. Lett., 19, 1907, 1992
- [Song et al., 1994] Song P., G. Le y C.T. Russell., *Observational differences between flux transfer events and surface waves at the magnetopause*, J. Geophys. Res., Vol. 92, No. A2
- [Southwood, 1985] Southwood D.J., *Theoretical aspects of ionosphere-magnetosphere-solar wind coupling*, Adv. Space. Res.,5 (4), 7, 1985
- [Southwood et al., 1986] Southwood D.J., M.A. Sauders, M.W. Dunlop, W.A.C. Mier-Jedrzejowicz y R.P. Rijnbeek *A survey of flux transfer events recorder y UKS spacecraft magnetometer*, Planet Space Sci, 34, 1349, 1986
- [Southwood et al., 1988] Southwood D.J., C.J.Farrugia y M.A.Sauders, *What are flux transfer events?*, Planet Space Sci., 36, 503, 1988
- [Speiser et al, 1982] Speiser, T.W y Williams D.J *Magnetopause modeling: flux transfer events and magnetosheath quasi trapped distributions*, J. Geophys. Res., **87**, 2177
- [Sundkvist D. et al., 2005] Sundkvist D. et al, *Multi-spacecraft determination of wave characteristics near the proton gyrofrequency in high altitude cusp*, Annales Geophysicae: **28** 83-995 (2005)
- [Sweet, 1958] Sweet, P. A., *The neutral point theory of solar flares*, in Proceedings of the International Astronomical Union Symposium on Electromagnetic Phenomena in Cosmic Phys, Cambridge University Press, (1958)
- [Thomsen et al., 1987] Thomsen M.F., J.A. Stansberry, S.J. Bame, S.A. Fuselier y J.T. Gosling *Ion and electron velocity distributions within flux transfer events*. Journal of Geophysical Research, 92, 12,127, 1987

- [Trattner et al, 2005] Trattner K.J. et al, *Reconnection sites of spatial cusp structures*. Journal of Geophysical Research, vol 110, (2005)
- [Tsyganenko et al, 1995] Tsyganenko *Ion and electron velocity distributions within flux transfer events*. J 1995
- [Wild et al] Wild et al, *Simultaneous in-situ observations of the signatures of dayside reconnection at the high-latitude magnetopause*, Annales Geophysicae **23**: 445-460,(2005)
- [Wu, 1990] Wu, C.C., *Formation, structure and stability of MHD intermediate shocks*, J. Geophys. Res., 95, 8149, 1990
- [Yin et al, 2007] L. Yin, D. Winske, and W. Daughton, *Kinetic Alfvén waves and electron physics*, Phys. Plasmas 14, 062105, 2007
- [Zhang H. et al, 2005] Zhang H. et al *Stagnant exterior cusp region as viewed by energetic electrons and ions: a statical study using cluster research with adaptive particle imating detectors (RAPID) data*, J Geophys Res, Vol **110** (2005)
- [1] Press H.W., Teukolsky S.a, et al, *Numerical Recipes in FORTRAN, The art of Scientific Computing*, Cambridge University Pres, 1992