



MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



DINÂMICA DA VARIABILIDADE DO FLUXO DE ELÉTRONS NO CINTURÃO EXTERNO DE RADIAÇÃO DU- RANTE OCORRÊNCIAS DE EJEÇÃO DE MASSA CORONAL

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

(PIBIC/CNPq/INPE) PROCESSO: 144700/2020-4

VIGÊNCIA: DE 01/09/2020 A 31/08/2021

Verenna Rêgo Sant'Anna (EEL-USP, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: verenna@usp.br

Ligia Alves da Silva (INPE, State Key Laboratory of Space Weather,
National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Ori-
entadora)

E-mail: ligia.silva@inpe.br

Flavia Reis Cardoso Rojas (EEL-USP, Co-orientadora)

E-mail: flaviacardoso@usp.br

Livia Ribeiro Alves (INPE, Co-orientadora)

E-mail: livia.alves@inpe.br

Agosto de 2021

RESUMO

O cinturão externo de radiação é preferencialmente povoado por elétrons que são essencialmente governados pela dinâmica do movimento das partículas aprisionadas. Estas partículas energéticas executam movimentos periódicos complexos, em que cada um desses movimentos está associado a um dos três invariantes adiabáticos. O movimento de giro em torno da linha do campo magnético (primeiro invariante adiabático), o movimento de salto ao longo da linha do campo magnético (segundo invariante adiabático) e movimento de deriva ao redor da Terra (terceiro invariante adiabático). Quando as estruturas do vento solar atingem a magnetosfera da Terra, podem gerar ondas de choque, as quais impactam direta ou indiretamente a magnetosfera externa e interna, e consequentemente podem contribuir para violar um ou mais invariantes adiabáticos. Isso significa que o fluxo de elétrons do cinturão externo de radiação pode diminuir ou aumentar. Os mecanismos dinâmicos associados a tal variabilidade no fluxo de elétrons aprisionados, são investigados neste trabalho a partir da caracterização de ondas magnetosféricas do tipo chorus no modo whistler. Contudo, é importante destacar que as análises são realizadas para diferentes tipos de ondas de choque, como *fast-reverse* e *fast-forward*. Os resultados mostraram que a variabilidade no fluxo de elétrons de alta energia foi observada apenas durante os choques quase perpendiculares. Nestes casos, as ondas chorus apresentaram características sugestivas de ocorrência de perda localizada e/ou aceleração localizada. Por outro lado, durante os choques quase paralelos não se observa nenhuma variabilidade no fluxo de elétrons.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. OBJETIVO.....	4
2.1. Objetivo Geral.....	4
2.2. Objetivos Específico.....	5
3. INSTRUMENTAÇÃO.....	5
3.1. Instrumentos a bordo das sondas Van Allen (VAP-A/B)	5
3.2. Instrumentos a bordo do satélite Advanced Composition Explorer (ACE).....	5
3.3. Instrumentos a bordo do satélite Global Geospace Science Wind (WIND)....	5
4. METODOLOGIA.....	6
5. RESULTADOS.....	7
5.1. Condições do meio interplanetário e do fluxo de elétrons de alta energia.....	7
5.1.1. Estudo de caso 1.....	7
5.1.2. Estudo de caso 2.....	9
5.1.3. Estudo de caso 3.....	11
5.1.4. Estudo de caso 4.....	13
5.2. Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e seleção da Sonda Van Allen.....	15
5.2.1. O papel das onda chorus na variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia.....	16
6. CONCLUSÃO.....	22
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

1. INTRODUÇÃO

O planeta Terra é protegido pela magnetosfera de partículas carregadas provenientes do vento solar e raios cósmicos. As partículas carregadas de altas energias interagem com o campo geomagnético ao entrarem na magnetosfera, assim podem ser capturadas e aprisionadas, realizando movimentos confinados em torno da Terra. Esta dinâmica aprisiona milhares de partículas carregadas, dando origem aos cinturões de radiação de Van Allen, conhecidos como cinturão interno e externo de radiação [Northrop and Teller 1960; Roederer, 1970].

O cinturão externo de radiação é significativamente mais vulnerável à passagem de estruturas do vento solar. Este é preferencialmente populado por elétrons, enquanto o cinturão interno é preferencialmente populado por prótons. A dinâmica dos cinturões de Van Allen são essencialmente governados pela dinâmica do movimento das partículas aprisionadas, e seus movimentos são regidos pela força de Lorentz. Esta força é resultante da superposição entre a força elétrica e a força magnética, que são provenientes de um campo elétrico e de um campo magnético, respectivamente, atuando sobre uma partícula carregada eletricamente que se move no espaço [Roederer, 1970].

A dinâmica de aprisionamento de partículas carregadas nos cinturões de radiação, assim como, a variabilidade do fluxo de partículas, principalmente no cinturão externo ($\sim 3R_E - 7R_E$), e seus relativos impactos no ambiente espacial e atmosférico terrestre, são temas decisivos para a segurança do ambiente espacial e conhecimento da atmosfera da Terra.

Portanto, entender como estruturas do vento solar, como as ejeções de massa coronal interplanetárias (ICMEs), podem impactar a magnetosfera da Terra a partir de um grande depósito de energia quase abruptamente [Ponomarev et al., 2006], é o assunto de interesse deste trabalho. As ICMEs podem também excitar ondas magnetosféricas nos cinturões de Van Allen numa vasta faixa de frequências, como por exemplo as ondas chorus no modo whistler (centenas de Hz a aproximadamente 10 kHz) [e.g., Gurnett and O'Brien, 1964; Miyoshi et al., 2007]. Estas, ao interagir ressonantemente com os elétrons aprisionados no cinturão externo de radiação, podem violar o primeiro e/ou segundo invariantes adiabáticos, causando assim perda/aceleração localizada de partículas [Da Silva et al., 2019; Jaynes et al., 2015]. O mecanismo dinâmico dirigido pelas ondas chorus durante estas interações ressonantes pode contribuir significativamente com as variabilidades do fluxo de partículas carregadas no cinturão de radiação externo. Esta variabilidade pode ser identificada a partir do aumento (*enhancement*) ou diminuição (*dropout*) do fluxo de partículas [Baker, 1994; Baker and Kanekal, 2008; Alves et al. 2016, Da Silva et al., 2019], que deve atingir pelo menos 1 ordem de grandeza [Turner et al, 2012].

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

- O objetivo geral deste projeto é identificar os principais mecanismos dinâmicos associados a variabilidade do fluxo de elétrons em períodos de ICMEs.

2.2. Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica dos temas científicos como: cinturões de radiação de Van Allen, fluxo de elétrons no cinturão externo, *dropout* e *enhancement* no cinturão externo e dinâmica do cinturão externo durante chegada de ICMEs;
- Analisar os dados do instrumento Relativistic Electron Proton Telescope – REPT [Baker et al., 2013], instalado a bordo das sondas Van Allen Probes para identificar a variabilidade do fluxo de elétrons (*enhancement*, *dropout*) no cinturão externo de radiação;
- Analisar os dados dos instrumentos Magnetic Field Experiment (MAG) e Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor (SWEPAM) instalados a bordo do satélite Advanced Composition Explorer (ACE) para estudar os parâmetros do vento solar no ponto Lagrangeano L1 e identificar os períodos de ICMEs.
- Análise dinâmica e seleção dos eventos durante ocorrências de ICME;
- Identificação dos principais mecanismos associados à variabilidade do cinturão externo de radiação em períodos de choque;
- Analisar os dados do instrumento Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) para detecção da atividade de ondas chorus.
- Desenvolvimento do relatório e confecção de trabalhos para divulgação em conferências.

3. INSTRUMENTAÇÃO

O presente trabalho utiliza instrumentos a bordo de satélites *in situ* (Cinturão externo de radiação), assim como fora da magnetosfera (ponto Lagrangeano L1) para analisar o fluxo de elétrons de alta energia, atividade de ondas chorus e condições do meio interplanetário.

3.1. Instrumentos a bordo das sondas Van Allen (VAP-A/B)

- Relativistic Electron Proton Telescope (REPT)
- Magnetic Electron Ion Spectrometer (MAGEIS)
- Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS)

3.2. Instrumentos a bordo do satélite Advanced Composition Explorer (ACE)

- Magnetic Field Experiment (MAG)
- Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor (SWEPAM)

3.3. Instrumentos a bordo do satélite Global Geospace Science Wind (WIND)

- Solar Wind and Suprathermal Ion Composition Experiment (SMS)
- Solar Wind Experiment (SWE)

4. METODOLOGIA

O fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação externo é obtido a partir do instrumento Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) [Baker et al., 2013]. A potência espectral do campo magnético é obtida a partir do instrumento Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science [EMFISIS, Kletzing et al., 2013] em que é possível detectar as atividades de ondas chorus. Os instrumentos REPT e EMFISIS estão a bordo das sondas Van Allen Probes A e B [Mauk et al., 2012]. Os parâmetros do vento solar no ponto Lagrangeano L1 são estudados a partir dos instrumentos Magnetic Field Experiment (MAG), Solar Wind Electron, Proton e Alpha Monitor (SWEPAM) que estão a bordo do satélite Advanced Composition Explorer (ACE) [Stone et al., 1998].

Para selecionar os eventos em estudo, utiliza-se os dados das sondas Van Allen, do satélite ACE e uma lista (https://www.cfa.harvard.edu/shocks/wi_data/) que disponibiliza informações acerca dos diferentes tipos de ondas de choque, conforme mostrado na Tabela 1. Quatro eventos foram selecionados, sendo o primeiro e o segundo eventos coincidentes com a classificação quase-paralela ($0^\circ < TH_BN < 45^\circ$), enquanto os terceiro e quarto eventos são coincidentes com a classificação quase-perpendiculares ($45^\circ < TH_BN < 90^\circ$). A primeira análise realizada com estes eventos diz respeito às condições do meio interplanetário, com as quais é possível realizar a identificação do tipo de estrutura do vento solar, e seus potenciais para causar impacto na magnetosfera. Em seguida, analisa-se a variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação externo, para identificar as ocorrências de *dropouts* e/ou *enhancements*. Para finalizar o estudo, calcula-se a potência espectral do campo magnético para identificar a atividade das ondas chorus. Utilizando a técnica que fornece a informação das características destas ondas a partir das medições dos bursts em altíssima resolução, pode-se verificar as potencialidades das ondas chorus para acelerar elétrons ou lançá-los no cone de perda.

Tabela 1: Ângulo de inclinação das estruturas do vento solar e suas respectivas velocidades e tipos de choques. Estes parâmetros de ondas de choque foram calculados a partir dos dados do satélite Wind.

Caso	1	2	3	4
Data	08/01/2013	04/24/2015	07/19/2016	08/03/2016
Horário	13:23	18:17	23:02	12:21

Caso	1	2	3	4
Velocidade do choque/MC	108.8 km/s	339.2 km/s	265.1 km/s	291.6 km/s
Velocidade do choque/VC	282.2 km/s	322.9 km/s	512.8 km/s	365.3 km/s
Tipo de choque	Fast Reverse	não identificado	Fast Forward	Fast Reverse
ThetaBn/MC	39.9°	28.9°	60.2°	66.8°
ThetaBn/VC	25.1°	28.8°	74.3°	87.6°

5. RESULTADOS

5.1. Condições do meio interplanetário e variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia

Os eventos foram selecionados em períodos de ocorrência de CMEs. As Figuras 1 a 4 mostram o fluxo de elétrons de alta energia, nível 2, 10 MeV (painel a) e níveis de 1,8-3,4 MeV (painel b), parâmetros do vento solar, bem como a velocidade do vento solar, a densidade, as componentes do campo magnético do meio interplanetário e o campo magnético total (painéis c - f), e a altura da magnetopausa (panel g), que foi estimada através do modelo empírico de Shue et al. [1998].

5.1.1. Estudo de caso 1

A Figura 1 mostra o primeiro evento selecionado de acordo com o ângulo de inclinação, o qual se refere ao tipo quase-paralelo ($0^\circ < \text{Th}_{\text{Bn}} < 45^\circ$), com onda de choque classificada como *fast reverse* (FR), ou seja, essa onda se propaga em direção ao sol. O fluxo de elétrons de alta energia não apresenta variação significativa nos níveis de energia analisados (painéis a, b). As condições do meio interplanetário apresentam pouca ou nenhuma perturbação, com velocidades do vento solar variando entre 300 e 400 km/s, densidade de prótons $N_p < 5$ prótons/cm³ e B_x , B_y , B_z e B_t do meio interplanetário $FMI < 5nT$. Isso impacta diretamente a altura da magnetopausa, que está relaxada ($RMP > 12 RE$) durante todo o evento. Portanto, este evento não será investigado quanto a atividade de ondas magnetosféricas.

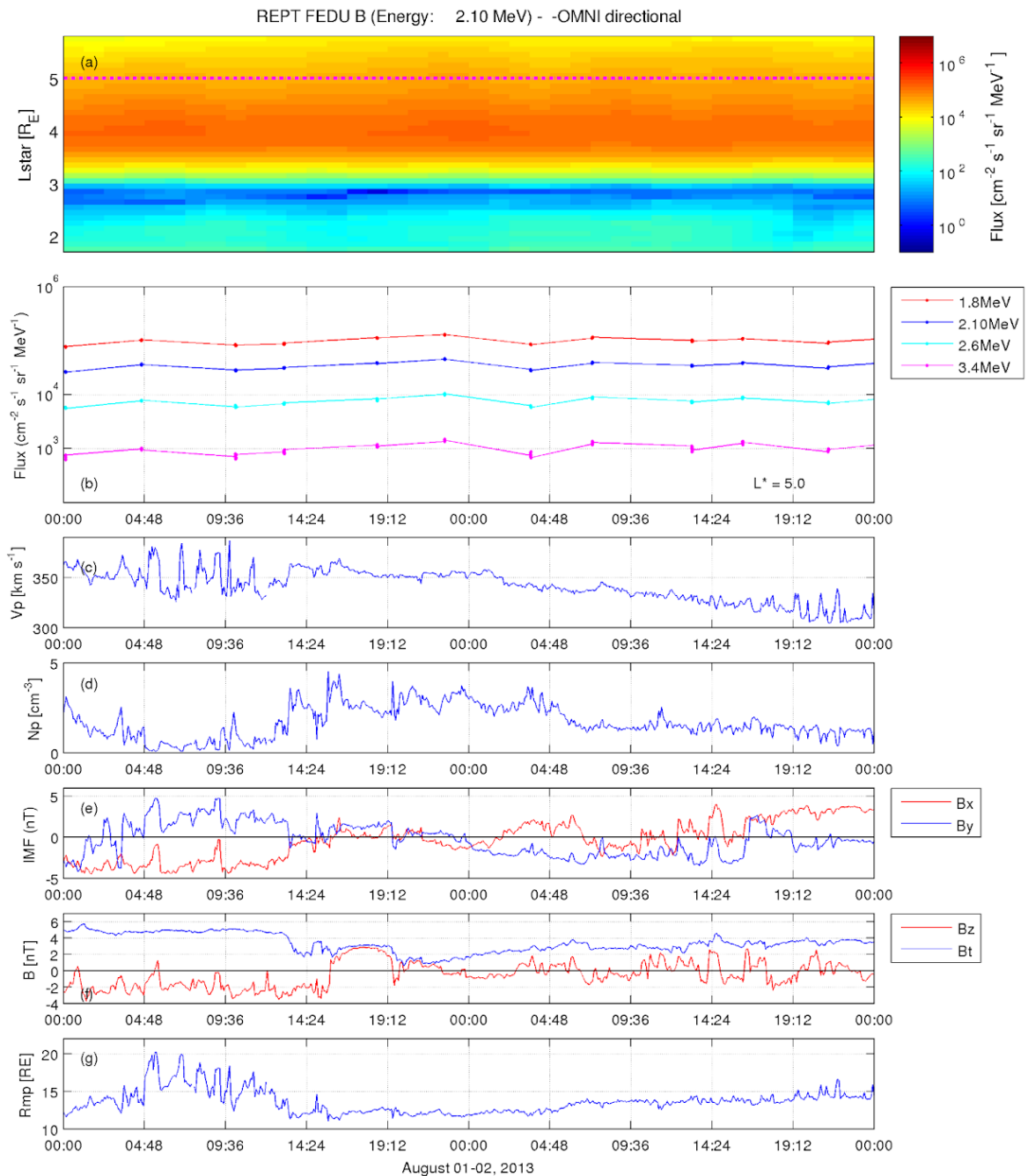


Figura 1: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas no meio interplanetário (N_p); (e) B_x e B_y , componentes do campo magnético interplanetário (IMF) em x e em y; (f) Intensidade do IMF, (B_t) e B_z , a componente do IMF em z. O fluxo de elétrons foi obtido pelo instrumento REPT a bordo da Van Allen Probes B. O V_p , N_p , B_t , B_z , B_x e B_y foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1; (g) compressão da magnetopausa pelo

modelo de Shue [Shue et al., 1998]. O Vp, Np, e Bz foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1.

5.1.2. Estudo de caso 2

A Figura 2 mostra o segundo evento selecionado de acordo com o ângulo de inclinação o qual se refere ao tipo quase-paralelo ($0^\circ < \theta_{Bn} < 45^\circ$), com onda de choque sem classificação. O fluxo de elétrons de alta energia não apresenta variação significativa nos níveis de energia analisados (painéis a, b). As condições do meio interplanetário apresentam pouca ou nenhuma perturbação, que são semelhantes ao evento da Figura 1. O fluxo de elétrons apresenta-se estável (painéis a, b) e a altura da magnetopausa permanece relaxada ($RMP > 10 RE$) durante todo o período analisado. Portanto, este evento não precisa ser analisado quanto ao período de atividade de ondas magnetosféricas.

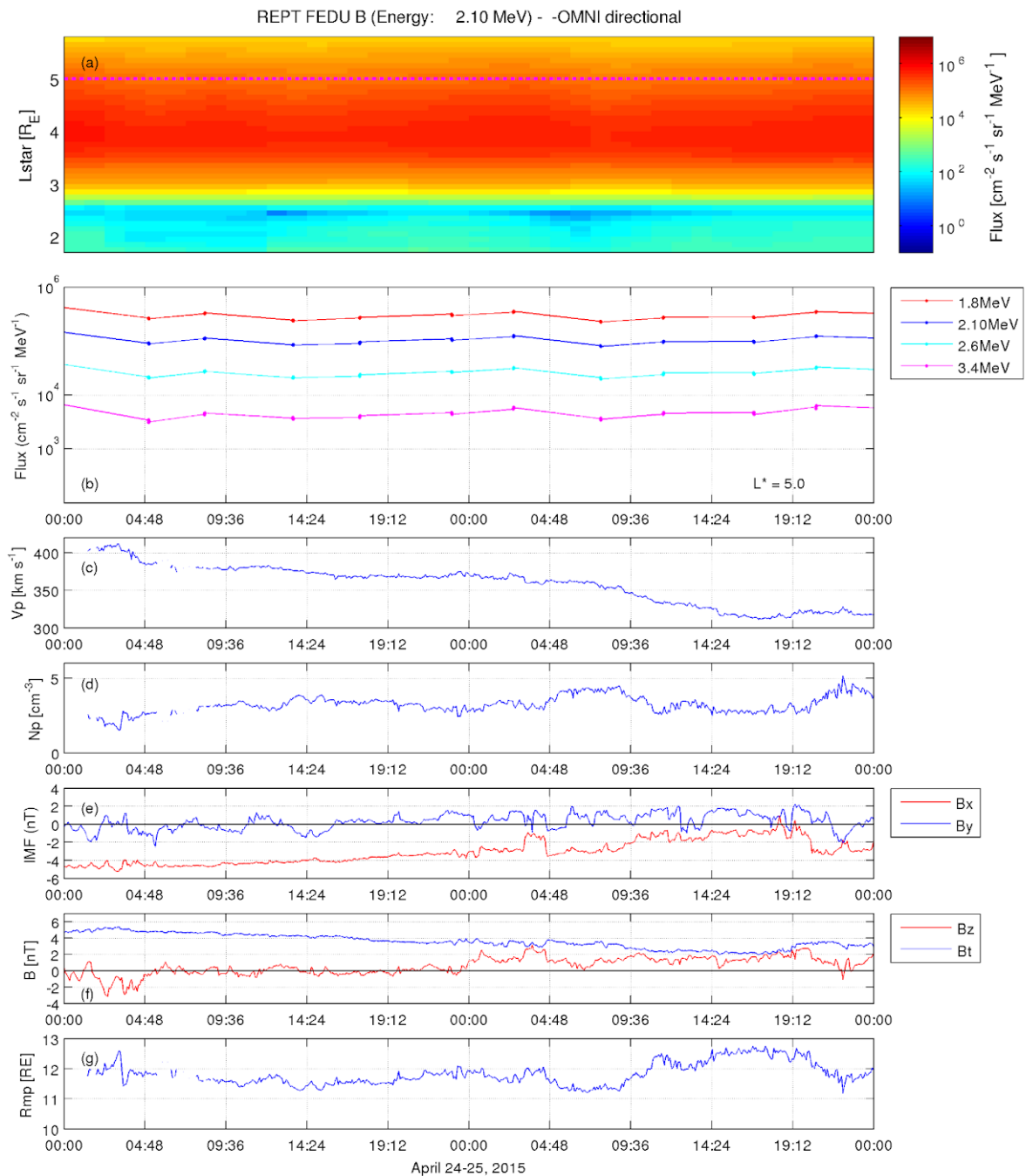


Figura 2: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas no meio interplanetário (N_p); (e) B_x e B_y , componentes do campo magnético interplanetário (IMF) em x e em y; (f) Intensidade do IMF, (B_t) e B_z , a componente do IMF em z. O fluxo de elétrons foi obtido pelo instrumento REPT a bordo da Van Allen Probes B. O V_p , N_p , B_t , B_z , B_x e B_y foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1; (g) compressão da magnetopausa pelo

modelo de Shue [Shue et al., 1998]. O Vp, Np, e Bz foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1.

5.1.3. Estudo de caso 3

A Figura 3 mostra o terceiro evento selecionado de acordo com o ângulo de inclinação o qual se refere ao tipo quase-perpendicular ($45^\circ < \theta_{Bn} < 90^\circ$), com onda de choque classificada como fast forward (FF). Isto significa que esta onda se propaga em direção à Terra. O fluxo de elétrons de alta energia apresenta uma diminuição expressiva que atinge aproximadamente $L_{star} > 4.8$ (painéis a, b), com mais 2 ordens de magnitude. Portanto, configura-se como *dropout*. As condições do meio interplanetário são perturbadas nas últimas horas do dia 19 de julho, o que confirma a presença de um CMEs, também identificado através da tabela de Richardson. A velocidade do vento solar aumenta abruptamente em mais de 100 km/s concomitante com o aumento da densidade (Np) que atinge ~ 40 prótons/cm³. As componentes do campo magnético interplanetário Bx, By, Bz e o campo magnético total Bt atingem valores IMF > 20 nT. Isso impacta diretamente a altura da magnetopausa, que é comprimida (RMP $\sim 5RE$) no momento da chegada dessa estrutura do vento solar, o que por sua vez contribui para a perda de partículas fora da magnetopausa através do mecanismo de "magnetopause shadowing". Portanto, este evento deve ser analisado quanto a atividade de ondas whistler no modo chorus, a qual permite a identificação de outros mecanismos responsáveis pela variabilidade no fluxo de elétrons de alta energia observados aqui.

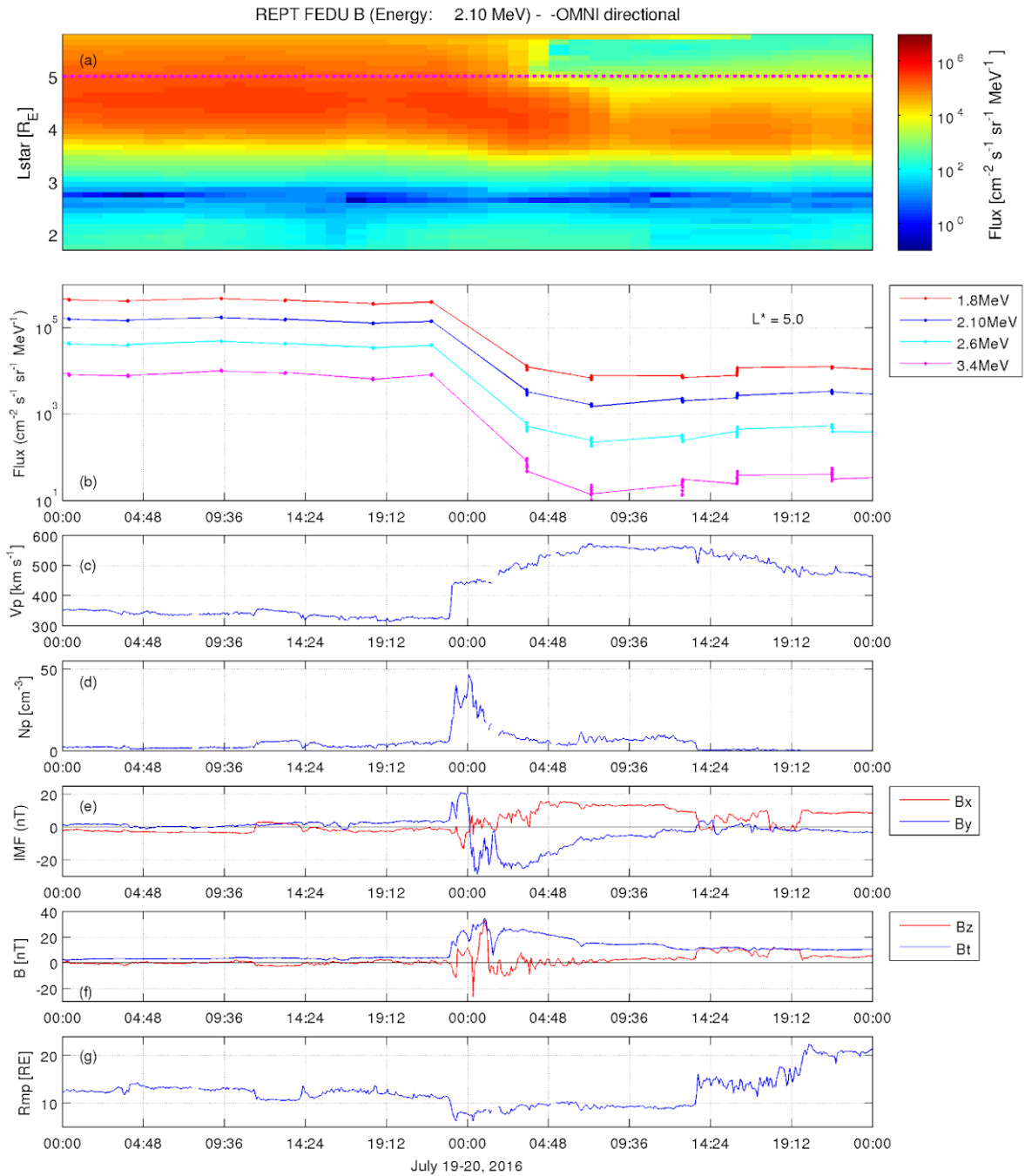


Figura 3: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas no meio interplanetário (N_p); (e) B_x e B_y , componentes do campo magnético interplanetário (IMF) em x e em y; (f) Intensidade do IMF, (B_t) e B_z , a componente do IMF em z. O fluxo de elétrons foi obtido pelo instrumento REPT a bordo da Van Allen Probes B. O V_p , N_p , B_t , B_z , B_x e B_y foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1; (g) compressão da magnetopausa pelo

modelo de Shue [Shue et al., 1998]. O V_p , N_p , e B_z foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1.

5.1.4. Estudo de caso 4

A Figura 4 mostra o quarto evento selecionado de acordo com o ângulo de inclinação o qual se refere ao tipo quase-perpendicular ($45^\circ < \text{Th_Bn} < 90^\circ$), com onda de choque classificada como fast reverse (FR). Isto significa que esta onda se propaga em direção ao sol. O fluxo de elétrons de alta energia apresenta uma diminuição (*dropout*) seguida de um aumento (*enhancement*) que atinge aproximadamente 2 ordens de grandeza (painéis a, b). As condições do meio interplanetário são consideravelmente perturbadas por volta das 12h00 UT do dia 3 de agosto, em que a velocidade do vento solar aumenta gradativamente em mais de 100 km/s, principalmente após o aumento da densidade. As componentes B_x , B_y , B_z e o campo magnético total B_t atingem valores IMF $< 10\text{nT}$. A altura da magnetopausa não apresenta forte compressão (RMP $\sim 8\text{RE}$) no momento da chegada desta estrutura. Embora seja suficiente para ativar o mecanismo de *magnetopause shadowing*, que contribui para a ocorrência de *dropout* observada. O período de repopulação do fluxo de elétrons ocorre concomitante a possíveis assinaturas de flutuações alfvénicas, que normalmente estão associadas a chegada de uma estrutura do vento solar chamada de feixes rápidos (*High Speed solar wind Stream - HSS*). Esta análise sugere que é de grande importância investigar o papel das ondas chorus na variabilidade do fluxo de elétrons para este evento.

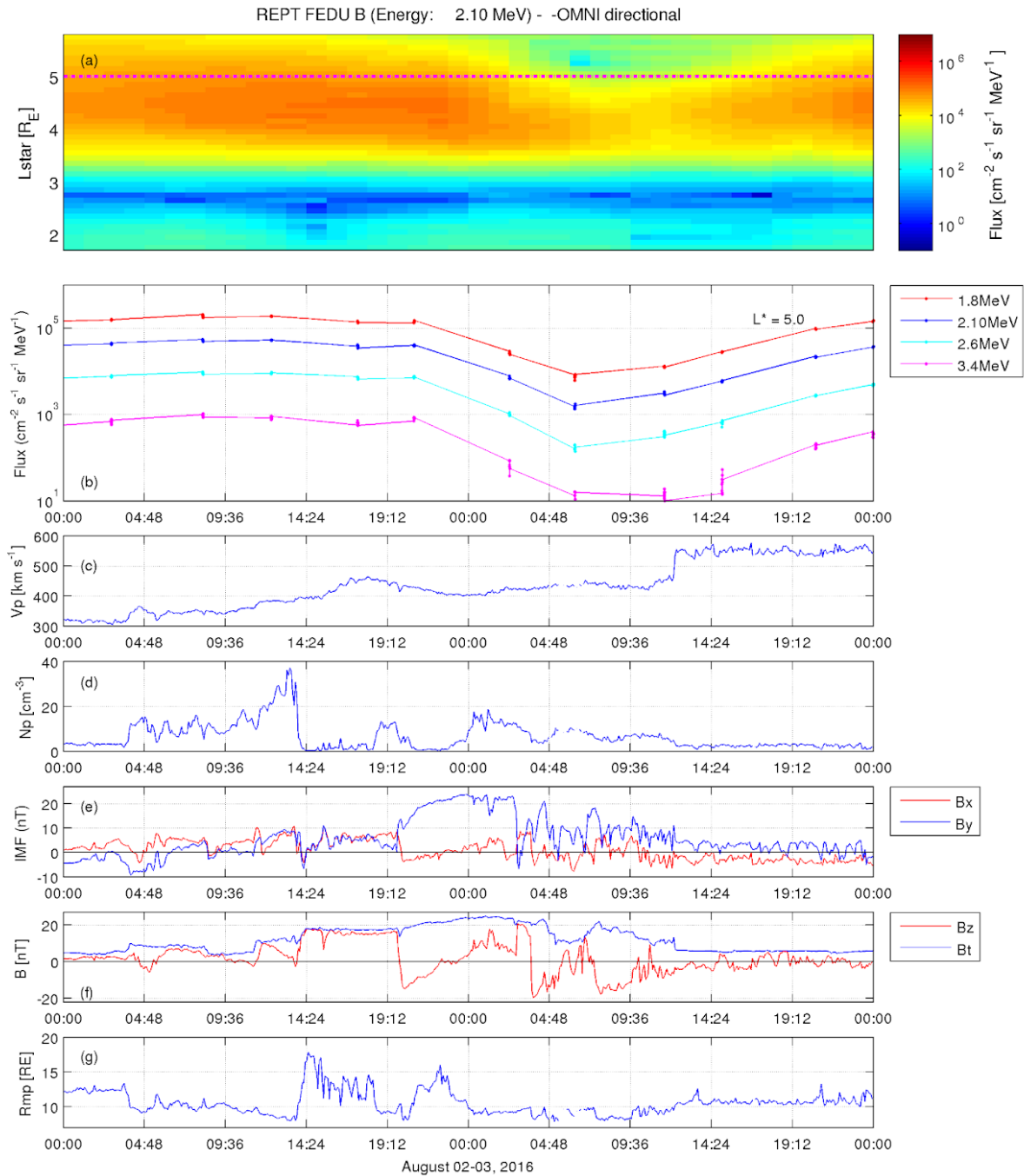


Figura 4: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas no meio interplanetário (N_p); (e) B_x e B_y , componentes do campo magnético interplanetário (IMF) em x e em y; (f) Intensidade do IMF, (B_t) e B_z , a componente do IMF em z. O fluxo de elétrons foi obtido pelo instrumento REPT a bordo da Van Allen Probes B. O V_p , N_p , B_t , B_z , B_x e B_y foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1; (g) compressão da magnetopausa pelo

modelo de Shue [Shue et al., 1998]. O Vp, Np, e Bz foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1.

5.2. Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e seleção da Sonda Van Allen

Conforme discutido na seção anterior, apenas os eventos 3 e 4 serão analisados quanto ao papel das ondas chorus na variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia. Portanto, apresenta-se abaixo as Figuras 5 e 6, as quais referem-se ao fluxo de elétrons de alta energia (canais de 1.8 MeV até 4.2 MeV) utilizando as sondas Van Allen A e B, respectivamente. As linhas verticais vermelhas representam os horários do Theta Bn, as quais serão utilizadas como referenciais para as análises desta seção.

Observa-se na Figura 5 que ligeiramente após o horário de identificação do ângulo de inclinação da estrutura do vento solar, que é um CME, o fluxo de elétrons diminui significativamente. Identifica-se claramente que a sonda A é a mais apropriada para as análises das ondas chorus considerando o evento 3, pois esta sonda está no apogeu poucas horas após o registro do Theta_Bn.

Evento 3

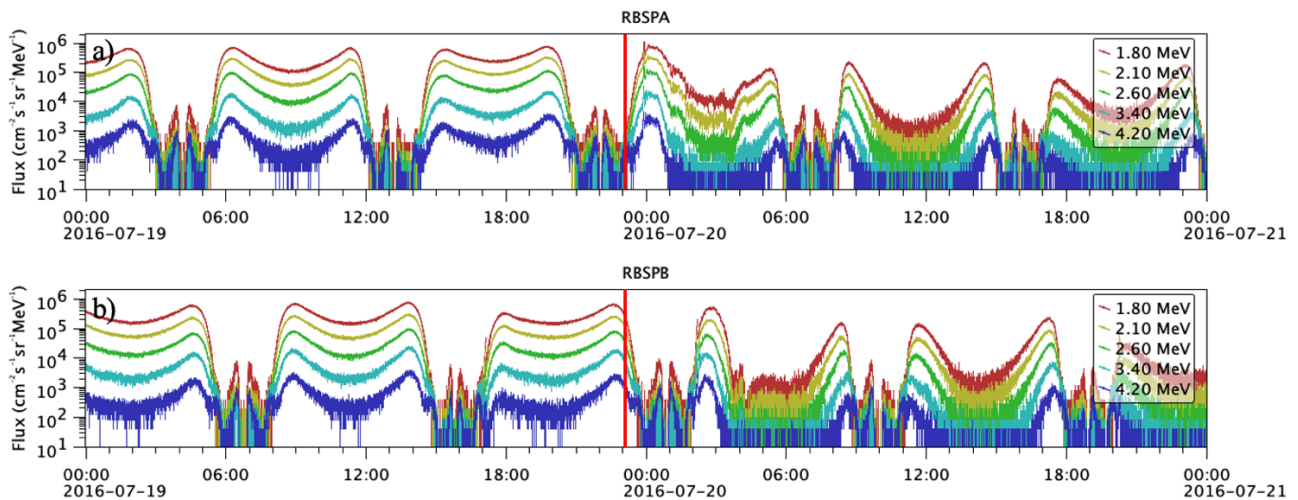


Figura 5: a) Fluxos de elétrons de alta energia obtidos a partir do instrumento REPT (VAP-A) referentes aos canais de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV e 4,2 MeV para o período de 48 h (00:00 Ut 19 de julho de 2016 às 00:00 UT 21 de julho de 2016). b) Fluxos de elétrons de alta energia obtidos a partir do instrumento REPT (VAP-B) referentes aos canais de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV e 4,2 MeV para o período de 48 h (00:00 UT de 19 de julho - 00:00 UT de 21 de julho de 2016). As linhas verticais vermelhas representam os horários do Theta_Bn.

Observa-se na Figura 6 que ligeiramente após o horário de identificação do ângulo de inclinação da estrutura do vento solar, que é um HSS, o fluxo de elétrons diminui consideravelmente e em seguida aumenta levemente. Identifica-se

claramente que a sonda B é a mais apropriada para as análises das ondas chorus considerando o evento 4, pois esta sonda está no apogeu concomitante ao registro do Theta_Bn.

Evento 4

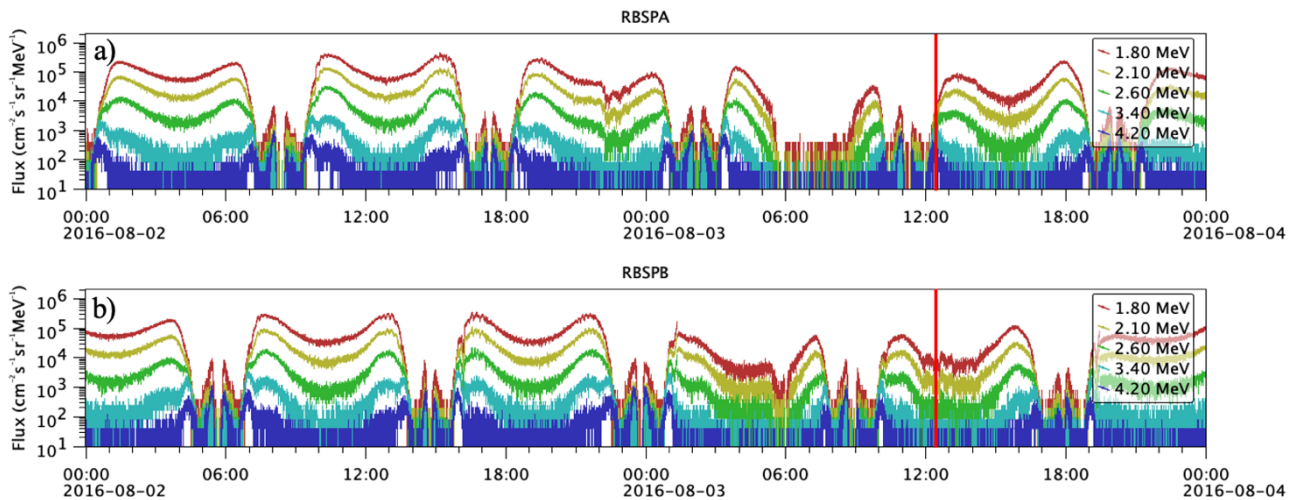


Figura 6: a) Fluxos de elétrons de alta energia obtidos a partir do instrumento REPT (VAP-A) referentes aos canais de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV e 4,2 MeV para o período de 48 h (00:00 UT, 02 de agosto de 2016 às 00:00 UT, 04 de agosto de 2016). b) Fluxos de elétrons de alta energia obtidos a partir do instrumento REPT (VAP-B) referentes aos canais de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV e 4,2 MeV para o período de de 48 h (00:00 UT de 02 de agosto - 00:00 UT de 04 de agosto de 2016). As linhas verticais vermelhas representam os horários do Theta_Bn.

5.2.1. O papel da onda chorus na variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia

As ondas chorus do modo whistler são ondas de plasma naturais que ocorrem na magnetosfera da Terra [Helliwell, 1969; Storey, 1953]. Suas assinaturas são geralmente observadas na região fora da plasmasfera [Burton & Holzer, 1974; Lauben et al., 2002; LeDocq e tal., 1998]. As ondas chorus normalmente ocorrem em uma ampla faixa de frequência, que abrange desde centenas de Hz até cerca de 10 kHz [Gurnett & O'Brien, 1964]. Estas são geradas pela instabilidade ciclotônica do elétron próxima ao equador [Agapitov et al., 2012, 2013; LeDocq et al., 1998] em associação com elétrons injetados no plasma [Kennel & Petschek, 1966]. A atividade das ondas chorus normalmente se intensifica durante a fase principal e de recuperação das atividades geomagnéticas [Agapitov et al., 2015, 2018; Meredith et al., 2001; Da Silva et al., 2019].

A figura 7 (painéis a-b) apresenta os espectrogramas de campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS (VAP-A) referentes ao evento 3. O painel (c) mostra a atividade dos Bursts que é obtida através do mesmo instrumento

citado, mas em altíssima resolução. Os períodos dos Bursts correspondem a um período de densidade espectral magnética mais alta, conforme mostrado no painel (b). A atividade de ondas chorus é observada a partir de aproximadamente 00:30 do dia 20 de julho de 2016, em que um pacote desta onda será analisado a partir de 00:33 UT, conforme mostrado na figura abaixo. É importante destacar que este horário é ligeiramente após o horário de identificação do ângulo de inclinação da estrutura do vento solar. Assim pode-se sugerir que estas ondas foram geradas sob influência do CME. O painel (c) apresenta um exemplo de identificação dos Bursts e a possibilidade de caracterizar as ondas chorus.

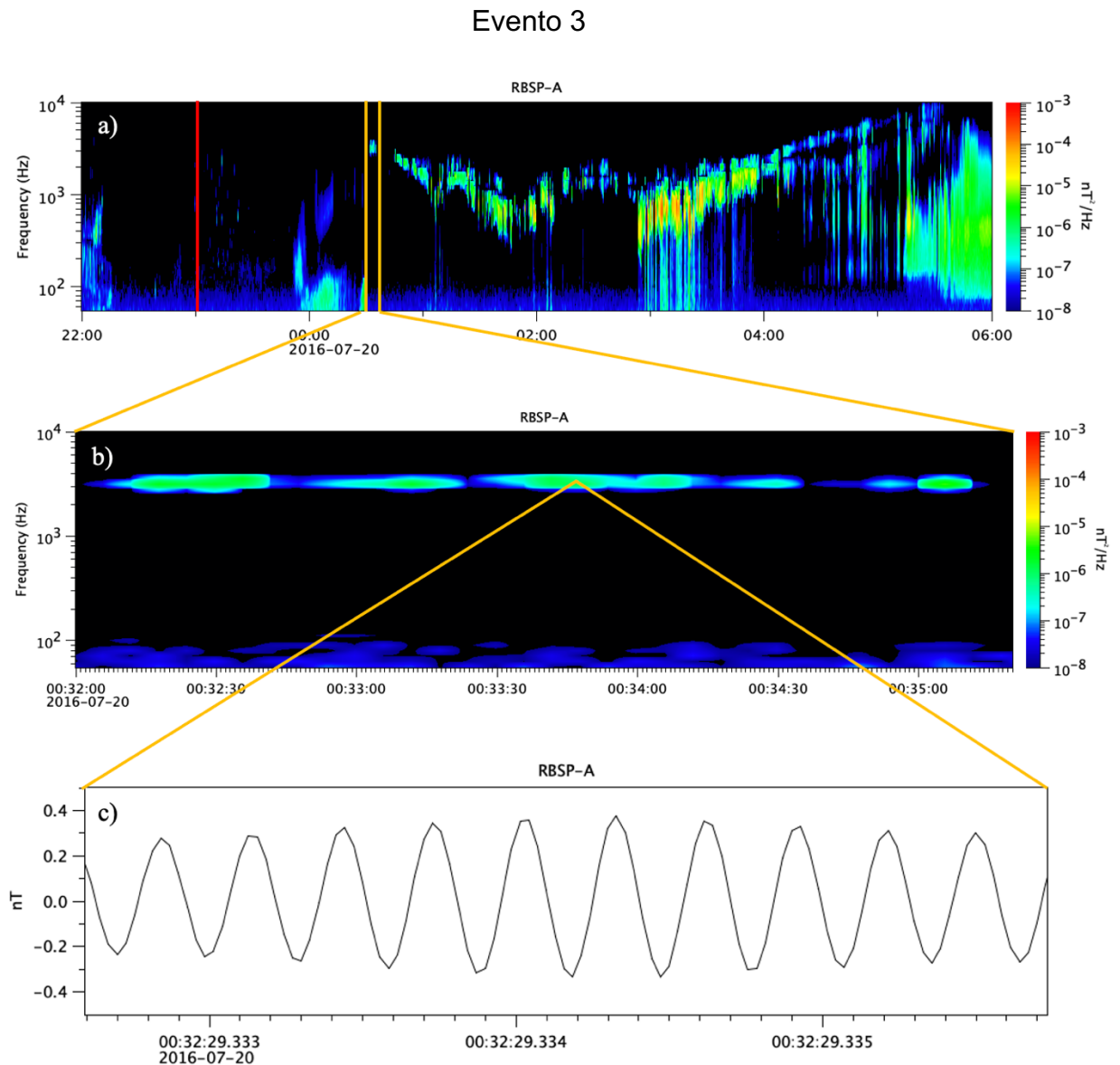


Figura 7: a) Espectrograma do campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS para o período de 8 h (22:00 Ut de 19 de julho de 2016 às 06:00 UT de 20 de julho de 2016). b) Espectrograma do campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS para o período de 6 min (00:32 UT a 00:36 UT de 20 de julho de 2016). c) As medições do campo magnético de alta resolução

correspondentes a um período de maior densidade espectral magnética. A linha vertical vermelha representa o horário do Theta_Bn.

A figura 8 (painéis a-b) apresenta os espectrogramas de campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS (VAP-B) referentes ao evento 4. O painel (c) mostra a atividade dos Bursts obtida em altíssima resolução. A atividade de ondas chorus é observada em duas órbitas da Sonda Van Allen B. A primeira órbita mostra atividade de chorus antes da identificação do ângulo de inclinação da estrutura do vento solar, que aqui é um HSS. Contudo, é importante lembrar que os dados na segunda órbita podem ser analisados ligeiramente após o horário de identificação do ângulo de inclinação da estrutura do vento solar. Assim, para o evento 4 tem-se análises de dois períodos. A primeira, refere-se ao pacote de ondas chorus a partir de 5:27 UT do dia 3 de agosto de 2018, enquanto a segunda refere-se ao pacote de ondas chorus a partir de 01:58 UT do mesmo dia. O painel (c) apresenta dois exemplos de identificação dos Bursts e a possibilidade de caracterizar as ondas chorus.

Evento 4

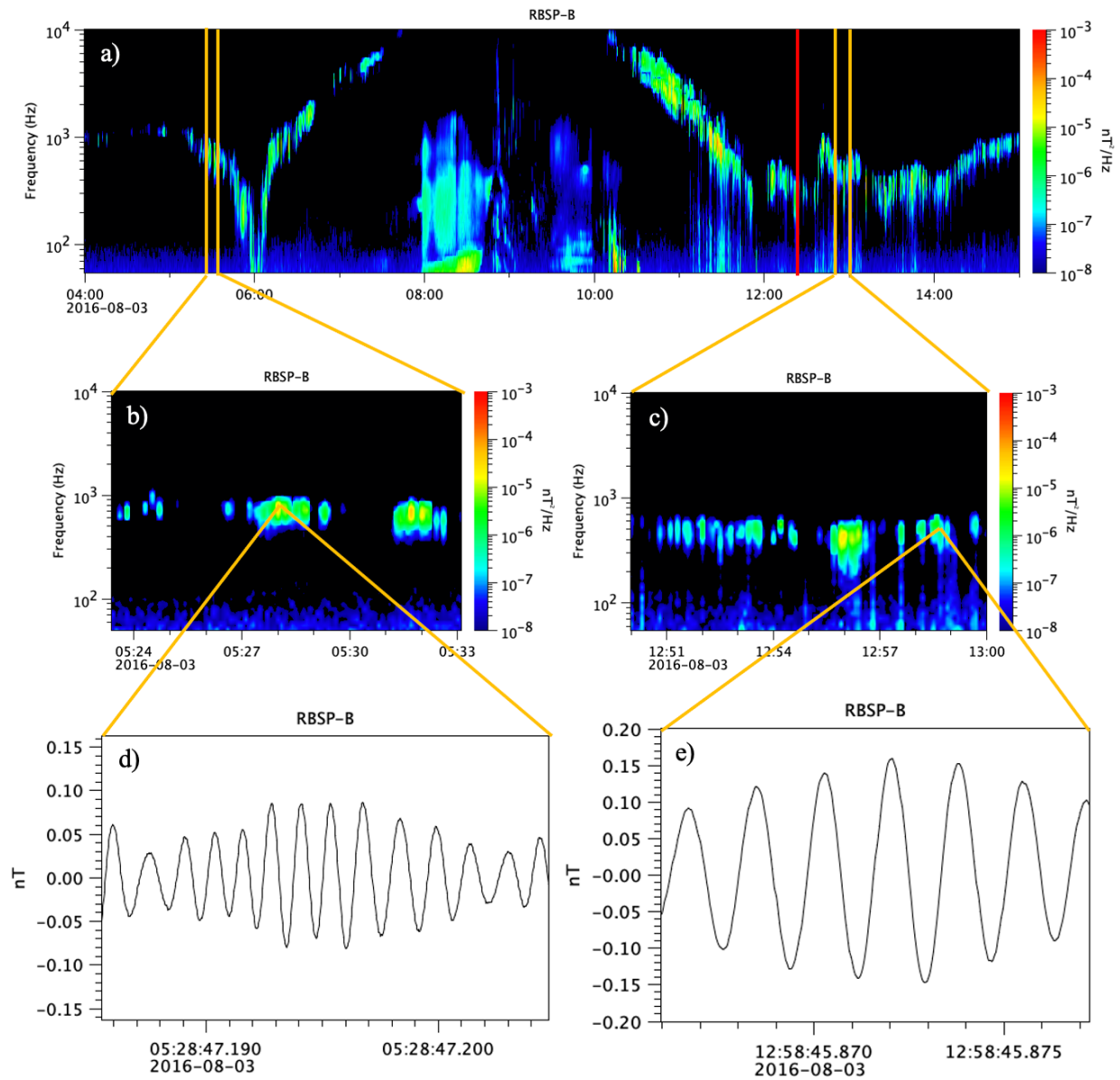


Figura 8: a) Espectrograma de campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS para o período de 11 h (04:00 UT às 15:00 UT de 03 de agosto de 2016). A linha vermelha representa o horário do Theta Bn. b) Espectrograma de campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS para o período de 10 min (05:23:10 UT a 05:33:10 UT 03 de agosto de 2016). c) Espectrograma de campo magnético do EMFISIS para o período de 10 min (12:50 UT às 13:00 UT de 03 de agosto de 2016). d) e e) As medições de campo magnético de alta resolução correspondentes a um período de densidade espectral magnética mais alta. As linhas verticais vermelhas representam os horários do Theta_Bn.

Vários subelementos de chorus foram identificados durante os intervalos em que os dados do modo burst estavam disponíveis, e um exemplo desses subelementos de chorus é mostrado nas Figuras 9-11. Os parâmetros relevantes para caracterizar as ondas chorus são: B_{max} , que é o valor absoluto instantâneo máximo da amplitude da onda, T , que corresponde a um período de ciclo de onda, e τ ,

que é a duração de tempo do subelemento. Observa-se que os valores das amplitudes das ondas e dos seus respectivos pacotes de ondas, assim como os períodos das ondas e de seus pacotes de ondas são compatíveis com os resultados de Da Silva et al. [2019] e Alves et al. [2016]. Portanto, pode-se sugerir que os mecanismos de *pitch angle scattering* e *diffusion* tenham contribuído localmente para a ocorrência de variabilidade no cinturão externo de Van Allen. Para confirmar tal sugestão faz-se necessário utilizar outras técnicas, como o cálculo do ângulo normal da onda (*wave normal angle - WNA*) e a densidade de espaço de fase (*Phase space density - PhSD*) que será assunto abordado na próxima fase deste projeto.

Evento 3

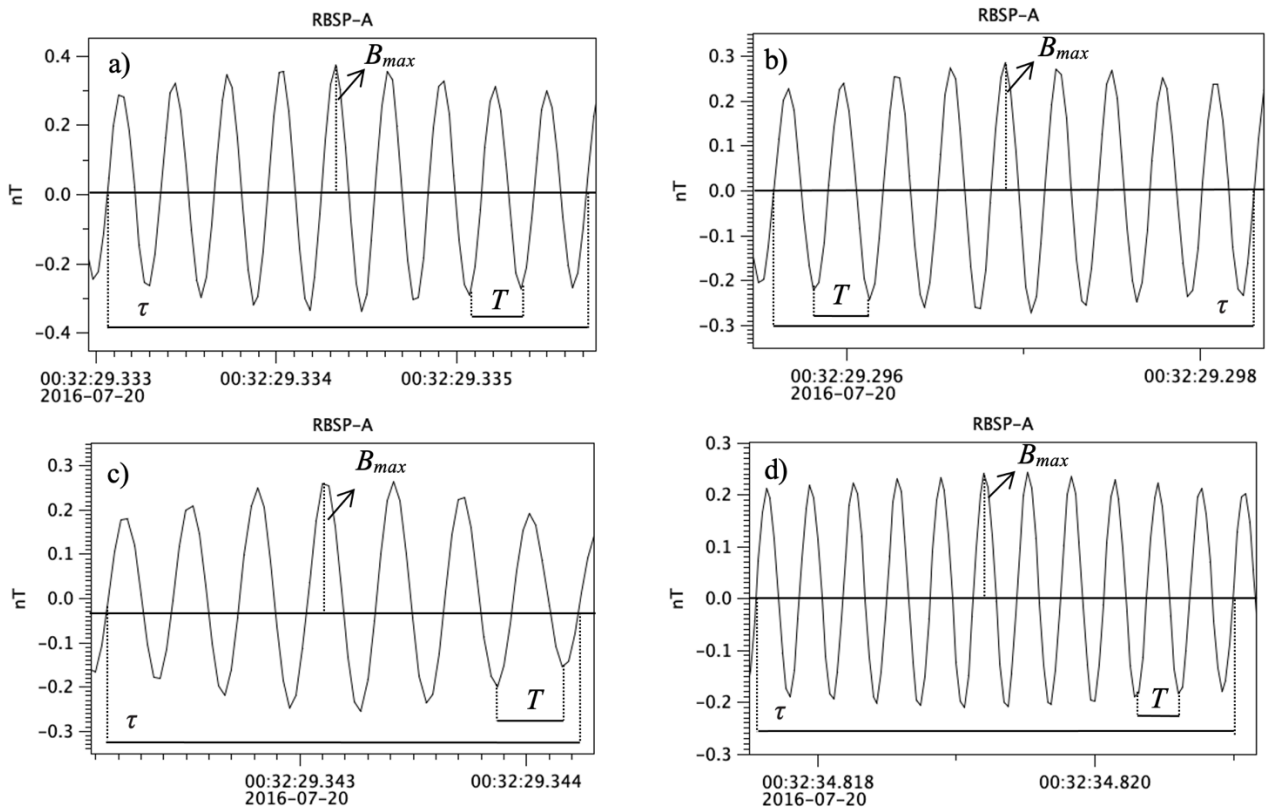


Figura 9: As medições de campo magnético de alta resolução correspondentes a um período de densidade espectral magnética mais alta. Parâmetros relevantes e importantes para caracterizar as ondas chorus são identificados como: B_{max} , o valor absoluto instantâneo máximo da amplitude da onda, T corresponde a um período de ciclo de onda, e τ a duração de tempo do subelemento.

Evento 4 – 1

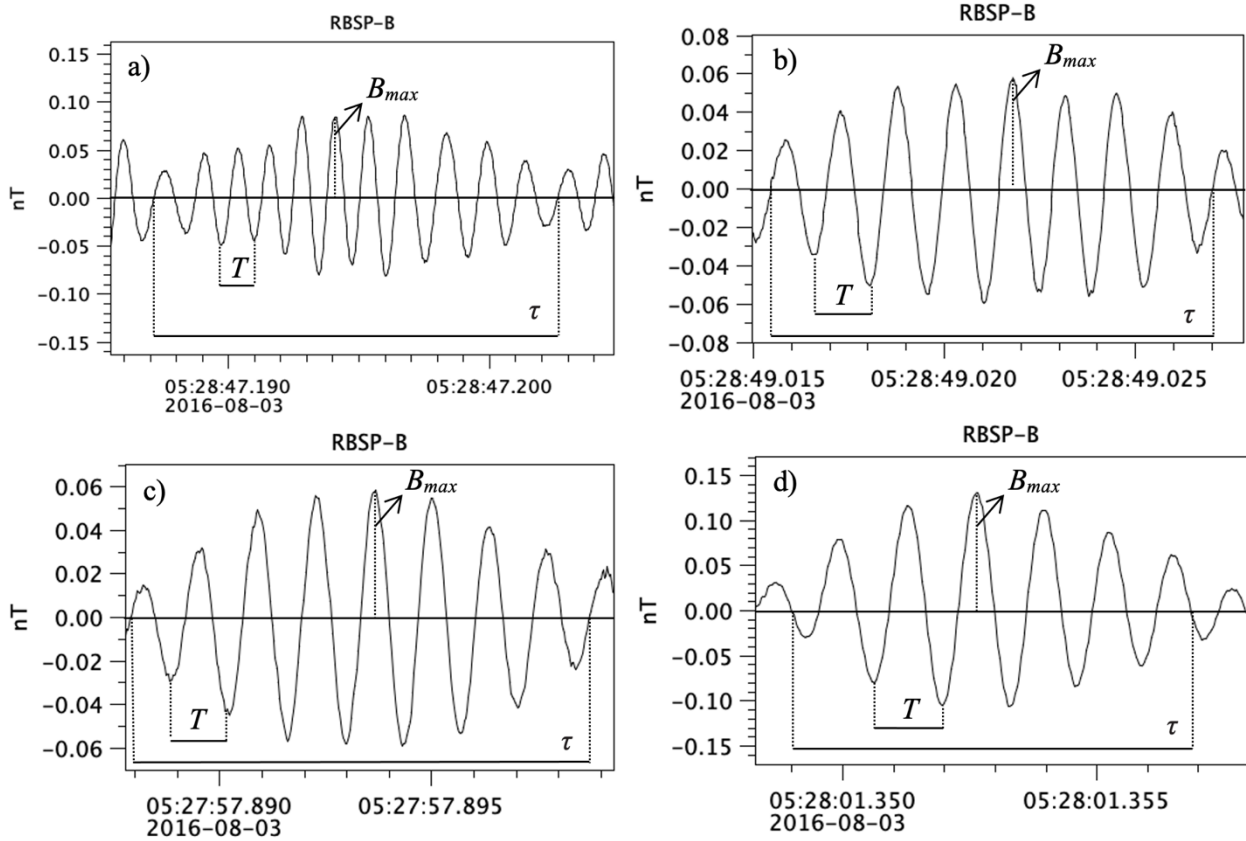


Figura 10: As medições de campo magnético de alta resolução correspondentes a um período de densidade espectral magnética mais alta. Parâmetros relevantes e importantes para caracterizar as ondas chorus são identificados como: B_{max} , o valor absoluto instantâneo máximo da amplitude da onda, T corresponde a um período de ciclo de onda, e τ a duração de tempo do subelemento.

Evento 4 – 2

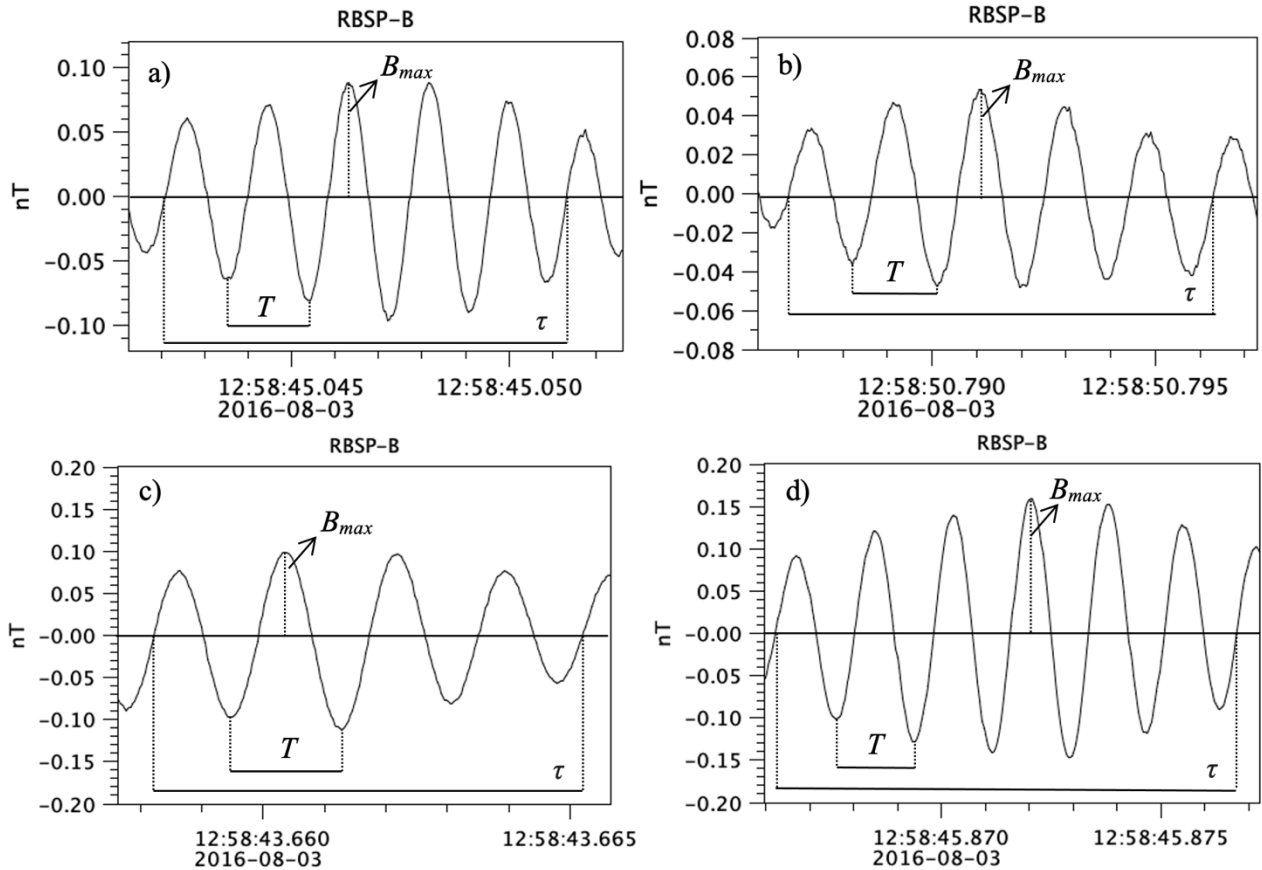


Figura 11: As medições de campo magnético de alta resolução correspondentes a um período de densidade espectral magnética mais alta. Parâmetros relevantes e importantes para caracterizar as ondas chorus são identificados como: B_{max} , o valor absoluto instantâneo máximo da amplitude da onda, T corresponde a um período de ciclo de onda, e τ a duração de tempo do subelemento.

6. CONCLUSÃO

O fluxo de elétrons de alta energia é analisado sob a influência de estruturas do vento solar, como CME e HSS, considerando os seus respectivos ângulos de inclinação e tipos de ondas de choque ao atingirem a Terra. A variabilidade do fluxo de elétrons é observada apenas durante a chegada de estruturas do vento solar quase-perpendiculares, enquanto que durante as estruturas quase-paralelas não se observaram variabilidades no fluxo. Utilizando como referência a medida do ângulo de choque, observa-se que o *dropout* correu sob influência de uma CME associada a um choque do tipo *Fast forward*, enquanto que a repopulação do cinturão externo foi observada sob a influência de um HSS associado a um choque do tipo *Fast reverse*. As condições do meio interplanetário mostraram que a magnetosfera esteve comprimida durante a chegada da CME e relaxada durante a influência do HSS. Portanto, sugere-se que o mecanismo *magnetopause shadowing* foi um dos responsáveis pelo *dropout* observado. Outros mecanismos dinâmicos também podem estar relacionados a variabilidade no fluxo de elétrons de alta energia nos eventos 3 e 4. Assim, as ondas chorus foram

analizadas durante cada período de variabilidade do fluxo, sugerindo que suas respectivas características são compatíveis com os mecanismos de *pitch angle scattering* e *diffusion*, os quais podem ter contribuído localmente com os *dropouts* e *enhancements* observados.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agapitov, O., Artemyev, A., Krasnoselskikh, V., Khotyaintsev, Y. V., Mourenas, D., Breuillard, H., et al. (2013). Statistics of whistler mode waves in the outer radiation belt: Cluster STAFF-SA measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118, 3407–3420. <https://doi.org/10.1002/jgra.50312>

Agapitov, O., Krasnoselskikh, V., Khotyaintsev, Y. V., & Rolland, G. (2012). Correction to “A statistical study of the propagation characteristics of whistler waves observed by Cluster”. *Geophysical Research Letters*, 39, L24102. <https://doi.org/10.1029/2012GL054320>

Alves, L. A. (2016) Outer radiation belt dropout dynamics following the arrival of two interplanetary coronal mass ejections, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/2015GL067066.

Baker, D.N., J.B. Blake, L.B. Callis, J.R. Cummings, D. Hovestadt, S. Kanekal, B. Klecker, R.A. Mewaldt, and R.D. Zwickl. (1994). Relativistic electron acceleration and decay time scales in the inner and outer radiation belts: SAMPEX, *Geophys. Res. Lett.*, 21(6), 409–412, doi:10.1029/93GL03532.

Baker, D.N., Kanekal S.G. (2008). Solar cycle changes, geomagnetic variations, and energetic particle properties in the inner magnetosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 70, Issues 2–4, Pages 195-206, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2007.08.031>.

Baker, D.N.; Kanekal, S.G.; Hoxie, V.C., et al. (2013). The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) Instrument on Board the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) Spacecraft: Characterization of Earth’s Radiation Belt High-Energy Particle Populations, *Space Science Reviews*, Volume 179, Issue 1-4, pp. 337-381.

Da silva, L. A. (2019) Contribution of ULF Wave Activity to the Global Recovery of the Outer Radiation Belt During the Passage of a High-Speed Solar Wind Stream Observed in September 2014, *JGR Space Physics*, doi:10.1029/2018JA026184

Gurnett, D. A., and B. J. O'Brien. (1964). High-latitude geophysical studies with satellite Injun 3: 5. Very-low-frequency electromagnetic radiation, *J. Geophys. Res.*, 69(1), 65–89, doi:10.1029/JZ069i001p00065.

Kennel, C. F., & Petschek, H. E. (1966). Limit on stably trapped particle fluxes. *Journal of Geophysical Research*, 71, 1–28. <https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00001>

Meredith, N. P., Horne, R. B., & Anderson, R. R. (2001), Substorm dependence of chorus amplitudes: Implications for the acceleration of electrons to relativistic energies, *Journal of Geophysical Research*, 106(A7), 13165–13178. <https://doi.org/10.1029/2000JA900156>

Miyoshi, Y., A. Morioka, R. Kataoka, Y. Kasahara, and T. Mukai (2007), Evolution of the outer radiation belt during the November 1993 storms driven by corotating interaction regions, *J. Geophys. Res.*, 112, A05210, doi:10.1029/2006JA012148.

Northrop, Theodore G. and Teller, Edward. (1960). Stability of the Adiabatic Motion of Charged Particles in the Earth's Field, *Phys. Rev* 117, (1), 215--225, 10.1103/PhysRev.117.215.

Ponomarev, E. A., Sedykh, P. A., and Urbanovich, V. D. (2006). Bow shock as a power source for magnetospheric processes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 68(6), 685–690. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.11.007>.

Roederer, J. G. (1970). *Dynamics of geomagnetically trapped radiation*, in *Physics and Chemistry in Space*, vol. 2, edited by J. G. Roederer and J. Zahringer, 166 pp., Springer, Berlin.

Shue, J. -H., et al., (1998) Magnetopause location under extremes solar wind conditions, *J. Geophys. Res.*, 103, 17, 691.

Stone, E. C., Frandsen, A. M., Mewaldt, R. A., Christian, E. R., Margolies, D., Ormes, J. F., & Snow, F. (1998). The Advanced Composition Explorer. *Space Science Reviews*, 86(1/4), 1–22. <https://doi.org/10.1023/A:1005082526237>

Turner et al. (2012). Outer Radiation Belt Flux Dropouts: Current Understanding and Unresolved Questions in: *Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere Geophysical Monograph Series 199*, 2012.