



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/02.19.19.58-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DE ATIVIDADE DE ONDAS
CHORUS NA MAGNETOSFERA SOB EFEITO DE
ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS DISTINTAS E
SUA RELAÇÃO COM A VARIABILIDADE DE FLUXO
DE ELÉTRONS NO CINTURÃO DE RADIAÇÃO DE
VAN ALLEN**

Vinicius Deggeroni

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial / Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Lígia Alves da Silva, e Marlos Rockenbach da Silva, aprovada em 29 de novembro de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4APKG88>>

INPE
São José dos Campos
2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/02.19.19.58-TDI

**CARACTERIZAÇÃO DE ATIVIDADE DE ONDAS
CHORUS NA MAGNETOSFERA SOB EFEITO DE
ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS DISTINTAS E
SUA RELAÇÃO COM A VARIABILIDADE DE FLUXO
DE ELÉTRONS NO CINTURÃO DE RADIAÇÃO DE
VAN ALLEN**

Vinicius Deggeroni

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial / Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Lígia Alves da Silva, e Marlos Rockenbach da Silva, aprovada em 29 de novembro de 2023.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/4APKG88>>

INPE
São José dos Campos
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Deggeroni, Vinicius.

D363c Caracterização de atividade de ondas chorus na magnetosfera sob efeito de estruturas interplanetárias distintas e sua relação com a variabilidade de fluxo de elétrons no cinturão de radiação de Van Allen / Vinicius Deggeroni. – São José dos Campos : INPE, 2023.

xx + 181 p. ; (sid.inpe.br/mte-m21d/2024/02.19.19.58-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial / Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2023.

Orientadores : Drs. Lígia Alves da Silva, e Marlos Rockenbach da Silva.

1. Ondas Chorus. 2. Van Allen. 3. Fluxo de elétrons. 4. energia relativística. 5. Estruturas interplanetárias. I.Título.

CDU 52.334.7:52.854



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE TESE DE VINICIUS DEGGERONI
REG. 142581/2019, BANCA Nº 274/2023

No dia 29 de novembro de 2023, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Geofísica Espacial / Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, com a exigência de que o trabalho final a ser publicado deverá incorporar as correções sugeridas pela Banca Examinadora, com revisão pelo(s) orientador(es).

Título: CARACTERIZAÇÃO DE ATIVIDADE DE ONDAS CHORUS NA MAGNETOSFERA SOB EFEITO DE ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS DISTINTAS E SUA RELAÇÃO COM A VARIABILIDADE DE FLUXO DE ELÉTRONS NO CINTURÃO DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN.

Membros da banca:

Dra. Livia Ribeiro Alves – Presidente – INPE
Dra. Lígia Alves da Silva – Orientador – INPE
Dr. Marlos Rockenbach da Silva – Orientador – INPE
Dr. Odim Mendes Junior – Membro Interno – INPE
Dr. José Paulo Marchezi – Membro Interno – UNH/ISEOS
Dra. Flavia Reis Cardoso Rojas – Membro Externo – USP/EEL



Documento assinado eletronicamente por **Jose paulo marchezi (E), Usuário Externo**, em 30/11/2023, às 15:18 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Livia Ribeiro Alves, Pesquisadora**, em 30/11/2023, às 15:24 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Odin Mendes Júnior, Pesquisador**, em 30/11/2023, às 15:31 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIA REIS cardoso rojas (E), Usuário Externo**, em 01/12/2023, às 09:05 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marlos Rockenbach da Silva, Pesquisadora**, em 04/12/2023, às 11:07 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LIGIA ALVES DA SILVA (E), Usuário Externo**, em 04/12/2023, às 13:58 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.mcti.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **11537403** e o código CRC **B64EC165**.

Referência: Processo nº 01340.009774/2023-11

SEI nº 11537403

RESUMO

A dinâmica da magnetosfera terrestre é impactada pelas estruturas do vento solar, tais como Ejeções de Massa Coronal Interplanetárias (ICMEs) e Fluxos de Vento Solar de Alta Velocidade (HSSs). Essas estruturas injetam energia na magnetosfera, resultando na excitação de ondas magnetosféricas em uma ampla gama de frequências, incluindo as ondas de *Chorus* do modo *Whistler*, com frequências variando de centenas de Hz até cerca de 10 kHz. Estas ondas desempenham um papel significativo na interação ressonante com elétrons no cinturão de radiação externo da Terra, levando à perda ou aceleração localizada dessas partículas. Nesta tese de doutorado, investigamos a influência das estruturas interplanetárias na atividade das ondas *Chorus*. Selecionamos e analisamos cinco estudos de caso, considerando diferentes configurações do campo magnético interplanetário (IMF). Nossos resultados revelam uma notável variabilidade no fluxo de elétrons de alta energia em todos os casos investigados, ressaltando a influência das ondas *Chorus*. Além disso, identificamos que essas ondas podem ressoar com os elétrons do cinturão de radiação, resultando em perda ou aceleração localizada dessas partículas. Os resultados também indicam que a atividade das ondas *Chorus* na magnetosfera interna é significativamente afetada durante períodos de maior atividade das ondas *Chorus*, particularmente quando a componente B_z do IMF é negativa. Observa-se que a competição entre ondas *Chorus* paralelas e quase oblíquas desempenha um papel crucial na variabilidade do fluxo de elétrons. Essas descobertas são inovadoras e contribuem para a compreensão dos mecanismos dinâmicos que afetam o fluxo de elétrons no cinturão de radiação externo durante a influência das estruturas do vento solar. Esses resultados representam uma contribuição significativa à literatura e demonstram que a análise das características das ondas de *Chorus* por meio de diversas técnicas permite a identificação dos principais mecanismos responsáveis pela variabilidade do fluxo de elétrons no cinturão de radiação externo sob a influência de diferentes estruturas do vento solar.

Palavras-chave: Ondas *Chorus*. Van Allen. fluxo de elétrons. energia relativística. estruturas interplanetárias.

CHARACTERIZATION OF CHORUS WAVE ACTIVITY IN THE MAGNETOSPHERE UNDER THE INFLUENCE OF DIFFERENT INTERPLANETARY STRUCTURES AND ITS RELATIONSHIP WITH ELECTRON FLUX VARIABILITY IN THE VAN ALLEN RADIATION BELT

ABSTRACT

The dynamics of the Earth's magnetosphere are influenced by solar wind structures, such as Interplanetary Coronal Mass Ejections (ICMEs) and High-Speed Solar Wind Streams (HSSs). These structures inject energy into the magnetosphere, resulting in the excitation of magnetospheric waves over a wide range of frequencies, including Whistler-mode Chorus waves with frequencies ranging from hundreds of Hz to approximately 10 kHz. These waves play a significant role in the resonant interaction with electrons in the Earth's outer radiation belt, leading to the localized loss or acceleration of these particles. In this doctoral thesis, we investigate the influence of interplanetary structures on Chorus wave activity. We select and analyze five case studies, considering different configurations of the interplanetary magnetic field (IMF). Our results reveal remarkable variability in the flux of high-energy electrons in all investigated cases, emphasizing the influence of Chorus waves. Additionally, we identify that these waves can resonate with radiation belt electrons, resulting in localized particle loss or acceleration. The results also indicate that the activity of Chorus waves in the inner magnetosphere is significantly affected during periods of increased Chorus wave activity, particularly when the B_z component of the IMF is negative. We observe that the competition between parallel and nearly oblique Chorus waves plays a crucial role in the variability of electron flux. These findings are innovative and contribute to the understanding of dynamic mechanisms affecting electron flux in the outer radiation belt during the influence of solar wind structures. These results represent a significant contribution to the literature and demonstrate that the analysis of Chorus wave characteristics through various techniques allows the identification of the key mechanisms responsible for electron flux variability in the outer radiation belt under the influence of different solar wind structures.

Keywords: *Chorus* Waves. Van Allen. Electron Flux. Interplanetary Structures. radiation belts.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Principais regiões da Magnetosfera.	9
4.2 Localização dos diferentes tipos de ondas na Magnetosfera terrestre.	10
4.3 Ilustração dos movimentos de partículas confinadas no campo magnético da Terra.	13
4.4 Ilustração dos cinturões de radiação interno e externo de Van Allen.	15
4.5 Densidade espectral de potência.	16
4.6 Ondas <i>Whistler</i> modo RCP e LCP.	21
4.7 Assinaturas das ondas <i>Chorus</i>	22
4.8 Identificação de atividade de ondas <i>Chorus</i>	23
4.9 Cone de perda	24
4.10 Propagação de elétrons e íons em ondas RCP e LCP e definição do sentido de polarização.	26
5.1 Ilustração esquemática de uma ICME e de uma CIR e as variações típicas observadas nos dados medidos no Meio Interplanetário.	31
5.2 Fluxo de elétrons relativísticos e condições do meio interplanetário.	36
5.3 Potência espectral do campo magnético para detecção das ondas <i>Chorus</i>	41
5.4 Parâmetros usados na integração de amplitudes de ondas na magnetosfera, conforme definido por Ni et al. (2020).	46
5.5 Detecção de <i>Bursts</i> e identificação dos pacotes de ondas <i>Chorus</i>	48
5.6 Detecção de <i>Bursts</i> e identificação dos pacotes de ondas <i>Chorus</i>	49
6.1 Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: CASO NS	56
6.2 Atividade de ondas <i>Chorus</i> e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos: CASO NS	58
6.3 Atividade de ondas <i>Chorus</i> do modo <i>Whistler</i> Versus IMF Bz: CASO NS	60
6.4 Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i>: CASO NS - T1	62
6.5 Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i>: CASO NS - T2	64
6.6 Subelementos e pacotes de ondas <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> CASO NS - T1 e T2	66

6.7	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: CASO SN	72
6.8	Atividade de ondas <i>Chorus</i> e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos: CASO SN	74
6.9	Atividade de ondas <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> Versus IMF Bz: CASO SN	75
6.10	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i>: CASO SN - T1	77
6.11	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i>: CASO SN - T2	79
6.12	Subelementos e pacotes de ondas <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> CASO SN - T1 e T2	81
6.13	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: CASO YS	86
6.14	Atividade de ondas <i>Chorus</i> e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos: CASO YS	88
6.15	Atividade de ondas <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> Versus IMF Bz: CASO YS	89
6.16	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i>: CASO YS - T1	91
6.17	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i>: CASO YS - T2	93
6.18	Subelementos e pacotes de ondas <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> CASO YS - T1 e T2	95
6.19	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: CASO Sem MC	99
6.20	Atividade de ondas <i>Chorus</i> e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos: CASO Sem MC	100
6.21	Atividade de ondas <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> Versus IMF Bz: CASO Sem MC	101
6.22	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i>: CASO sem MC - T1	103
6.23	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i>: CASO Sem MC - T2	105
6.24	Subelementos e pacotes de ondas <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> CASO Sem MC - T1 e T2	107
6.25	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: CASO HSS	111

6.26	Atividade de ondas <i>Chorus</i> e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos: CASO HSS	112
6.27	Atividade de ondas <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> Versus IMF Bz: CASO HSS	114
6.28	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> : CASO HSS - T1.	116
6.29	Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> : CASO HSS - T2.	118
6.30	Subelementos e pacotes de ondas <i>Chorus</i> no modo <i>Whistler</i> CASO HSS - T1 e T2.	120
7.1	Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO NS	127
7.2	Phase Space Density radial profiles: CASO NS - T1.	129
7.3	Phase Space Density radial profiles: CASO NS - T2.	130
7.4	Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO SN	132
7.5	Phase Space Density radial profiles: CASO SN - T1.	134
7.6	Phase Space Density radial profiles: CASO SN - T2.	135
7.7	Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO YS	137
7.8	Phase Space Density radial profiles: CASO YS - T1.	139
7.9	Phase Space Density radial profiles: CASO YS - T2.	140
7.10	Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO sem MC	142
7.11	Phase Space Density radial profiles: CASO sem MC - T1.	143
7.12	Phase Space Density radial profiles: CASO sem MC - T2.	144
7.13	Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO HSS	146
7.14	Phase Space Density radial profiles: CASO HSS - T1.	148
7.15	Phase Space Density radial profiles: CASO HSS - T2.	149
A.1	Parâmetros utilizados no cálculo de $\Delta\alpha$	169
A.2	Densidade no campo magnético em relação a frequência.	170
B.1	Exemplo de dados para uma nuvem magnética, N-S (componente Bz girando de Norte a Sul).	172
B.2	Exemplo de dados para uma nuvem magnética, S-N (Bz componente que gira do Sul para o Norte).	173
B.3	Exemplo de dados para uma nuvem magnética, Y-S (componente girando de Leste a Oeste ou Oeste a Leste, com o componente Bz na direção Sul).	175
B.4	Exemplo de dados para evento sem Nuvem Magnética.	176
C.1	Índice do Eletrojato Auroral AE - (<i>Auroral Electrojet Index</i>).	177

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
5.1 Tabela estudos de caso eventos pré-selecionados.	38
6.1 Tabela estudos de caso.	54
6.2 Parâmetros e cálculo de $(\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso NS.	69
6.3 Parâmetros e cálculo de $(\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso SN.	83
6.4 Parâmetros e cálculo de $(\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso YS.	97
6.5 Parâmetros e cálculo de $(\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso sem MC.	109
6.6 Parâmetros e cálculo de $(\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso HSS.	123
8.1 Síntese Sumarizada: Resultados dos Estudos de Caso.	154
8.1 Conclusão.	155

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACE	–	Advanced Composition Explorer
CIRs	–	Regiões de interação corrotante (Co-rotating Interaction Regions)
CME	–	Ejeção de Massa Coronal (Coronal Mass Ejection)
DONKI	–	Space Weather Database of Notifications, Knowledge, Information
ECT	–	Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma Suite
EMFISIS	–	Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science
GSM	–	(Geocentric Solar Magnetospheric)
HSS	–	High Speed Stream
ICMEs	–	Ejeções de Massa Coronal Interplanetárias (Interplanetary Coronal Mass Ejections)
IMF	–	Campo magnético interplanetário (Interplanetary Magnetic Field)
LCP	–	(Left-hand Circularly Polarized waves)
MC	–	Nuvem Magnética (Magnetic Cloud)
NS	–	Nuvem Magnética, com rotação da componente Bz de Norte para Sul
PhSD	–	Densidade do espaço de fase (Phase Space Density)
RBSP	–	Radiation Belt Storm Probes
REPT	–	Relativistic Electron Proton Telescope
RCP	–	(Right-hand Circularly Polarized waves)
SN	–	Nuvem Magnética, com rotação da componente Bz de Sul para Norte
SVD	–	decomposição de valor singular (singular value decomposition)
SWPAM	–	Solar Wind Electron, Proton, e Alpha Monitor
SYM_H	–	índice simétrico
UT	–	Tempo Universal (Universal Time)
YS	–	Nuvem Magnética, com rotação da componente By e Bx com componente Bz Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

L^*	– parâmetro "L-star"ou "L estrela".
\vec{E}	– vetor campo elétrico
\vec{B}	– vetor campo elétrico
$\nabla \times$	– operador rotacional em cálculo vetorial
$\nabla \cdot$	– operador divergente em cálculo vetorial
$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	– derivada parcial em relação ao tempo (t)
\vec{J}	– operador divergente em cálculo vetorial
F_m	– força magnética
ρ	– densidade de carga elétrica
P	– momento da partícula
α	– pitch angle
φ	– terceiro invariante adiabático
J	– segundo invariante adiabático
μ	– primeiro invariante adiabático
ρ	– densidade de carga elétrica
W_{pe}	– frequência do plasma da onda em radianos por segundo (rad/s)
ω	– frequência ondas <i>Chorus</i>
W_{ce}	– frequência ciclotrônica em radianos por segundo (rad/s)
f_{ce}	– frequência ciclotrônica em Hertz (Hz)
W_i	– frequência íon em radianos por segundo (rad/s)
\vec{k}	– vetor de onda
λ	– (lambda) é o comprimento de onda da onda
ν	– frequência de colisões
B_{max}	– amplitude de pico central para campo magnético em um <i>Burst</i>
B_o	– magnitude do campo magnético no ambiente equatorial
V_{\perp}	– velocidade paralela
V_{\parallel}	– velocidade ao linha de campo magnético
E_{\parallel}	– Energia cinética paralela
E_{\perp}	– Energia cinética perpendicular
c	– velocidade da luz $3 \cdot 10^8$ metros por segundo
$\Delta\alpha_i$	– variação no pitch angle
$\Delta\alpha\tau$	– variação no pitch angle para todo o período do subelemento
$\Delta\alpha T$	– variação no pitch angle para ciclo da onda
Δt_i	– tempo de interação estimado para variação no pitch angle
Δt_{τ}	– tempo de interação para variação no pitch angle em todo o período do subelemento
Δt_T	– tempo de interação estimado para variação no pitch angle em um ciclo da onda
T	– tempo de do ciclo da onda centrar de um <i>burst</i>
τ	– período do subelemento para ondas de um <i>burst</i>

n_e	–	densidade eletrônica do plasma na região
m_e	–	massa do elétron
V_g	–	velocidade de grupo
V_s	–	velocidade relativa entre as ondas Chorus e a velocidade ressonante dos elétrons
γ	–	fator de Lorentz
Υ	–	Elipticidade
F	–	Planaridade
H	–	Operador transposto Hermitiano
U	–	matriz complexa
V	–	matriz complexa
Λ	–	matriz real
ζ	–	valores singular
θ	–	wave-normal angle (WNA)
P_c	–	pressão cinética
P_m	–	pressão magnética
μ_o	–	a permeabilidade magnética

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVA	5
3 OBJETIVOS	7
3.1 Objetivos gerais	7
3.1.1 Objetivos específicos	7
4 REVISÃO TEÓRICA	9
4.1 Cinturões de radiação de Van Allen	11
4.2 Ondas <i>Whistler</i>	17
4.3 Ondas <i>Chorus</i> no cinturão externo de radiação	21
4.4 <i>Pitch Angle</i> e cone de perdas.	24
4.5 <i>Pitch Angle Scattering</i>	25
4.6 Mecanismo de interação	25
5 DADOS E METODOLOGIA	29
5.1 Descrição e escolha dos instrumentos	29
5.2 Caracterização de estruturas interplanetárias	30
5.3 Critério de seleção de eventos	37
5.4 Caracterização de Ondas <i>Chorus</i>	39
5.4.1 Frequência ciclotrônica para elétrons f_{ce}	39
5.4.2 WNA (Wave Normal Angle), elipticidade e planaridade	41
5.5 Método de quantificação da amplitude das ondas <i>Chorus</i>	44
5.6 Subelementos ondas <i>Chorus</i>	47
5.7 Razão entre a frequência do plasma da onda e a frequência ciclotrônica de elétrons W_{pe}/W_{ce}	50
5.8 PhSD Phase Space Density	51
6 RESULTADOS	53
6.1 CASO NS: ICME com nuvem, com rotação da componente Bz de Norte para Sul	54
6.2 CASO SN: ICMEs com nuvem, com rotação da componente Bz de Sul para Norte	70

6.3	CASO YS: ICMEs com nuvem, com rotação da componente By e Bx com componente Bz Sul	84
6.4	CASO sem MC: ICME sem nuvem magnética	98
6.5	CASO HSS: High-Speed Stream	109
7	DISCUSSÕES	125
7.1	Caso NS	125
7.2	Caso SN	131
7.3	Caso YS	136
7.4	Caso sem MC	140
7.5	Caso HSS	144
8	CONCLUSÃO	151
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
	APÊNDICE A	169
	APÊNDICE B	171
	APÊNDICE C	177
	APÊNDICE D	179
D.1	O vetor de Poynting \vec{S} e a ambiguidade nas direções dos ângulos normais das ondas	179
D.2	Frequência ciclotrônica	179

1 INTRODUÇÃO

O Sol, uma estrela composta por plasma, apresenta uma rotação diferencial, e possui um campo magnético de extrema complexidade e sujeito a instabilidades. Esse comportamento dinâmico do Sol faz com que, ocasionalmente, material solar seja ejetado, carregando matéria e campo magnético para o espaço interplanetário. Esse material magnetizado, conhecido como ejeção de massa coronal (Coronal Mass Ejection - CME) e feixe de vento solar de alta velocidade (High-Speed Solar Wind Stream - HSS) (TSURUTANI; SMITH, 1974), pode causar perturbações nas magnetosferas dos planetas do sistema solar.

Na magnetosfera da Terra, esses eventos solares podem gerar ondas em uma ampla faixa de frequências, apresentando características consideravelmente complexas. O acoplamento entre essas estruturas do vento solar e a magnetosfera terrestre permite que partículas carregadas do vento solar entrem no campo geomagnético da Terra, desencadeando perturbações na dinâmica da magnetosfera (ROEDERER; ZHANG, 2016).

A magnetosfera terrestre possui um formato que permite o aprisionamento de partículas energéticas, que vai desde aproximadamente 1.0 a 6.5 RE raios terrestres. Essa região é conhecida como Cinturões de Radiação de Van Allen (BAKER, 2001). Esses cinturões concentram elétrons, prótons e íons, sendo que no cinturão de radiação externo (3.5 RE - 6.5 RE raios terrestres), os elétrons predominam (KIVELSON; RUSSELL, 1995). O fluxo desses elétrons de alta energia (1.0 - 5.0 MeV) no cinturão externo é particularmente vulnerável aos impactos das estruturas do vento solar e pode representar uma ameaça para instrumentos em satélites que orbitam essa região (BAKER et al., 2013). Por outro lado, o cinturão interno (1.0 RE - 2.0 RE) é predominantemente composto por prótons (LAKHINA et al., 2010) e é considerado mais estável em comparação ao cinturão externo. Acredita-se que a maioria das partículas aprisionadas nos cinturões de radiação tenha origem no vento solar (PIZZELLA et al., 1962). O movimento dessas partículas carregadas é governado pelas forças de Lorentz e pode ser decomposto em três movimentos distintos (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996; BAUMJOHANN; TREUMANN, 2012), cada um associado a uma invariante adiabática que desempenha um papel fundamental na descrição da dinâmica das partículas nos cinturões de radiação de Van Allen (KAMIDE; CHIAN, 2007).

No ambiente do Cinturão de Radiação de Van Allen, onde partículas carregadas são aprisionadas, seus movimentos desempenham um papel crucial na compreensão

da dinâmica dessa região. A análise detalhada da região, associada aos invariantes adiabáticos, pode ser decompostos em três movimentos. O primeiro é o movimento ciclotrônico, em que as partículas giram ao redor das linhas do campo magnético em milissegundos, associado pelo primeiro invariante adiabático. O segundo movimento, denominado *bouncing*, é caracterizado pelo vaivém das partículas ao longo das linhas do campo magnético, ocorrendo entre pontos de espelhamento e tendo uma escala de tempo de décimos de segundos a segundos, relacionado ao segundo invariante adiabático. Por fim, o terceiro movimento é o movimento de deriva, no qual elétrons e prótons derivam para direções opostas, com uma escala de tempo da ordem de alguns minutos, e está associado ao terceiro invariante adiabático. Esses movimentos desempenham um papel crucial na compreensão da dinâmica das partículas no Cinturão de Radiação de Van Allen.

Processos dinâmicos capazes de alterar a densidade de fluxo de partículas no cinturão externo de radiação podem estar vinculados à violação de um ou mais invariantes adiabáticos, devido à variabilidade do campo geomagnético causada por estruturas magnéticas do meio interplanetário (ELKINGTON et al., 1999). Embora os mecanismos dinâmicos responsáveis pela variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia no cinturão externo tenham sido objeto de estudos de diversos grupos de pesquisa atualmente, as interações ressonantes entre elétrons relativísticos e ondas magnetosféricas ainda precisam ser melhor compreendidas, especialmente no que se refere à contribuição relativa a cada tipo de onda durante diminuições (*dropouts*) e aumentos (*enhancements*) de fluxo (TSURUTANI; SMITH, 1977; ALVES et al., 2016; ALVES et al., 2017b; DA SILVA et al., 2019).

As ondas magnetosféricas que podem interagir ressonantemente com os elétrons do cinturão de radiação externo abrangem uma vasta faixa de frequências. No entanto, vale ressaltar que apenas as ondas de frequência ultra baixa (Ultra Low Frequency - ULF) (KIVELSON; SOUTHWOOD, 1985; KIVELSON; RUSSELL, 1995) e as ondas *Chorus* no modo *Whistler* (GURNETT; O'BRIEN, 1964; ALVES et al., 2017a) têm a capacidade de interagir tanto para aumentar quanto para diminuir o fluxo de elétrons de alta energia. As ondas ULF e os mecanismos de difusão radial para dentro (*inward radial diffusion*) e de difusão radial para fora (*outward radial diffusion*) têm sido amplamente estudados. No entanto, as ondas *Chorus* no modo *Whistler* e seu papel na aceleração e diminuição do fluxo de elétrons relativísticos ainda carecem de estudos mais detalhados. Será abordado nesta tese a caracterização das propriedades das ondas *Chorus* durante diferentes estruturas do vento solar e seu impacto nos mecanismos de interação entre as ondas e as partículas.

A literatura indica que as ondas *Chorus* interagem ressonantemente com partículas relativísticas, levando à violação do primeiro e/ou segundo invariante adiabático. Essa quebra em algum dos invariantes interrompe os movimentos das partículas confinadas (THORNE, 2010; THORNE et al., 2010; LAKHINA et al., 2010). Essa interação desencadeia o mecanismo de espalhamento por *pitch-angle*, conhecido como *pitch-angle scattering*, contribuindo para ocorrências de *dropouts* no cinturão externo de Van Allen. A interação entre as ondas *Chorus* e partículas de baixa energia (de 20 keV a centenas de keV) pode acelerar localmente essas partículas até níveis relativísticos, resultando no aumento do fluxo de elétrons no cinturão externo por meio da difusão por *pitch-angle* (THORNE et al., 2010).

Portanto, a presente tese pretende investigar o papel das ondas *Chorus* na variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação externo, considerando diferentes cenários na magnetosfera, os quais são resultantes do acoplamento entre cinco diferentes topologias de estruturas do vento solar e a magnetosfera.

Esta tese está organizada da seguinte forma: [Capítulo 1](#), introdutório, [Capítulo 2](#) e [3](#) apresentam a justificativa e objetivos, respectivamente, os quais estabelecem as bases e metas da pesquisa. A revisão Teórica dos principais fenômenos abordados está apresentada no [Capítulo 4](#). Em seguida, são os detalhes sobre a metodologia e os dados utilizados, bem como, os critérios utilizados para seleção dos eventos são apresentados no [Capítulo 5](#). Os resultados obtidos são discutidos no [Capítulo 6](#), e, por fim, as conclusões principais são apresentadas nos [Capítulo 7](#) e [8](#).

2 JUSTIFICATIVA

A presente tese tem como foco principal a investigação das ondas *Chorus* no modo *Whistler*, fenômeno que ocorre na magnetosfera e abrange uma faixa de frequência que varia de centenas de Hz a aproximadamente 10 kHz (FUNG; MOORE, 1964; GURNETT; O'BRIEN, 1964; ALVES et al., 2016). Essas ondas são geradas na magnetosfera como resultado de perturbações no campo magnético terrestre, causadas pelo acoplamento entre as estruturas do vento solar e a magnetosfera terrestre (KAMIDE; CHIAN, 2007; LI et al., 2015). Ondas essas geradas através da instabilidade ciclotrônica do elétron próximo ao equador em associação com a injeção de partículas fonte - *sources* (elétrons com dezenas de keV) (KENNEL; PETSCHKEK, 1966; JAYNES et al., 2015), essa população de partículas dependendo de condições do meio e interações com ondas *Chorus* podem vir a povoar regiões do Cinturão de Radiação de Van Allen em faixas de energias relativísticas.

Ondas *Chorus* geralmente ocorre em duas bandas de frequências distintas, que são acima $0,5 f_{ce}$, banda alta - (*upper band*) e abaixo $0,5 f_{ce}$, banda baixa - (*lower band*), em relação à metade da frequência de giro do elétron f_{ce} (TSURUTANI; SMITH, 1974; MEREDITH et al., 2003; AGAPITOV et al., 2017) e outras referências mostraram que as ondas *Chorus* se intensificam durante atividades de subtempestades e também durante a fase de recuperação das atividades magnéticas. As tempestades e subtempestades estão associadas a estruturas do vento solar (GONZALEZ et al., 1994). Contudo, verificar as características destas ondas sob influências de estruturas interplanetárias, considerando os parâmetros do vento solar, pode trazer informações sobre suas características ainda não conhecidas até o momento.

Esta pesquisa é motivada pela existência de lacunas no conhecimento das propriedades dessas ondas e de suas capacidades em influenciar a variabilidade no fluxo de elétrons de alta energia no cinturão externo de Van Allen quando ocorre o acoplamento com diferentes estruturas do vento solar, como ICMEs (*Interplanetary Coronal Mass Ejection* - Ejeção de Massa Coronal Interplanetárias) e HSSs (*High Speed Streams* - Feixes de Vento Solar de Alta Velocidade). Compreender o papel das ondas *Chorus* nos processos de espalhamento e difusão por *pitch angle* sob a influência dessas estruturas interplanetárias tem o potencial de melhorar os modelos de partículas e, por conseguinte, contribuir para o aprimoramento das previsões do fluxo de elétrons relativísticos na região do cinturão de radiação externo. Essa melhoria é crucial para garantir a segurança de astronautas e equipamentos em missões espaciais, bem como para proteger satélites que operam no ambiente espacial.

A análise da atividade das ondas *Chorus* na magnetosfera terrestre sob a influência de diferentes estruturas interplanetárias, como abordado nesta tese, é de grande relevância, e ao fazer uma análise de estudos de caso, esta pesquisa oferece uma abordagem que busca uma compreensão aprofundada dos fenômenos, bem como de seus mecanismos, que visam englobar descrições físicas partindo desde a origem do distúrbio até o mecanismo responsável pela variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos do Cinturão de Radiação de Van Allen. As teses/hipóteses que geramos têm implicações significativas tanto para a comunidade científica quanto para a indústria espacial. Eles contribuem para aprimorar a compreensão do ambiente espacial e, conseqüentemente, para a segurança de astronautas e equipamentos em futuras missões espaciais.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivos gerais

O objetivo principal deste trabalho é estudar as principais características das ondas *Chorus* no modo *Whistler* detectadas na magnetosfera interna e descrever os mecanismos de interação dessas ondas com os elétrons relativísticos no cinturão de radiação externo durante a influência de diferentes estruturas interplanetárias.

3.1.1 Objetivos específicos

Para cumprir o objetivo geral desta tese, faz-se necessária a realização dos seguintes objetivos específicos abaixo:

- 1) Definir o período em estudo de acordo com o tempo de vida das sondas Van Allen.
- 2) Utilizar os dados do meio interplanetário para separar os eventos de ICME e HSS dentro do período em estudo.
- 3) Utilizar os dados de fluxo de elétrons de alta energia para verificar a sua variabilidade nos eventos selecionados.
- 4) Classificar os eventos por tipo de estrutura magnética do meio interplanetário em (ICME e/ou HSS).
- 5) A partir dos dados de campo elétrico e magnético *in situ* (medidos no cinturão de radiação externo), identificar a ocorrência de ondas *Chorus* nos eventos selecionados.
- 6) Realizar uma varredura para todo o período de interesse, com um levantamento dos eventos de atividade de ondas *Chorus*.
- 7) Representar graficamente as ondas *Chorus* e identificar suas assinaturas.
- 8) Distinguir e caracterizar perturbações na faixa de frequência das ondas *Chorus*, em eventos distintos no período de interesse deste estudo.
- 9) Quantificar a atividade de onda *Chorus* e suas influências no cinturão de radiação.

10) Relacionar padrões físicos observados na magnetosfera que podem conduzir mudanças nos cinturões de radiação externos, via geração de ondas *Chorus* após a chegada de uma estrutura.

11) Investigar o papel das ondas *Chorus* na relação com o *dropout* (diminuição do fluxo) e *enhancement* (aumento do fluxo) observado no cinturão de radiação externo, relacionando essas variações também a atividades e parâmetros do vento solar.

12) Aprofundar através de estudos de caso o entendimento de interação onda-partícula *Chorus*.

4 REVISÃO TEÓRICA

A Terra possui um campo magnético intrínseco que impede a penetração direta de partículas oriundas do vento solar em nossa atmosfera (ECHER, 2010). A interação entre o vento solar e o campo magnético interplanetário com o campo magnético de terrestre estabelece uma região que envolve a Terra, denominada Magnetosfera. A Figura 4.1 ilustra, de forma simplificada, as principais regiões da magnetosfera, a partir de uma visão perpendicular ao plano da eclíptica, identificando as diversas estruturas com suas respectivas denominações (KIVELSON; RUSSELL, 1995).

Figura 4.1 - Principais regiões da Magnetosfera.

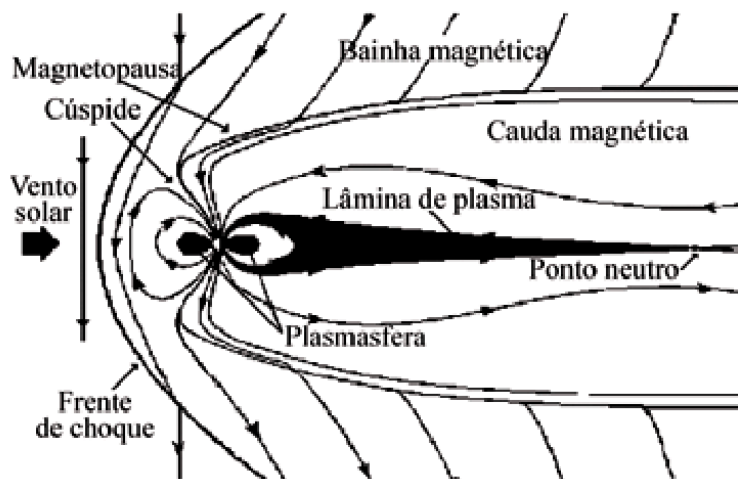


Ilustração simplificada das principais regiões da magnetosfera, para um corte perpendicular ao plano da eclíptica, com suas respectivas denominações e divisões.

Fonte: Adaptado de Kivelson e Russell (1995).

As dimensões da magnetosfera, ilustradas na Figura 4.1 artisticamente, são determinadas pelo equilíbrio entre a pressão dinâmica do vento solar e pressão magnética do campo geomagnético (KIVELSON; RUSSELL, 1995). A morfologia criada por essa interação apresenta regiões do espaço com características físicas e espaciais distintas. Como a parte frontal ao Sol, região diurna achatada, e a parte traseira ou noturna, alongada, adquirem esse formato pela compressão e arraste dinâmico das linhas de campo (FORMISANO; AMATA, 1976), a magnetosfera é composta por zonas que apresentam características distintas onde as principais regiões podem ser divididas da seguinte maneira:

⇒ Frente de Choque - Estrutura gerada pela interação do vento solar supermagnetosônico com o campo magnético da Terra, situada no lado diurno à frente da magnetopausa.

⇒ Bainha magnética - Região localizada entre a frente de choque e a magnetopausa, sendo caracterizada por ter alta turbulência.

⇒ Magnetopausa - Região de fronteira do campo geomagnético e interplanetário.

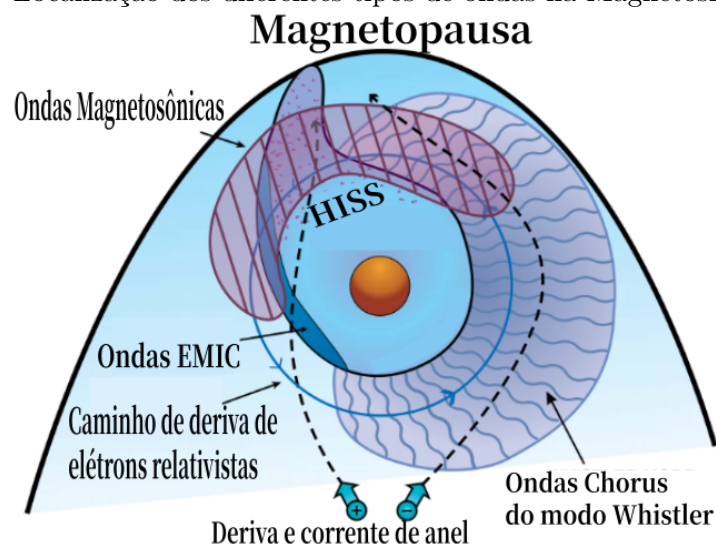
⇒ Cúspide - Localizada em altas latitudes ao redor dos polos magnéticos.

⇒ Plasmasfera - Região mais interna da magnetosfera.

⇒ Cauda magnética - Estende-se para longe da Terra em sua porção noturna.

A forma global da magnetosfera é determinada pelo equilíbrio de pressão dinâmica do vento solar e a pressão magnética da magnetosfera (ECHER, 2010) e tem características de plasma diferentes com presença de atividades de ondas em uma vasta gama de frequências, e suas respectivas regiões preferenciais de acordo com a morfologia da magnetosfera, conforme, mostrado por Thorne (2010) em seu trabalho, evidenciando atividades de ondas para algumas regiões específicas. A distribuição das ondas estudadas na magnetosfera é apresentada na Figura 4.2.

Figura 4.2 - Localização dos diferentes tipos de ondas na Magnetosfera terrestre.



Tipos de ondas prevalentes nas distintas regiões da Magnetosfera da Terra e suas áreas de predileção para manifestação.

Fonte: Adaptado de Thorne (2010).

Podem-se associar as diferentes zonas da magnetosfera a diferentes regiões com maior probabilidade de ocorrência de determinadas ondas devido a características de plasma diferente. A Figura 4.2 demonstra algumas ondas magnetosféricas e suas regiões preferenciais. Entretanto as interações de ondas presentes não dependem apenas do meio de propagação, elas tem relação com os mecanismos de geração.

As ondas na magnetosfera são geradas devido às perturbações no campo magnético terrestre, causadas pelas perturbações do vento solar no meio interplanetário, cujas estruturas interagem com a magnetosfera, causando oscilações em uma vasta gama de frequências que podem ser detectadas no espaço, indo de poucos ciclos por segundos até milhares de ciclos (LI et al., 2015). Essas oscilações são desencadeadas por perturbações solares ou atmosféricas em geral como ICMEs (*Interplanetary Coronal Mass Ejection*), HSS (*High Speed Stream*), o próprio vento solar, flutuações e inconstâncias do IMF (*Interplanetary Magnetic Field*), compressão e relaxamento da magnetosfera, injeção de partículas externas, descargas atmosféricas, ondas gravitacionais e variações em correntes internas. Todos contribuem para a formação de ondas, de acordo com Kamide e Chian (2007).

Especificamente na região dos cinturões de radiação existe uma maior variabilidade e interação com partículas por meio de ondas (TSURUTANI; SMITH, 1977). Assim, um dos focos do trabalho vem a ser a região dos cinturões de radiação de Van Allen, além do fato das ondas *Chorus* do modo *Whistler* apresentarem características de interação com partículas confinadas nessa região (mais especificamente elétrons relativísticos).

4.1 Cinturões de radiação de Van Allen

A formação descrita da Magnetosfera e a sua proteção imposta pelo campo magnético terrestre têm a capacidade de capturar partículas energéticas que adentram essa camada geralmente pelos polos magnéticos, através dos cúspides (BAUMJOHANN; TREUMANN, 2012). Essas partículas podem ser confinadas pelo campo magnético terrestre ou precipitarem na atmosfera. O movimento das partículas confinadas apresenta um comportamento padrão: sua órbita e trajetória dependem da sua energia e momento (ECHER, 2010) (AKASOFU; CHAPMAN, 1972). As forças impostas em uma partícula confinada no campo magnético são regidas pela força de Lorentz.

Dessa forma o movimento para uma partícula de carga q é resultado da soma das forças elétricas provenientes de um campo elétrico \vec{E} , dada por $\vec{F}_e = q\vec{E}$. Somado às forças do campo magnético que dependem da carga q da partícula, que se des-

loca com uma velocidade vetorial \vec{v} , no campo magnético \vec{B} , dá-se origem à força magnética $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$.

A topologia dipolar, juntamente à distribuição espacial da intensidade do campo geomagnético, que é caracterizado por linhas do campo magnético que convergem em latitudes elevadas nos polos e um campo magnético mínimo relativo no equador, aprisiona as partículas (SPJELDVIK; ROTHWELL, 1985). Desta forma as partículas que espiralam em torno das linha de campo, ao chegarem em altas latitudes, deparam-se com linhas mais concentradas, portanto com campo magnético mais intenso, o que faz com que a partícula seja refletida. Pizzella et al. (1962) acreditam que a maioria das partículas aprisionadas é de origem do vento Solar. Por esta razão o campo magnético da Terra é capaz de confinar as partículas carregadas. Essas partículas carregadas são regidas pelas forças de Lorenz e podem ser descritas, conforme Baumjohann e Treumann (2012), pela decomposição de três movimentos:

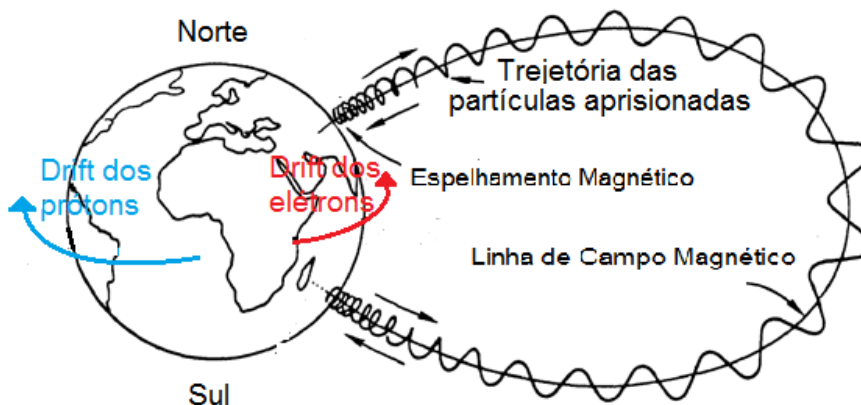
⇒ Movimento de giro da partícula em torno das linhas de campo (movimento ciclotrônico);

⇒ Movimento de ida e volta ao longo de uma linha de campo magnético (movimento de *bouncing*);

⇒ Movimento ao longo de uma superfície fechada entorno da Terra (movimento de *drift* ou deriva).

Os três movimentos de uma partícula confinada estão esquematizados na Figura 4.3. Em azul, a representação do movimento para os prótons e, em vermelho, para elétrons:

Figura 4.3 - Ilustração dos movimentos de partículas confinadas no campo magnético da Terra.



Desenho descritivo dos três tipos de movimento de partículas confinadas no campo magnético da Terra.

Fonte: Modificada de Spjeldvik e Rothwell (1985).

Para um período geomagnético calmo, os três movimentos que uma partícula aprisionada no campo magnético terrestre realiza podem ser descritos em função de três variáveis físicas mensuráveis conhecidas como invariantes adiabáticos (BAUMJOHANN; TREUMANN, 2012). O primeiro invariante adiabático se refere à conservação do momento magnético μ , isto é, $\frac{d\mu}{dt} = 0 \iff \mu = \text{constante}$ ou,

$$\mu_m = \frac{mV_{\perp}^2}{2B}, \quad (4.1)$$

μ_m descreve o movimento de giro ao redor de uma linha de campo magnético B .

Fisicamente, o segundo invariante adiabático J ou invariante longitudinal é o movimento de ir e vir da partícula ao longo da linha de campo magnético, escrito matematicamente como:

$$J = \oint \vec{P} \cdot d\vec{s} = \text{constante}, \quad (4.2)$$

onde P é o momento da partícula ao longo da linha de campo e ds é o elemento de caminho. A integral de caminho refere-se a uma oscilação completa da partícula (GOMBOSI, 1998).

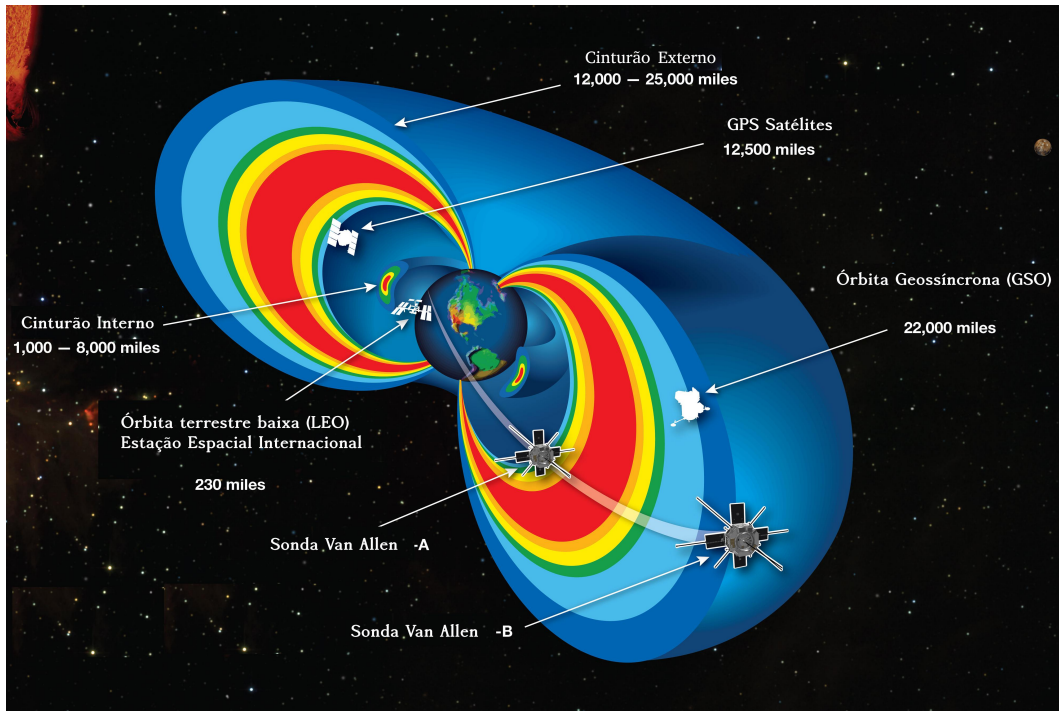
O terceiro invariante φ , também conhecido como fluxo invariante é resultado da topologia do campo magnético, bem como do efeito do gradiente das linhas de campo e está associado ao movimento de deriva da partícula:

$$\varphi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \text{constante}, \quad (4.3)$$

onde \vec{B} é o vetor campo magnético e $d\vec{s}$ é o vetor elemento de área. A integral é estimada sobre toda a superfície fechada (GOMBOSI, 1998). O movimento de deriva, no qual íons se movem em uma direção e elétrons na outra, gera um sistema de corrente elétrica conhecido como corrente anelar. Uma maneira de representar os dados usando o terceiro invariante é o parâmetro L^* , ou $L - star$, (ROBERTS, 1969). O parâmetro L^* , representa a distância radial na região equatorial onde um elétron residiria se todos os campos externos fossem removidos, deixando apenas o campo geomagnético interno.

Os tempos de oscilação dos movimentos descritos pelos invariantes, segundo Baumjohann e Treumann (1996), são, para o primeiro invariante μ , da ordem de milissegundos, o segundo invariante J , da ordem de décimos de segundos e o terceiro invariante φ , da ordem de minutos. Esse tempo de oscilação da partícula no campo é fator crucial para que em determinadas situações ocorra a violação dos respectivos invariantes (GOMBOSI, 1998; BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996). Os movimentos de partículas carregadas e confinadas na magnetosfera interna criam uma região com o formato de dois toroides, sendo um interno e outro externo, conhecidos como cinturões de radiação ou cinturões de Van Allen (ALLEN; FRANK, 1959), ilustrados na Figura 4.4. Investigações conduzidas por sondas espaciais identificaram a existência dessas regiões em diferentes níveis de altitude, onde a densidade de partículas varia para diferentes faixas de energia. O cinturão interno, estimado a ter de 6000 a 10000 km, em baixas latitudes e o externo, o qual compreende uma extensão que varia de três até aproximadamente seis raios terrestres no plano equatorial (ALLEN; FRANK, 1959; HARGREAVES, 1992). O cinturão externo é composto principalmente por elétrons de altas energias, variando de dezenas de keV a algumas dezenas de MeV. Enquanto o interno tem sua população em grande maioria composta por prótons, com energias entre 100 keV até 100 MeV (LAKHINA et al., 2010).

Figura 4.4 - Ilustração dos cinturões de radiação interno e externo de Van Allen.

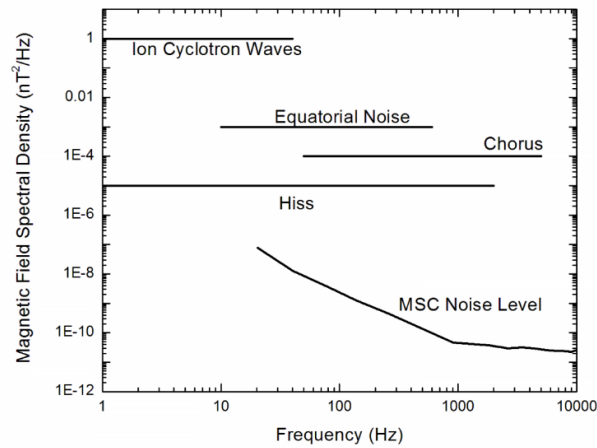


Representação artística dos cinturões de radiação interno e externo de Van Allen. Também são representadas as posições de alguns tipos de órbitas, tais como de satélites de baixa órbita (LEO), satélites GPS e órbitas geossíncronas, além das Van Allen Probes.

Fonte: Adaptado de *NASA (2022)*.

A Figura 4.5 quantifica a faixa de frequência de diversas ondas na magnetosfera, cada uma com assinaturas características e locais de predileção no ambiente espacial, como visto na Figura 4.2. Essas ondas carregam informações do meio em que se propagam e interagem com partículas carregadas, o que pode amplificá-las, amortecê-las ou alterar as condições do meio (LAKHINA et al., 2010). A Figura 4.5 apresenta as densidades espectrais de potência do campo magnético em relação às frequências das ondas, ilustrando as médias das densidades espectrais correspondentes a essas ondas.

Figura 4.5 - Densidade espectral de potência.



Densidade espectral de potência na faixa de frequência das ondas *Chorus*, *Hiss*, Ion-cilotron, MSC e Equatorial Noise.

Fonte: Adaptado de *EMFISIS (2023)*.

Ondas *Chorus* do modo *Whistler* e elétrons, por terem características de frequência muito próximas às frequências de *bounce* e ciclôtrônica de elétrons confinados no cinturão externo de radiação de Van Allen, podem assim interagir ressonantemente (LAKHINA et al., 2010; MEREDITH et al., 2013) e causar a violação do segundo e/ou primeiro invariantes adiabáticas, que pode dar seguimento de perdas e/ou aumentos localizados de elétrons no cinturão externo de radiação. Portanto, o estudo das ondas *Chorus* na magnetosfera tem papel muito importante para a compreensão da variabilidade do cinturão externo de radiação. Para compreender os mecanismos responsáveis pela variabilidade do fluxo de partículas energéticas nessa região da magnetosfera terrestre, é essencial recorrer a instrumentos e medidas *in situ*. Nesse contexto, as sondas gêmeas Van Allen, destacadas na Figura 4.4, desempenharam um papel revolucionário no estudo dos cinturões de radiação.

Essas sondas, equipadas com instrumentação de ponta e com uma órbita através dos cinturões de radiação, revolucionaram o estudo e a compreensão dessa região desafiadora do espaço. Essa missão permitiu a coleta de dados praticamente em tempo real, possibilitando análises detalhadas das interações complexas entre partículas energéticas e as ondas presentes nos cinturões de Van Allen. Os resultados obtidos por meio dessas sondas contribuíram significativamente para a nossa compreensão dos processos físicos com trabalhos inovadores como de Reeves et al. (2013)

indicando os principais mecanismos de aceleração de elétrons nos cinturões de radiação, ou de explorações novas como a de THORNE (2013), onde as interações entre ondas e elétrons de alta energia foram investigadas, evidenciando as ondas *Chorus* como cruciais no processo de aceleração dessas partículas. Outros estudos, como o de Engebretson et al. (2018) concentraram-se na perda de elétrons relativísticos abordando uma investigação sobre o impacto de outras formas de ondas. Esta missão, portanto, proporcionou e ainda tem proporcionado vários estudos, abrangendo uma ampla gama de cenários e avaliando as interações competitivas entre várias ondas magnetosféricas e processos físicos que merecem investigações mais aprofundadas. Essas pesquisas foram disponibilizadas à comunidade científica em estudos como o de (DA SILVA et al., 2020; MARCHEZI et al., 2022; DA SILVA et al., 2021b; DA SILVA et al., 2019; SOUZA et al., 2017; ALVES et al., 2016; ALVES et al., 2023), entre outros. Esses estudos contribuíram significativamente para a compreensão do ambiente espacial e das complexas interações entre partículas e ondas nos cinturões de radiação.

4.2 Ondas *Whistler*

Ondas são perturbações que exibem características cíclicas e apresentam um caráter ondulatório, transportando energia e propagando-se em um meio ou no vácuo. A natureza das ondas pode ser classificada em dois tipos:

- Ondas mecânicas: São ondas que precisam de um meio material para sua propagação. O comportamento desse tipo de onda pode ser predito pelas Leis de Newton.
- Ondas eletromagnéticas: São resultado da combinação de campo elétrico com campo magnético, tendo como principal característica não precisar de um meio material para se propagar. Elas são descritas pelas equações de Maxwell.

As ondas *Whistler* estão dentro da classificação de ondas eletromagnéticas e seguem as equações de Maxwell,

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (\text{Lei de Gauss}), \quad (4.4)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday-Lenz}), \quad (4.5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{Ausência de monopolo magnético}), \quad (4.6)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (\text{Lei de Àmpere-Maxwell}), \quad (4.7)$$

em que \vec{B} é o vetor campo magnético, \vec{E} é o vetor campo elétrico, ρ é a densidade de carga elétrica dada por $\rho = -en$ e \vec{J} é a densidade de corrente elétrica definida como $\vec{J} = \rho \vec{u} = -en\vec{u}$.

A região de interesse é a magnetosfera e as atividades de ondas com variáveis físicas observáveis de relevância estão contidas majoritariamente nos cinturões de radiação, assim a propagação dessas ondas pode ser considerada para um plasma frio e magnetizado (BITTENCOURT, 2013). Os campos eletromagnéticos e os parâmetros de plasma podem ser descritos pelas quatro equações de Maxwell 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7, em associação com as equações dos fluídos em um plasma frio, dadas por:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\vec{u}) = 0 \quad (\text{Equação de continuidade}), \quad (4.8)$$

$$m \frac{D\vec{u}}{Dt} = q(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) - m\nu\vec{u} \quad (\text{Equação de movimento}), \quad (4.9)$$

onde a velocidade média e densidade numérica de elétrons são $\vec{u}(\vec{r}, t)$ e $n(\vec{r}, t)$ respectivamente. A massa é m e a frequência de colisões, ν .

O tratamento matemático e teórico referente à propagação de uma onda em um plasma frio, imerso em um campo magnético é conhecido como teoria magneto-iônica (KAMIDE; CHIAN, 2007). Matematicamente ondas planas com pequenas amplitudes de oscilação podem ser representadas como,

$$\psi(\vec{r}, t) = \psi_o e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (4.10)$$

em que, ψ_o é a amplitude da onda. A relação é válida para expressar as variáveis \vec{E} , \vec{B} , \vec{u} e n como;

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_o e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \\ \vec{B}(\vec{r}, t) &= \vec{B}_o e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \\ \vec{u}(\vec{r}, t) &= \vec{u}_o e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \\ n(\vec{r}, t) &= n_o e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \end{aligned} \quad (4.11)$$

em que, $k = 2\pi/\lambda$ é a magnitude do vetor propagação da onda \vec{k} , $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, $f = 1/T$ é denominado frequência, T é o período e λ o comprimento de onda, ambos para uma oscilação completa. Nota-se que $\vec{k} \cdot \vec{r} = k_x x + k_y y + k_z z$. Se a onda se propaga na direção x , k possui apenas a componente x , desta forma a Equação da densidade em 4.11 pode ter sua parte real expressa por,

$$\Re e \mapsto n = n_o \cos(kx - \omega t) \quad (4.12)$$

onde n pode ser tratada como uma quantidade mensurável (CHEN, 1984). Assim, para um ponto constante da fase da onda, temos $(d/dt)(kx - \omega t) = 0$

$$v_\varphi = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{k} \quad (4.13)$$

sendo esta a velocidade de fase. A velocidade de grupo é obtida da derivada parcial de k em relação à frequência angular da onda ω :

$$v_{gr} = \frac{d\omega}{dk} \quad (4.14)$$

A Equação capaz de mostrar os modos de propagação das ondas planas é conhecida como Equação de Applen-Hartree. É derivada das equações de Maxwell 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 em conjunto com as equações de continuidade e movimento, equações combinadas com as variáveis escritas para ondas planas 4.11, podem ser escritas na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} S - \eta^2 \cos^2 \theta & -iD & \eta^2 \sin \theta \cos \theta \\ iD & (S - \eta^2) & 0 \\ \eta^2 \sin \theta \cos \theta & 0 & (P - \eta^2 \sin^2 \theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = 0 \quad (4.15)$$

onde $\eta = (kc/\omega)$ é o índice de refração do meio e,

$$S = 1 - \frac{(\frac{W_{pe}^2}{\omega^2})(\frac{W_{ce}}{\omega})}{(1 + i\frac{\nu}{\omega})^2 - (\frac{W_{ce}}{\omega})^2} \quad (4.16)$$

$$D = -\frac{(\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2})(\frac{W_{ce}}{\omega})}{(1 + i\frac{\nu}{\omega})^2 - (\frac{W_{ce}}{\omega})^2} \quad (4.17)$$

$$P = 1 - \frac{\left(\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}\right)}{\left(1 + i\frac{\nu}{\omega}\right)} \quad (4.18)$$

a frequência ciclotrônica do elétron é dada por $W_{ce} = eB/m$ e a frequência do plasma é $W_{pe} = \sqrt{\frac{N_o e^2}{m_e \epsilon_o}}$ onde e é a carga do elétron, m_e sua massa e N_o é a densidade de elétrons na região, ϵ_o é a permissividade elétrica no vácuo. Buscando uma solução não trivial para o índice de refração, obtém-se;

$$\eta^2 = 1 - \frac{\left(\frac{W_{pe}^2}{\omega^2}\right)}{Q}, \quad (4.19)$$

a Equação (4.19) é a Equação de Appleton-Hartree em que $Q = (1 + i\frac{\nu}{\omega}) - \left(\frac{W_{ce}}{\omega}\right)^2 \sin^2(\theta) / (2((1 + i\frac{\nu}{\omega}) - \left(\frac{W_{pe}^2}{\omega^2}\right))) \pm [(\frac{W_{ce}}{\omega})^4 \sin^4(\theta) / (4((1 + i\frac{\nu}{\omega}) - \left(\frac{W_{pe}^2}{\omega^2}\right))^2) + (\frac{W_{ce}}{\omega})^2 \cos^2(\theta)]^{(1/2)}$. Esta Equação mostra que os modos de propagação da onda dependem do ângulo θ definido pelo ângulo formado entre os vetores \vec{k} e \vec{B}_o .

As ondas *Whistlers* são ondas com propagação paralela, para $\vec{k} \parallel \vec{B} \Rightarrow \theta = 0^\circ$. Com essa condição, η tem as seguintes soluções para a Equação de Appleton-Hartree,

$$\begin{aligned} \eta^2 &= 1 - \frac{\left(\frac{W_{pe}^2}{\omega^2}\right)}{\left(1 - \frac{\nu}{\omega}\right)} \mapsto RCP \\ \eta^2 &= 1 - \frac{\left(\frac{W_{pe}^2}{\omega^2}\right)}{\left(1 + \frac{\nu}{\omega}\right)} \mapsto LCP \end{aligned} \quad (4.20)$$

também chamadas como relação de dispersão. Existem dois modos de propagação com diferentes condições de polarização, como os representados nas equações em 4.20, onde RCP indica (*Right-hand Circularly Polarized waves*) ou ondas circularmente polarizadas à direita e LCP (*Left-hand Circularly Polarized waves*), ondas circularmente polarizadas à esquerda. Das equações 4.20, pode-se inferir em que meio a onda pode existir e se propagar. A Figura 4.6 ilustra e quantifica a abrangência das ondas do modo *Whistler* RCP e LCP.

Figura 4.6 - Ondas *Whistler* modo RCP e LCP.

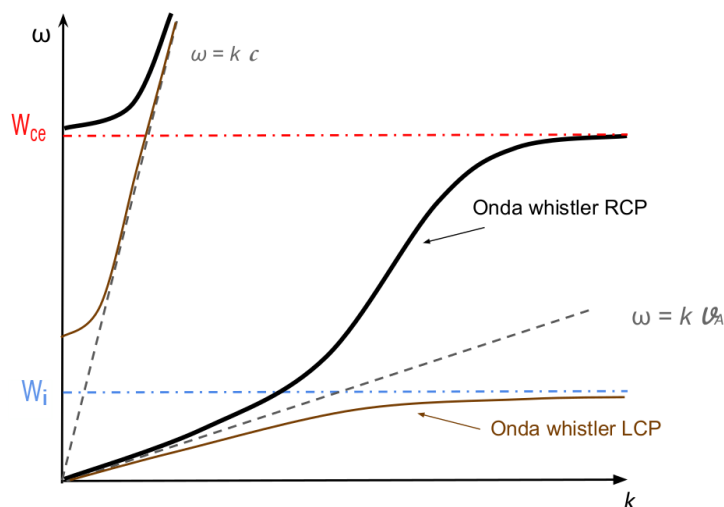


Gráfico artístico de $\omega \times k$; onde ω é a frequência da onda e k é o vetor propagação da onda. Para a relação de dispersão das ondas *Whistler* RCP e LCP, respectivamente em marrom e preto, também são apresentados os valores W_i , W_{ce} , respectivamente a frequência de um íon e a frequência ciclotrônica de um elétron, ambas em corte; também as constantes de velocidade de Alfvén e da luz.

Fonte: Adaptado de Dallaqua (2019).

Para uma onda polarizada circularmente à direita RCP, a curva de dispersão é esboçada na Figura 4.6. Quando a frequência da onda é muito baixa, isso é, menor que W_i , as ondas RCP podem se propagar com características de ondas de Alfvén, já nas frequências intermediárias entre W_i e $|W_{ce}|$, suas características não são restringidas ou alteradas (KAMIDE; CHIAN, 2007). Ondas com maior capacidade de ressonância para com elétrons são ondas RCP. Isso pode ser visualizado pela tendência assintótica das ondas RCP em a relação W_{ce} no gráfico 4.6.

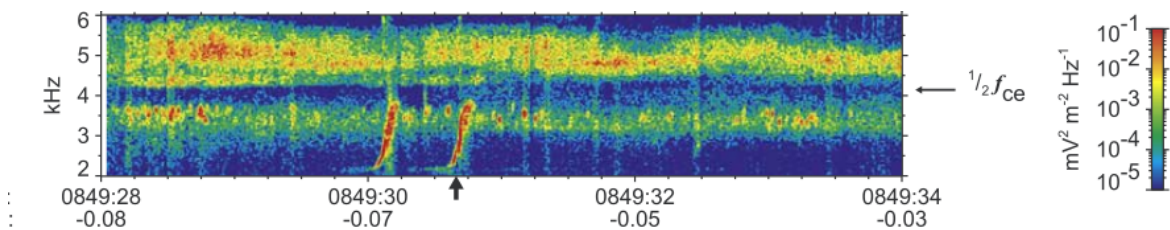
4.3 Ondas *Chorus* no cinturão externo de radiação

As ondas *Chorus* são ondas do tipo *Whistler* coerentes com modo de polarização RCP. A sua faixa de frequência está entre centenas de Hz até dezenas de kHz (LAKHINA et al., 2010). Tsurutani e Smith (1974) definem a faixa de frequência das ondas *Chorus* por $f_{ce} = W_{ce}/2\pi$. Assim, a banda de ação em termos da frequência ciclotrônica para ondas *Chorus* é entre $0,1f_{ce}$ e $0,9f_{ce}$, ainda podendo ser dividida em duas bandas distintas: entre $0,5f_{ce}$ e $0,9f_{ce}$ (banda alta), ou entre $0,1f_{ce}$ e $0,5f_{ce}$ (banda baixa) (SANTOLIK et al., 2003). As ondas *Chorus* são

propriamente entendidas como capazes de produzir *Bursts*, variações abruptas no campo magnético terrestre com valores $\geq 0.2nT$ em períodos de $\sim 0,1s$ até $1s$, as quais podem ser vistas como um pacote composto de sub-elementos.

A atividade das ondas *Chorus* é apresentada no espectrograma de potência das frequências do campo elétrico em função do tempo, medidas na magnetosfera, como representado na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Assinaturas das ondas *Chorus*.



Espectrogramas de potência das frequência do campo elétrico no tempo, com assinaturas ondas *Chorus*.

Fonte: Santolik et al. (2003).

A Figura 4.7 representa assinaturas de ondas *Chorus* no modo *Whistler*. A seta vertical preta na parte baixa aponta para um elemento de *Chorus*. Pelo diagrama de cores podemos identificar um filamento similar ao indicado pela seta e outros elementos menores no período. A atividade dessas ondas tem a assinatura bem marcante, com altas densidades (cores mais quentes na escala de cores), iniciando com frequências de ordem mais baixa e vão evoluindo rapidamente no tempo, justamente como um assovio. Uma das curiosidades das ondas *Whistler* é que seu tom de frequência, quando reproduzido em um gravado, soaria de forma que se um dispositivo de áudio reproduzisse os dados transcritos na Figura 4.7, o som a ser escutado iria se assemelhar-se ao de pássaros cantando pela manhã, daí veio a denominação "*dawn chorus*", ou coro do amanhecer (LAKHINA et al., 2010). O valor indicado por $1/2f_{ce}$ (seta horizontal entre o gráfico e a escala de cores) marca a divisão da banda baixa e da banda alta das ondas *Chorus*. Esses elementos, além de bandas diferentes, podem assumir tons diferentes, como um assovio.

Esses tons podem ser crescentes ou decrescentes, assim eventos diferentes apresentam distintos intervalos de variações temporais e de frequência assim por consequência elementos diferente. A atividade de ondas *Chorus* em tons distintos está associada à região, mas não possui caráter prioritário (SANTOLÍK et al., 2014b; LI et al., 2009). Em geral as emissões são decrescentes no setor noturno da magnetosfera. Já as assinaturas dessas ondas, para a parte frontal da magnetosfera em região diurnas, são geralmente compostas por tons crescentes (LAKHINA et al., 2010). As emissões também são curtas e pontuais na ordem de de $0,1s$ (TSURUTANI; LAKHINA, 1997). Pela condição das ondas RCP propagarem-se ao longo das linhas de campo, pode-se observar o mapeamento das linhas de campo magnético terrestre, medido por sondas, como visto na Figura 4.8. Essas características desempenham um papel fundamental na identificação e caracterização da atividade das ondas *Chorus*. Essas especificações são abordadas no Capítulo 5 Dados e Metodologia.

Figura 4.8 - Identificação de atividade de ondas *Chorus*.

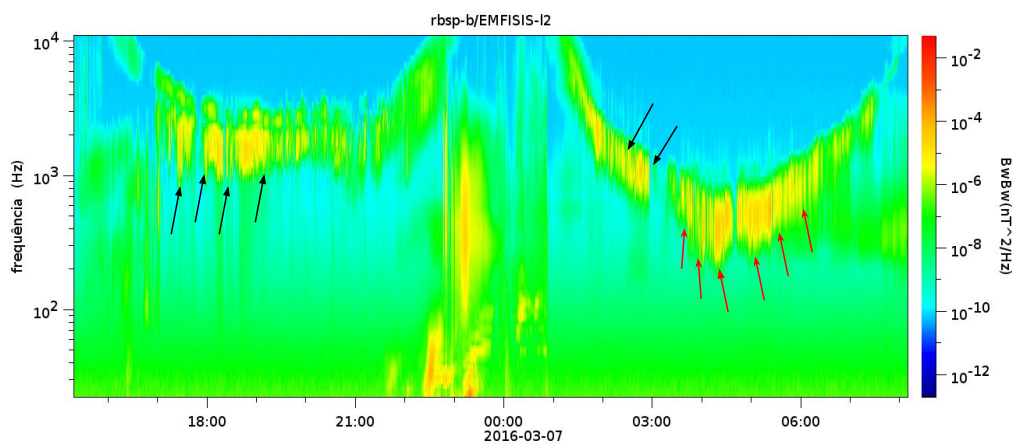


Gráfico temporal (em UT - *Universal Time*), que compreende um intervalo de tempo de ~ 17 horas para o período entre às 15 UT do dia 06 até 08 horas do dia 07 de março de 2016; representando o espectrograma de campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS-(MAG) a bordo da sonda *Van Allen Probes B*, onde o mapa de cor representa a densidade por $BwBw(nT^2/Hz)$ e o eixo $f(Hz)$, a frequência. As setas pretas indicam atividade de ondas *Chorus* em bandas altas. As setas vermelhas indicam a presença de *Chorus* em bandas baixas. Observa-se também o mapeamento das ondas *Chorus*.

Fonte: Produção autoral.

4.4 *Pitch Angle* e cone de perdas.

Partículas confinadas no campo geomagnético, regidas pela força de Lorentz, apresentam uma trajetória em espiral com uma velocidade paralela V_{\parallel} e perpendicular V_{\perp} ao longo da linha de campo magnético. O *pitch angle* de uma partícula pode ser entendido como o ângulo formado entre a direção da trajetória da partícula e a direção tangencial à linha do campo geomagnético (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996). Por definição o *pitch angle* se refere ao ângulo entre a velocidade da partícula e a velocidade paralela dela sobre o equador magnético.

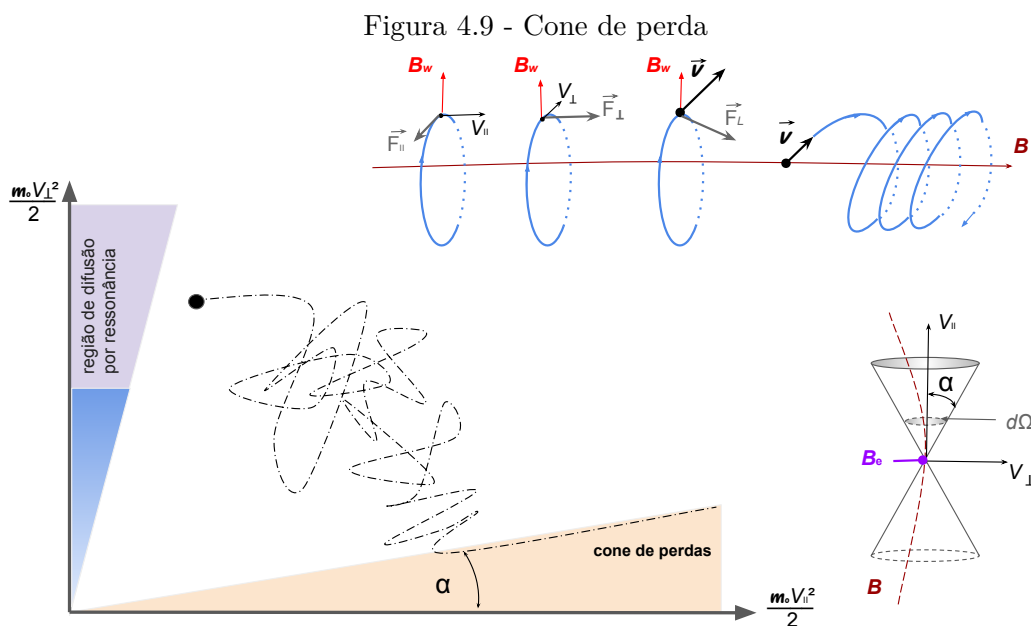


Ilustração do cone de perdas, onde V_{\parallel} e V_{\perp} são a velocidade paralela e velocidade perpendicular da partícula, respectivamente; B campo magnético terrestre, $d\Omega$ ângulo sólido. O ponto definido está sobre a linha do equador magnético. O diagrama ilustra o movimento de uma partícula e sua variação de energias no espaço de fase das energias para $E_{\parallel} \times E_{\perp}$, onde E_{\parallel} é a energia cinética paralela e E_{\perp} , energia cinética perpendicular à partícula.

Fonte: Adaptado de Roberts (1969), Baumjohann e Treumann (1996).

Uma vez que a energia cinética da partícula é constante, a relação 4.1 para μ_m é válida, e assim obtém-se;

$$\frac{\sin^2 \alpha}{B} = \text{constante}, \quad (4.21)$$

em que α é o *pitch angle*. A Figura 4.9 representa a grandeza geometricamente.

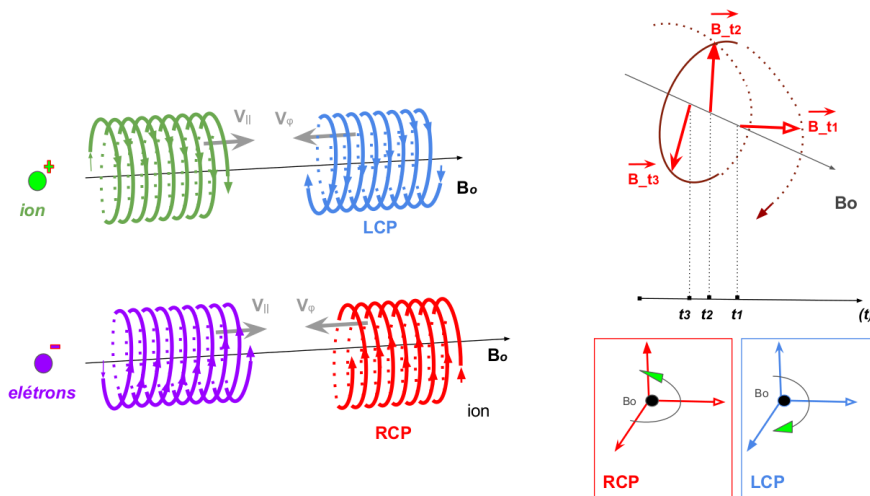
4.5 *Pitch Angle Scattering*

A Equação 4.21 mostra que variações em B resultam sistematicamente em mudanças em $\sin^2 \alpha$, mantendo a razão constante. O cone de perdas é definido a partir do ângulo α . O menor ângulo sólido formado por partículas com energia suficiente para adentrar os polos magnéticos define-se por cone de perdas (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996). O mecanismo capaz de variar α , levando o espaço da energia da partícula até o cone de perdas, é denominado *pitch angle scattering*. As ondas *Chorus* são consideradas uma das principais responsáveis pela perda de partículas do cinturão por *pitch angle scattering* (SUMMERS; THORNE, 2003), ocorrendo assim a quebra do primeiro ou segundo invariante adiabático por conta deste mecanismo de interação onda partícula.

4.6 Mecanismo de interação

Tendo em vista que partículas confinadas no cinturão de radiação executam o movimento ciclotrônico descrito pelo primeiro invariante adiabático e o executa ao longo do campo magnético. Quando uma partícula confinada é sujeita a interações com uma onda eletromagnética, movendo-se de maneira paralela a esse campo, ela pode interagir intensamente com as ondas (TSURUTANI; LAKHINA, 1997). A condição para esta ressonância entre partículas relativísticas e ondas *Whistler* está esquematizada na Figura 4.10, bem como o conceito de modo de polarização. Além disso, pode-se citar o exemplo da definição de onda polarizada à direita e onda polarizada à esquerda, com a premissa da rotação da onda com relação ao campo magnético no tempo em uma posição fixa.

Figura 4.10 - Propagação de elétrons e íons em ondas RCP e LCP e definição do sentido de polarização.



Representação esquemática da ressonância ciclotrônica de primeira ordem por *Doppler-Shifted*, entre ondas eletromagnéticas polarizadas à esquerda, LCP em azul, e à direita, RCP em vermelho. O íon é representado em verde claro, o elétron em roxo, seus movimentos respectivos estão ao longo da linha de campo preta B_o em suas cores respectivas, $V_{||}$ se refere à velocidade paralela de propagação das partículas, V_{φ} das ondas no meio; ao lado um esquema que exemplifica o conceito de ondas polarizadas RCP e LCP.

Fonte: Adaptado de Tsurutani e Lakhina (1997).

A condição de ressonância para essas ondas *Chorus* pode ser expressa matematicamente por:

$$\omega - k_{||}v_{||} = NW_{ce}/\gamma \quad (4.22)$$

onde $k_{||}$ e $v_{||}$ são os componentes paralelos a B_o , N é o número harmônico e $\gamma = (1 - V^2/c^2)^{-1/2}$ é o fator relativístico, V é a velocidade da partícula. Para N positivo as ondas e as partículas estão viajando em direções opostas ao longo do campo magnético e interagem entre si, sendo deslocadas por *Doppler-shifted* até a frequência ciclotrônica ou seus harmônicos. Existem ainda as interferências chamadas de "anômalas": isso ocorre quando a velocidade da partícula está na mesma direção de V_{φ} das ondas. Dessa forma as ondas da RCP podem interagir com os íons que se movimentam em sentido anti-horário. Para que ocorra a interação dos campos das ondas sobre as partículas, ou seja, para uma interação "anômala", deve-se

atentar às condições de velocidade para que as forças Lorentz possam atuar sobre as partículas.

Quanto mais energéticas as partículas, menor a frequência das ondas necessárias para ressonância (LAKHINA et al., 2010). A expressão 4.22 pode ser expressa em termos da velocidade paralela da partícula ressonante dada por:

$$v_{||r_N} = v_\varphi - (NW_{ce}/k_{||}\gamma) \quad (4.23)$$

onde o índice em r_N refere-se ao harmônico e assume apenas valores inteiros. Basicamente para $N < 0$ ocorre a interação "anômala" e para $N > 0$, interação por *Doppler-shifted*. A ressonância fundamental $v_{||r_1}$ é:

$$v_{||r_1} = v_\varphi(1 - W_{ce}/\omega\gamma), \quad (4.24)$$

pode-se notar na Equação 4.24 que a velocidade da fase é diretamente proporcional à velocidade dos elétrons ressonantes. Assim, quanto maior a velocidade de fase da onda, maior será a velocidade paralela dos elétrons ressonantes. Pode-se obter a energia cinética paralela dos elétrons em ressonância ciclotrônica com a onda *Chorus*, por:

$$E_{||r_N} = \frac{mv_{||r_N}^2}{2} \equiv \frac{B_o^2}{8\pi n} \quad (4.25)$$

A troca de energia é mais intensa perto de mínimos de B_o , fato notável pela Equação 4.25. Assim os elétrons energéticos tem locais preferenciais de interação com ondas *Chorus* (LAKHINA et al., 2010).

A interação desses elétrons pode ocorrer por mais de um ciclo de onda. Subelementos de ondas *Chorus* intensificam a velocidade paralela da partícula ao ponto de sofrerem grandes alterações no *Pitch-Angle*. Isso pode ocorrer em uma única interação desses pacotes de sub-elementos, acarretando na perda de partículas por *Pitch-Angle Scattering* (SUMMERS; THORNE, 2003; LAKHINA et al., 2010).

A Figura 4.8 mostra esses pequenos pacotes de ondas *Chorus*. Lakhina et al. (2010) calculou o tempo de interação ressonante Δt entre os elétrons e as ondas *Chorus*. Usando a relação de dispersão para ondas RCP e o tempo Δt pode-se encontrar a variação do *Pitch-Angle* $\Delta\alpha$ levando em conta a velocidade relativa entre os elétrons

e as ondas, respectivamente em 4.26 e 4.27:

$$\Delta t = \frac{\omega \tau}{\omega + W_{ce}/2} \quad (4.26)$$

$$\Delta \alpha = \frac{B}{B_0} \frac{\omega \sin \phi}{\frac{\omega}{W_{ce}} + \frac{1}{2}} \left[1 + \frac{\omega \cos^2 \alpha}{W_{ce} - \omega} \right] \tau \quad (4.27)$$

onde ϕ é o ângulo entre V_{\perp} e B . Ainda há autores como Tsurutani et al. (2009), que acreditam que para determinados níveis de energia, seja possível aproximar-se $\Delta \alpha$ por:

$$\Delta \alpha \simeq \frac{B}{B_0} \Omega \Delta t \quad (4.28)$$

Essas abordagens são amplamente aceitas pela comunidade para interações em níveis de energia não relativísticos. No entanto, em regimes relativísticos, outras considerações se tornam essenciais, exigindo descrições mais rigorosas, como demonstrado nos estudos realizados por (DA SILVA et al., 2020; ALVES et al., 2023).

5 DADOS E METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta os instrumentos utilizados para a obtenção dos dados, os critérios estabelecidos para definir o período em estudo e a metodologia aplicada para alcançar o objetivo principal da tese.

5.1 Descrição e escolha dos instrumentos

A missão Van Allen Probes é composta por duas sondas gêmeas e foi lançada pela NASA em 30 de agosto de 2012. Sua órbita é geossíncrona, com um perigeu de $\approx 1(RE)$ e um apogeu de $\approx 6(RE)$ em relação ao centro da Terra, bem como uma inclinação de $10,2^\circ$ e um período orbital de aproximadamente 9 horas. Em alguns períodos as sondas podem alcançar L^* mais externo, atingindo até L^* em torno de 7. Suas órbitas excêntricas são quase idênticas fazendo assim uma cobertura de toda a região do cinturão de radiação. O intervalo de dados das sondas Van Allen - disponível com alta confiabilidade - é de Outubro 2012 a Dezembro de 2018. Uma vez que, o intuito do trabalho envolve correlacioná-los com os dados do meio interplanetário, o qual tem-se um maior intervalo de tempo de observações para as variáveis de interesse no trabalho, o período de estudo fica delimitado pelo período de ação das sondas Van Allen.

A obtenção para interpretação dos dados do meio interplanetário e vento solar se dá através dos instrumentos SWEPAM - *Solar Wind Electron Próton Alpha Monitor* e MAG - *Magnetic Field Experiment*, a bordo do satélite ACE - *Advanced Composition Explorer* (STONE et al., 1998). Os dados que contemplam o período de 2015 até o término do período de estudo são obtidos por meio do satélite DSCOVR - *Deep Space Climate Observatory*, que tem o papel de suceder o satélite ACE, lançado através de uma parceria entre a NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*, a NASA - *National Aeronautics and Space Administration* e a Força Aérea dos Estados Unidos da América. Ambos os dados estão disponíveis para consulta através do endereço: <<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>>. Esses dados são essenciais para quantificar e interpretar as estruturas interplanetárias que são objetos de estudo de casos, com o objetivo de correlacioná-los com os dados da região do cinturão de Van Allen.

Os dados das sondas Van Allen foram obtidos por dois conjuntos de instrumentos: *Thermal Plasma Suite* (RBSP-ECT) (BAKER et al., 2013) e *Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science* (EMFISIS) (KLETZING et al., 2013). Eles estão disponíveis em <https://rbsp-ect.lanl.gov/data_pub/>

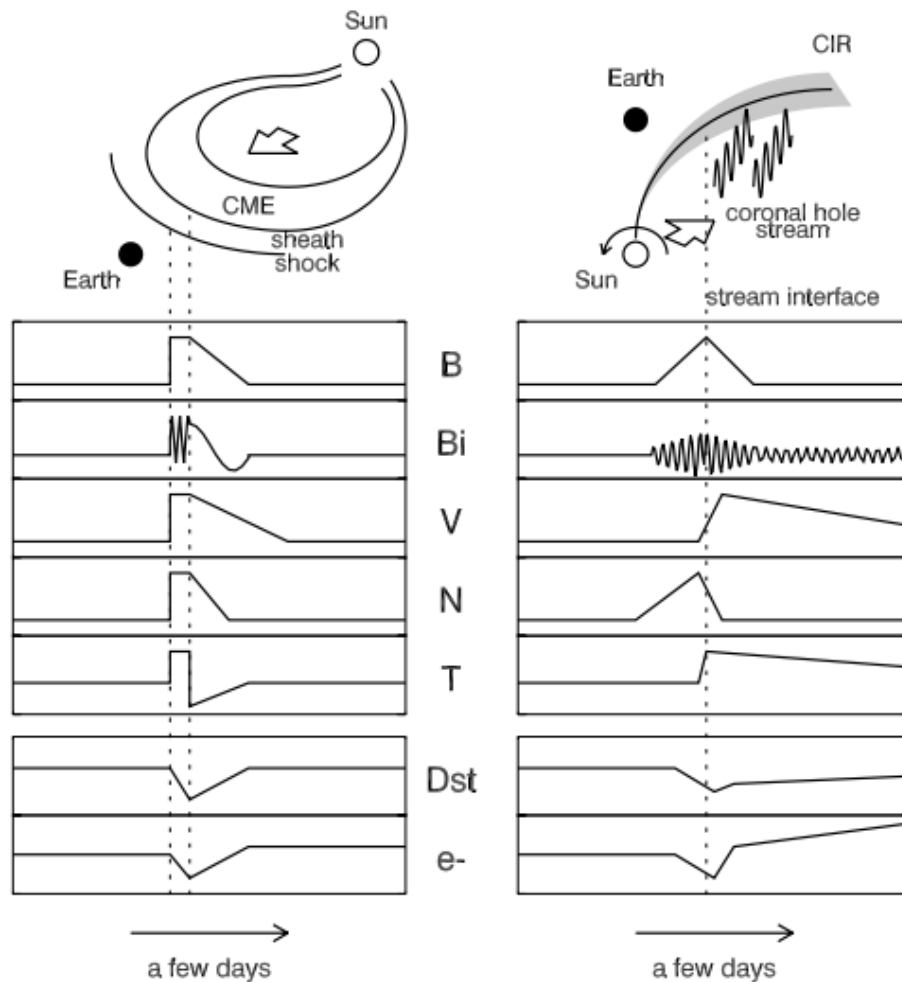
e <<https://emfisis.physics.uiowa.edu/Flight/>>, respectivamente. Tais sondas possuem equipamentos idênticos para avaliar a composição e energia das partículas presentes no cinturões de radiação. Essa avaliação se dará através do instrumento *Relativistic Electron Proton Telescope* (REPT) (BAKER et al., 2013), capaz de fornecer dados do fluxo de elétrons, equipamento que faz parte do conjunto de instrumentos do (RBSP-ECT). As investigações dos Campos Magnéticos e Elétricos da região, bem como as atividades de ondas *Chorus* na região, foram feitas pela interpretação das medições dos instrumentos (EMFISIS), que coleta informações na faixa de frequência de 10 Hz e 400 kHz. As propriedades específicas de caracterização das ondas *Chorus*, como a *Wave Normal Angle* (WNA), elipticidade e a planaridade são provenientes do conjunto de dados de Nível 4, já processados e filtrados utilizando-se do método de decomposição de valor singular *singular value decomposition* (SVD) (SANTOLIK et al., 2003).

A maior abundância de elétrons no cinturão de radiação é encontrada no cinturão externo. Portanto, o presente estudo concentra-se na investigação da variabilidade e mecanismo de interação de elétrons na zona externa do cinturão de radiação entre ($3 < L < 7$). O estudo também visa incluir análises comparativas das assinaturas das ondas *Chorus* na região, com o meio interplanetário. Assim, foi estabelecido como parâmetro de comparação o índice *SYM_H*, muito usado para quantificar a geo-efetividade de estruturas solares. Todas as grandezas vetoriais referentes aos parâmetros do meio interplanetário são apresentadas no sistema de coordenadas *Geocentric Solar Magnetospheric* (GSM).

5.2 Caracterização de estruturas interplanetárias

Típicas variações nos parâmetros interplanetários, causadas por *Interplanetary Coronal Mass Ejections* (ICME), e *High-Speed Streams* (HSS), diferenciam-se em escalas temporal e espacial, e são as principais causadoras de distúrbios no cinturão de radiação de Van Allen, onde as ICMEs podem interagir com a magnetosfera por alguns dias, enquanto as *Corotating Interaction Regions* (CIR), causadas por HSS, podem ter seu tempo de interação de até algumas semanas (KATAOKA; MIYOSHI, 2006). Essas estruturas apresentam características diferentes nos parâmetros do meio interplanetário, índice Dst - (*Disturbance Storm-Time*) (ROSTOKER, 1972) e fluxo de elétrons no cinturão, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 5.1.

Figura 5.1 - Ilustração esquemática de uma ICME e de uma CIR e as variações típicas observadas nos dados medidos no Meio Interplanetário.



Representação esquemática de uma ICMEs e de uma CIRs, respectivamente no painel esquerdo e direito, onde, abaixo deles, são ilustradas as variações típicas dos parâmetros de plasma e do IMF (*Interplanetary Magnetic Field*), índice Dst e fluxo de elétrons no cinturão. Na ordem de cima para baixo, tem-se: ilustração artística da estrutura interplanetária; B , o campo magnético do IMF; B_i , componente cartesiana referente ao campo magnético do IMF; V , velocidade; N , densidade e T , temperatura das partículas do vento solar. Dst refere-se ao índice geomagnético (*Disturbance Storm-Time*) e e^- refere-se ao fluxo de elétrons no cinturão de radiação de Van Allen.

Fonte: Adaptado de Kataoka e Miyoshi (2006).

Pode-se notar, conforme ilustra o painel esquerdo da Figura 5.1, que para as ICMEs existe um aumento repentino em todos os parâmetros do vento solar, campo magnético interplanetário B , velocidade do vento V , densidade N e temperatura T , as quais são assinaturas fortes da passagem de ICMEs. Esse aumento repentino

pode ser medido horas antes do choque da estrutura com a Terra. Ligeiramente após o aumento abrupto dos parâmetros (horas) de vento solar, um patamar quase que constante pode ser observado nos dados. Nesse instante fica clara a queda do índice Dst e o fluxo de elétrons e^- no cinturão de radiação, período delimitado por duas linhas verticais pontilhadas no painel esquerdo da Figura 5.1, onde a primeira linha coincide com o momento do choque interplanetário causado por uma ICME. Nota-se que existe uma flutuação altamente turbulenta na componente cartesiana referente ao IMF B_i .

Após a segunda linha vertical pontilhada, na Figura 5.1, à esquerda, podemos identificar uma suave rotação na componente do IMF, de positivo para negativo, uma baixa temperatura de plasma e uma queda nos demais parâmetros do meio interplanetário, além do aumento gradual do índice Dst e no fluxo de elétrons. Essas características demonstram a existência de uma Nuvem Magnética (*Magnetic Cloud* - MC), estrutura com baixos valores para o parâmetro beta, aproximadamente $\beta < 1$ (LAGO, 1999; KLEIN, 1982), que é a razão entre pressão cinética P_c e pressão magnética P_m , definida pela Equação 5.1, e indica qual pressão predomina sobre a outra (GARY, 2001).

$$\beta = \frac{P_c}{P_m} \quad (5.1)$$

Assim, se a pressão magnética é maior que a pressão cinética ($\beta < 1$), caso a pressão cinética predomine ($\beta > 1$), para pressão magnética e cinética em equilíbrio tem-se $\beta = 1$. Onde:

$$P_c = nkT, \quad (5.2)$$

em que n é a densidade numérica de íons, k é a constante de Boltzmann e T , a temperatura média dos íons.

$$P_m = \frac{B_t^2}{2\mu_0}, \quad (5.3)$$

em que B_t é o módulo do campo magnético e μ_0 é a permeabilidade magnética.

A caracterização dos HSS é ilustrada no painel à direita da Figura 5.1, onde

identifica-se um aumento contínuo em B , N , B_i . Momentos antes da CIR atinge-se um pico máximo exatamente no momento da CIR e em seguida há um decréscimo constante e progressivo nos parâmetros de vento solar. Já o índice Dst tem uma queda menos intensa em comparação com a perturbação geomagnética causada por uma ICME e apresenta uma recuperação mais lenta.

A componente cartesiana referente ao campo magnético do IMF, B_i , sofre oscilações ao longo de todo o período de interação com a estrutura, das quais a parte mais amplificada é observada no instante da CIR, ilustrado pela linha pontilhada vertical. Essa amplificação por um longo período de tempo muitas vezes acarreta um aumento da população no cinturão de radiação, que pode ser visto pelo aumento gradativo em e^- . Ainda existe uma boa correlação entre o aumento do fluxo de elétrons no cinturão e a velocidade do vento solar (BAKER et al., 1996; LI et al., 2009), mais uma forte característica de CIRs.

A descrição e identificação realizadas visam classificar tipos de estruturas interplanetárias distintas e investigar os parâmetros mais relevantes relacionados com as atividades de ondas já detectadas, tendo como base os parâmetros apresentados no esquema da Figura 5.1. Contudo, o trabalho de Richardson e Cane (2010) e página/repositório <<https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/search/>> foram também utilizados para identificação de estruturas puras, uma vez que estruturas interplanetárias podem ter características complexas. Outra análise realizada refere-se aos critérios de polaridade da nuvem magnética ou (MC - *Magnet Clouds*) a qual segue os critérios sugeridos por Deggeroni (2019) e Echer (2010). Os dados utilizados apresentam resolução de 1s no sistema de geocêntrico magnetosférico solar (GSM - Geocentric solar magnetospheric). Os dados dos satélites ACE e DSCOVR foram utilizados para identificar padrões geométricos da estrutura (com referencial no plano da eclíptica) e/ou uma possível HSS causadora do distúrbio. Outra finalidade na análise do IMF é descrever como ocorre a rotação nas direções dos campos associados, caso existam.

Dentro da caracterização da estrutura das nuvens magnéticas, também será realizada uma breve distinção da topologia dessas estruturas, critério para seleção e a avaliação dos estudos de casos. Assim, adotando o sistema de coordenadas GSM como já mencionado, as nuvens magnéticas foram classificadas em três formas principais, de acordo com a rotação observada na componente B_z , levando em consideração que o eixo da nuvem magnética está aproximadamente alinhado com o plano da eclíptica: N-S (quando a componente B_z rotaciona de Norte para Sul), S-N (quando a compo-

nente B_z rotaciona do Sul para o Norte) e, quando o eixo da nuvem magnética está aproximadamente perpendicular ao plano da eclíptica: Y-S (quando a componente B_y rotaciona de Leste para Oeste ou Oeste para Leste, enquanto a componente B_z permanece na direção Sul) (GONZALEZ et al., 1990).

É importante observar que situações em que o eixo da nuvem magnética não está perfeitamente alinhado (rotação em Z) ou perpendicular (rotação em Y) ao plano da eclíptica são possíveis várias inclinações intermediárias. A polaridade da nuvem é definida pela componente que apresenta a maior variação, seguindo uma lógica semelhante à empregada no estudo estatístico realizado por Echer (2010).

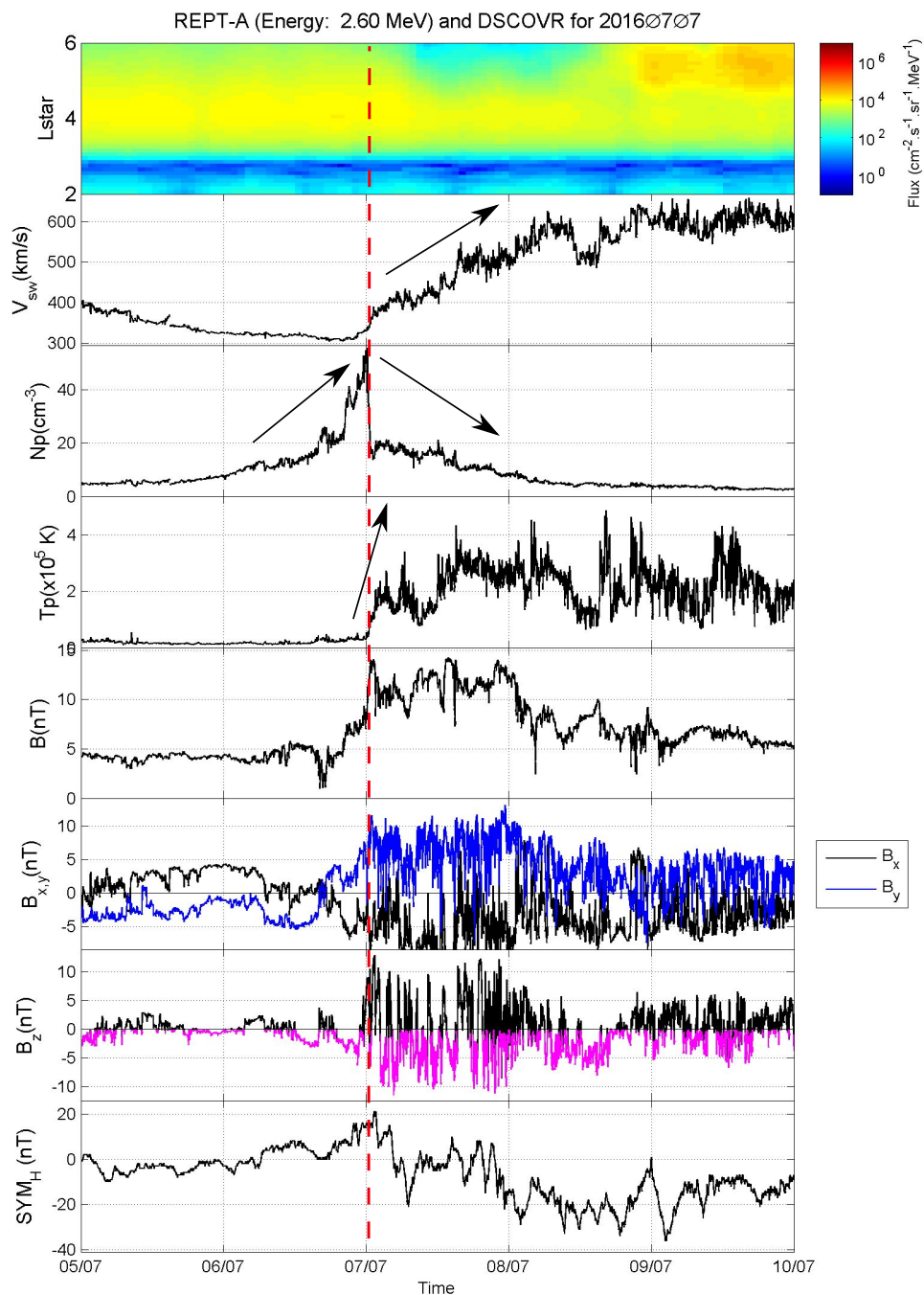
Dessa forma, no âmbito desta tese, as nuvens magnéticas foram classificadas em três categorias principais: N-S, S-N e Y-S. Três exemplos de classificação em relação ao tipo de MC estão apresentados no Anexo B.1, acompanhados de uma breve descrição das variáveis de estudo e análise da classificação. Além disso, foi feita uma distinção em casos complexos, em que não foi identificada a passagem da MC, também como o exemplo no Anexo B.4.

A identificação das High-Speed Streams (HSS) foi conduzida através da observação dos dados do meio interplanetário, seguindo os critérios estabelecidos na Figura 5.1 de acordo com a metodologia proposta por Kataoka e Miyoshi (2006), utilizando informações provenientes de satélites. Para ilustrar esse processo em detalhes, na Figura 5.2, fornecemos um exemplo que descreve a classificação. Pode-se observar que as setas em preto indicam as características típicas associadas às assinaturas de HSS e à identificação da CIR.

Observando o exemplo na Figura 5.2, notamos que há um aumento na densidade de partículas, atingindo um pico acima de $40 \text{ partículas/cm}^3$, no dia 06 de julho, seguido por uma queda abrupta no início do dia 07 de julho, quando inicia o aumento gradual da velocidade do vento solar nos dias 07 e 08 de julho, passando de aproximadamente 350 km/s para valores em torno de 600 km/s , sendo acompanhado pelo aumento na temperatura dos íons. A descontinuidade da densidade, que é destacada pela linha vertical tracejada vermelha é exatamente a Região de Interação Corrotante - CIR, que separa o vento solar lento (antes da linha vertical), do vento solar rápido (após a linha vertical). O aumento da densidade antes da CIR ocorre devido ao empilhamento de partículas que são comprimidas pelo vento solar, mais rápido que o vento solar nominal e esse aumento de densidade é frequentemente acompanhado por um aumento no campo magnético.

Além disso, durante esse período, observa-se uma inversão na orientação das componentes B_x (linha preta) e B_y (linha azul) do campo magnético, o que é um indicativo de um cruzamento de setor. A componente B_z apresenta variações bruscas e rápidas, que perturbam a magnetosfera terrestre. O vento solar rápido é frequentemente muito turbulento, explicando as rápidas oscilações que são visualizadas nas componentes do IMF. Essas estruturas, quando apresentam valores da componente B_z majoritariamente negativos, são capazes de desencadear tempestades geomagnéticas, a maioria delas moderadas, mas podendo chegar a intensas.

Figura 5.2 - Fluxo de elétrons relativísticos e condições do meio interplanetário.



High Speed Stream - HSS do dia 07 de julho de 2016. Seguindo a ordem dos painéis de cima para baixo tem-se: fluxo de elétrons relativísticos medido pelo instrumento REPT a bordo da sonda *Van Allen Probes A*, cujo mapa de cor representa o fluxo dado por $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{MeV}^{-1}$ em função de Lstar, medido em raios terrestres, e do tempo; velocidade do vento solar, V_{sw} , em Km/s ; densidade de prótons, N_p , em cm^{-3} ; temperatura de prótons, T_p , dado em 10^5 K; campo magnético interplanetário total, B , medido em nT; componentes B_x e B_y do IMF, dado em nT; componente B_z do IMF, medido em nT, com valores negativos destacados na cor magenta, obtidos pelo instrumento PlasMag, a bordo do satélite DSCOVR; o último painel apresenta os dados do índice geomagnético SYM_H , medido em nT.

Fonte: Produção autoral.

Utilizando a metodologia discutida anteriormente, segue abaixo a descrição dos critérios estabelecidos para realização da seleção dos eventos a serem estudados na referida tese.

5.3 Critério de seleção de eventos

Para a seleção dos eventos a serem estudados, foi feita uma análise das condições do meio interplanetário para determinar o tipo de estrutura solar que causou a perturbação na magnetosfera terrestre, como demonstrado anteriormente dentro do intervalo de estudo. Assim foram identificados 50 eventos de ICMEs, sendo 8 casos de Y-S, 13 de N-S, 21 de S-N e 8 sem MC, e 7 eventos de HSS, todos eles candidatos em potencial para estudos de caso. No entanto, após uma análise mais aprofundada, foram escolhidos os 5 eventos, para cada categoria, que possuíam as maiores variações no fluxo de elétrons. A Tabela 5.1 apresenta as datas dos eventos selecionados. Na coluna **Choque Y/M/D (UT)**, se refere ao momento de início súbito da tempestade geomagnética associada à estrutura interplanetária, relacionado com a chegada de um choque à Terra, e a data é apresentada no formato YYYY/MM/DD (UT) - ano, mês e dia, além do horário em tempo universal UT. A coluna **C/Nuvem** indica a classe da estrutura. A coluna **Dst (nT)** refere-se ao valor mínimo do índice geomagnético Dst durante o período, em nT . Por fim, a última coluna, **Dst (data)**, apresenta a data no formato YYYY/MM/DD/ (UT) - Ano, mês, dia, além do horário em tempo universal UT para o menor valor encontrado durante a interação com a estrutura. A diferença de tempo entre a primeira interação da estrutura interplanetária e o pico mínimo do índice Dst demonstra o tempo necessário para que ocorra a energização da magnetosfera interna pelo vento solar, através dos circuitos de correntes que interligam as distintas regiões da magnetosfera.

Tabela 5.1 - Tabela estudos de caso eventos pré-selecionados.

Choque Y/M/D (UT)	C/Nuvem	Dst (nT)	Dst (data)
2016/11/09 06:04	N-S	-59	2016/11/10/ 18:00
2015/09/07 14:00	N-S	-94	2015/09/08/ 10:00
2013/07/05 01:00	N-S	-87	2013/06/06/ 01:00
2013/06/06 02:55	S-N	-78	2013/06/07/ 02:00
2012/11/12 23:11	N-S	-108	2012/11/14/ 08:00
2015/11/06 18:18	S-N	-89	2015/11/07/ 07:00
2015/06/22 18:33	S-N	-204	2015/06/23/ 05:00
2015/01/07 06:16	S-N	-99	2015/01/07/ 11:00
2014/12/21 19:11	S-N	-71	2014/12/22/ 06:00
2013/01/17 16:00	S-N	-52	2013/01/17/ 24:00
2016/10/12 22:01	Y-S	-104	2016/10/13/ 18:00
2014/04/11 06:00	Y-S	-86	2014/04/12/ 09:00
2013/12/24 21:00	Y-S	-35	2013/12/25/ 14:00
2012/10/08 05:16	Y-S	-107	2012/10/09/ 09:00
2015/12/19 16:16	Y-S	-155	2015/12/20/ 23:00
2016/11/04 18:00	sem MC	-16	2016/11/05/ 07:00
2015/09/20 06:04	sem MC	-75	2015/09/21/ 21:00
2015/08/26 08:00	sem MC	-92	2015/08/27/ 21:00
2014/06/07 16:52	sem MC	-37	2014/06/08/ 24:00
2013/10/08 20:20	sem MC	-69	2013/10/09/ 02:00
2013/05/23	HSS	-56	2013/05/25/ 20:00
2013/06/20	HSS	-32	2013/06/23/ 14:00
2013/05/31	HSS	-10	2013/06/01/ 07:00
2013/02/28	HSS	-52	2013/03/01/ 24:00
2014/12/06	HSS	-43	2014/12/07/ 21:00

Tabela contendo cinco eventos selecionados para cada classe definida para o estudo. As colunas indicam a data do início súbito da tempestade geomagnética associada (Choque YYYY/MM/DD - UT), a classe da estrutura (C/Nuvem), o valor mínimo do índice geomagnético Dst durante o período (Dst - nT) e a data do menor valor encontrado durante a interação com a estrutura (Dst - data - UT).

Fonte: Produção autoral.

Dentre os 5 eventos de cada tipo, listados na Tabela 5.1, apenas um de cada tipo será detalhadamente estudado, e a escolha desses eventos deve relacionar à atividade de ondas *Chorus*, e seu potencial impacto na dinâmica dos elétrons relativísticos. Além disso, critérios mais técnicos, como a qualidade dos dados disponíveis, também foram fundamentais na seleção dos eventos.

Neste contexto, a seção seguinte se dedica à caracterização das ondas *Chorus*. E a justificativa de escolha dos eventos selecionadas para estudos de caso nessa tese. Em particular, será explorada a interação entre as ondas *Chorus* e os elétrons, a qual é capaz de violar o primeiro e/ou segundo invariantes adiabáticos.

5.4 Caracterização de Ondas *Chorus*

A caracterização das *Chorus* é um aspecto central para entender o impacto dessas ondas nas dinâmicas dos elétrons relativísticos. Nesta seção, abordaremos detalhadamente os mecanismos subjacentes a essa interação e como ela pode modificar o comportamento dos elétrons.

O mecanismo de aceleração por interação ressonante é considerado altamente relevante pela comunidade científica. Uma das formas de quantificar a intensidade da interação das ondas *Chorus* é através de características das ondas como a amplitude do campo magnético da onda (B_w), *Wave-Normal Angle* (WNA), a obliquidade da onda, frequência, duração e o número de pacotes de ondas, elipticidade e planaridade (ARTEMYEV et al., 2016).

5.4.1 Frequência ciclotrônica para elétrons f_{ce}

A frequência ciclotrônica dos elétrons f_{ce} , também chamada frequência de Larmor ou frequência de cíclotron, refere à frequência com que um elétron gira ao redor de uma linha de campo magnético. Essa frequência depende da intensidade do campo magnético e da massa do elétron e pode ser inferida pela equação:

$$f_{ce} = \frac{e \cdot B}{2\pi \cdot m_e} \quad (5.4)$$

em que e é a carga elementar do elétron, B é a intensidade do campo magnético, m_e é a massa do elétron. Uma apresentação das grandezas e dedução simplificada dessa equação está descrita no Anexo D.2.

A classificação das ondas *Chorus* em banda baixa e banda alta, com base na faixa

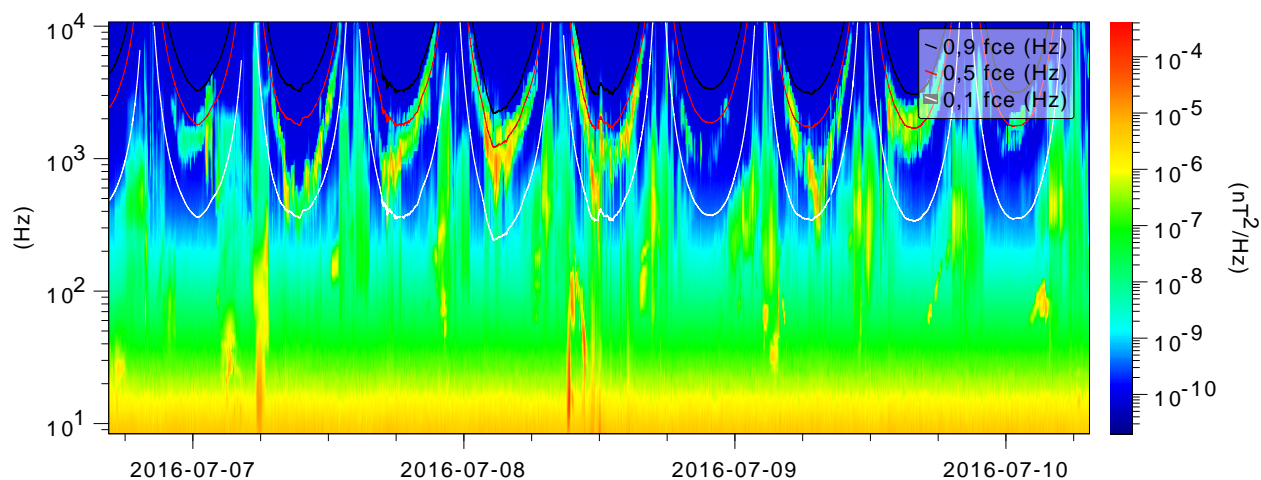
de frequência em relação à frequência ciclotrônica eletrônica (f_{ce}), é um conceito bem estabelecido na pesquisa de plasma espacial. Esse conceito é mencionado em vários artigos e referências na área, e os principais autores as classificam como banda baixa $(0,1-0,5)f_{ce}$ e banda alta $(0,5-0,9)f_{ce}$ (GENDRIN, 1975; HORNE et al., 2003; THORNE, 2013).

Essa frequência pode ser utilizada para descrever e quantificar a banda de ação das ondas *Chorus*. Ondas *Chorus* de banda alta, ou seja, $(0,5-0,9)f_{ce}$, podem interagir com elétrons aprisionados no cinturão externo, acelerando-os localmente, enquanto as ondas *Chorus* de banda baixa, $(0,1-0,5)f_{ce}$, podem interagir com elétrons relativísticos, causando perdas localizadas.

Quando a frequência das ondas *Chorus* se aproxima ou coincide com a frequência ciclotrônica dos elétrons aprisionados no cinturão de radiação de Van Allen, tem-se ingredientes capaz de gerar uma interação entre ondas e particular por meio da ressonância entre eles. Nesse processo, a energia das ondas *Chorus* é transferida para os elétrons, acelerando-os localmente e causando aumentos significativos em suas energias cinéticas.

A identificação da região de frequência ciclotrônica dos elétrons desempenha um papel crucial na interpretação da interação entre os elétrons relativísticos e as ondas *Chorus* no cinturão de radiação de Van Allen. Essa técnica é amplamente aplicada para distinção de regiões em bandas, banda baixa $(0,1-0,5)f_{ce}$ e banda alta $(0,5-0,9)f_{ce}$. A Figura 5.3 apresenta o espectro de potência do campo magnético para identificação das ondas *Chorus*. Observa-se que existe atividade de ondas *Chorus* durante todo o período. Os primeiros indícios de contribuição destas ondas na diminuição do fluxo de elétrons relativísticos neste período é a banda de frequência da onda detectada, que confina-se na maior parte do tempo abaixo de $0,5f_{ce}$ (que indica $0,5f_{ce}$), ou seja, entre a linha vermelha (que indica $0,5f_{ce}$) e a linha branca (que indica $0,1f_{ce}$) em cada uma das órbitas descritas pelo satélite. A linha preta indica $0,9f_{ce}$. Isto significa que pode ter ocorrido interação entre os elétrons e as ondas *Chorus*, possivelmente causando perda local através do mecanismo de *pitch-angle scattering* (ALVES et al., 2016; DA SILVA et al., 2020).

Figura 5.3 - Potência espectral do campo magnético para detecção das ondas *Chorus*.



Espectrograma de campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda *Van Allen Probes B*, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha na cor branca representa os valores de $0,1f_{ce}(Hz)$; a linha em vermelho, $0,5f_{ce}(Hz)$, e a linha em preto, $0,9f_{ce}(Hz)$.

Fonte: Produção autoral.

5.4.2 WNA (Wave Normal Angle), elipticidade e planaridade

A forma e a orientação das ondas eletromagnéticas na magnetosfera são variadas e desempenham um papel fundamental na interação dessas ondas com partículas carregadas, elétrons e íons, nessa região. Para uma melhor compreensão dessas interações e processos físicos envolvidos, são utilizadas algumas grandezas que descrevem as características das polarizações das ondas. Entre essas grandezas, destacam-se a elipticidade, a planaridade e o *wave-normal angle* (WNA), que desempenham um papel fundamental na distinção entre diferentes tipos de ondas presentes nessa região, como é a sua propagação e suas respectivas influências no comportamento das partículas carregadas. Isso é especialmente relevante para a identificação das ondas *Chorus*, que é o foco central desta tese.

O *wave-normal angle* (WNA), simbolizado por θ , é definido como o ângulo formado entre o vetores de propagação da onda \vec{K} e o vetor de direção do campo geomagnético de fundo \vec{B}_0 (SANTOLIK et al., 2003; TSURUTANI et al., 2009; TAUBENSCHUSS

et al., 2014; ARTEMYEV et al., 2016). O WNA é uma grandeza útil para entender como as ondas afetam o movimento e a aceleração das partículas carregadas na magnetosfera, o que é importante para a compreensão dos processos de aceleração e perda de elétrons. É através do WNA que as ondas são classificadas, com base na orientação em relação ao campo magnético circundante (TAUBENSCHUSS et al., 2014; ARTEMYEV et al., 2016), sendo dividida em três categorias principais: as ondas paralelas, caracterizadas por um ângulo θ próximo de zero graus ($\theta \approx 0^\circ$); as ondas quase paralelas, que possuem ângulos ligeiramente maiores, geralmente ($\theta < 30^\circ - 45^\circ$); e as ondas oblíquas, que exibem ângulos ainda maiores, normalmente $\theta > 50^\circ - 60^\circ$ (ARTEMYEV et al., 2016). Essa categorização ajuda a caracterizar a propagação dessas ondas em relação ao ambiente de campo magnético e também ajudam na identificação do resultado da interação com as partículas do cinturão, onde as ondas paralelas e quase-paralelas contribuem para a aceleração localizada de partículas carregadas, enquanto as ondas oblíquas proporcionam perdas localizadas (ARTEMYEV et al., 2016). Isto ajuda no entendimento dos mecanismos de *pitch-angle scattering* e *pitch-angle diffusion* que serão analisados durante perda local e aceleração local de elétrons no cinturão externo de Van Allen.

A planaridade e a elipticidade são, basicamente, grandezas que ajudam a entender como as ondas estão polarizadas e se estão se movendo predominantemente em um plano. A elipticidade também indica se a polarização é à esquerda ou à direita, com base na direção do campo magnético, dentro do escopo da magnetosfera. Portanto, por se tratar de ondas em um plasma, elipticidade e a planaridade são grandezas que descrevem as características das polarizações das ondas eletromagnéticas (VERKHOGLYADOVA et al., 2013).

O *Wave Normal Angle* (WNA), a elipticidade e a planaridade são provenientes do conjunto de dados do receptor de forma de onda (WFR) integrado no EMFISIS, os quais são calculados através do método de decomposição de valor singular (*Singular Value Decomposition* - SVD) (SANTOLIK et al., 2003). Estes dados têm os produtos de autocorrelação e correlação cruzada possíveis, calculadas para o campo magnético $\vec{B} = (B_u, B_v, B_y)$ e o campo elétrico $\vec{E} = (E_u, E_v, E_y)$, no referencial da sonda. Estes produtos são combinados para formar uma matriz espectral, a qual resultará em J , que deve ser diagonalizada utilizando-se o método SVD:

$$J = U\Lambda V^H \quad (5.5)$$

As matrizes complexas U e V são unitárias, enquanto H representa o operador transposto Hermitiano. A matriz real Λ é uma matriz diagonal com três valores singulares ($\zeta_0 \leq \zeta_1 \leq \zeta_2$) ao longo da diagonal principal. As colunas de U armazenam os vetores singulares *left* e as colunas de V armazenam os vetores singulares *right*, que constituem uma base ortonormal no espaço complexo (YUAN et al., 2019). A parte imaginária do complexo J é colocada abaixo de sua parte real, gerando assim uma matriz real 6×3 (SANTOLIK et al., 2003), através do método SVD - real (SANTOLIK et al., 2003; TAUBENSCHUSS et al., 2014). Essa matriz real também deve ser diagonalizada aplicando novamente o método SVD (SANTOLIK et al., 2003; SANTOLÍK et al., 2014b; TAUBENSCHUSS et al., 2014), produzindo um novo conjunto de valores singulares ($\hat{\zeta}_0 \leq \hat{\zeta}_1 \leq \hat{\zeta}_2$). Esses novos valores são proporcionais à potência do sinal mais a potência do ruído sobre os três eixos principais do elipsoide de polarização (TAUBENSCHUSS et al., 2014). Assim pode-se definir matematicamente a planaridade da polarização do campo magnético das ondas por F e a elipticidade por Υ (SANTOLIK et al., 2003; TAUBENSCHUSS et al., 2014):

$$F = 1 - \sqrt{\frac{\hat{\zeta}_0}{\hat{\zeta}_2}} \quad (5.6)$$

$$\Upsilon = \frac{\hat{\zeta}_1}{\hat{\zeta}_2} \quad (5.7)$$

Planaridade (F): descreve o quão bem a elipse de polarização das ondas está contida em um plano, ou seja, o quão boa é a suposição de que as ondas são planas. Se a planaridade for alta, significa que as ondas se comportam mais como ondas planas. A planaridade está relacionada à direção da propagação da onda. O valor da planaridade varia de 0 a 1, onde 1 indica uma onda completamente plana (todas as frentes de onda são perfeitamente paralelas) e 0 indica uma onda completamente não plana (as frentes de onda são curvas ou torcidas em todas as direções) (SANTOLIK et al., 2003; SANTOLÍK et al., 2014a; TAUBENSCHUSS et al., 2014; YUAN et al., 2019).

Elipticidade (Υ): essa grandeza é a razão entre as potências totais ao longo dos eixos semi minoritário e semi majoritário da elipse de polarização. A elipticidade é definida entre -1 e +1, o que significa polarização à esquerda e à direita, respectivamente (YUAN et al., 2019). Ela fornece informações sobre como a direção do campo elétrico da onda varia com o tempo. As ondas podem ter diferentes tipos de polarização, desde linear (onde o campo elétrico oscila em uma única direção),

até polarizações mais complexas, como a elíptica. Uma elipticidade igual a zero indica polarização linear, enquanto valores diferentes de zero representam polarizações elípticas (SANTOLIK et al., 2003; SANTOLÍK et al., 2014a; TAUBENSCHUSS et al., 2014).

Os valores da planaridade ($F > 0,2$) e elipticidade ($\Upsilon > |0,7|$) excluem as ondas que não correspondem ao modo *Whistler* (NI et al., 2020; SANTOLÍK et al., 2014b; LI et al., 2015).

Além disso, o vetor singular pertencente ao menor valor singular $\hat{\zeta}_0$, o qual produz diretamente a melhor estimativa possível para a direção de \vec{K} (SANTOLIK et al., 2003; SANTOLÍK et al., 2014a; TAUBENSCHUSS et al., 2014). Dessa forma, também podemos obter uma estimativa mais precisa do ângulo θ por meio do cálculo do vetor de Poynting, o qual é essencial para eliminar ambiguidades na direção de propagação, conforme detalhado no anexo D.1.

5.5 Método de quantificação da amplitude das ondas *Chorus*

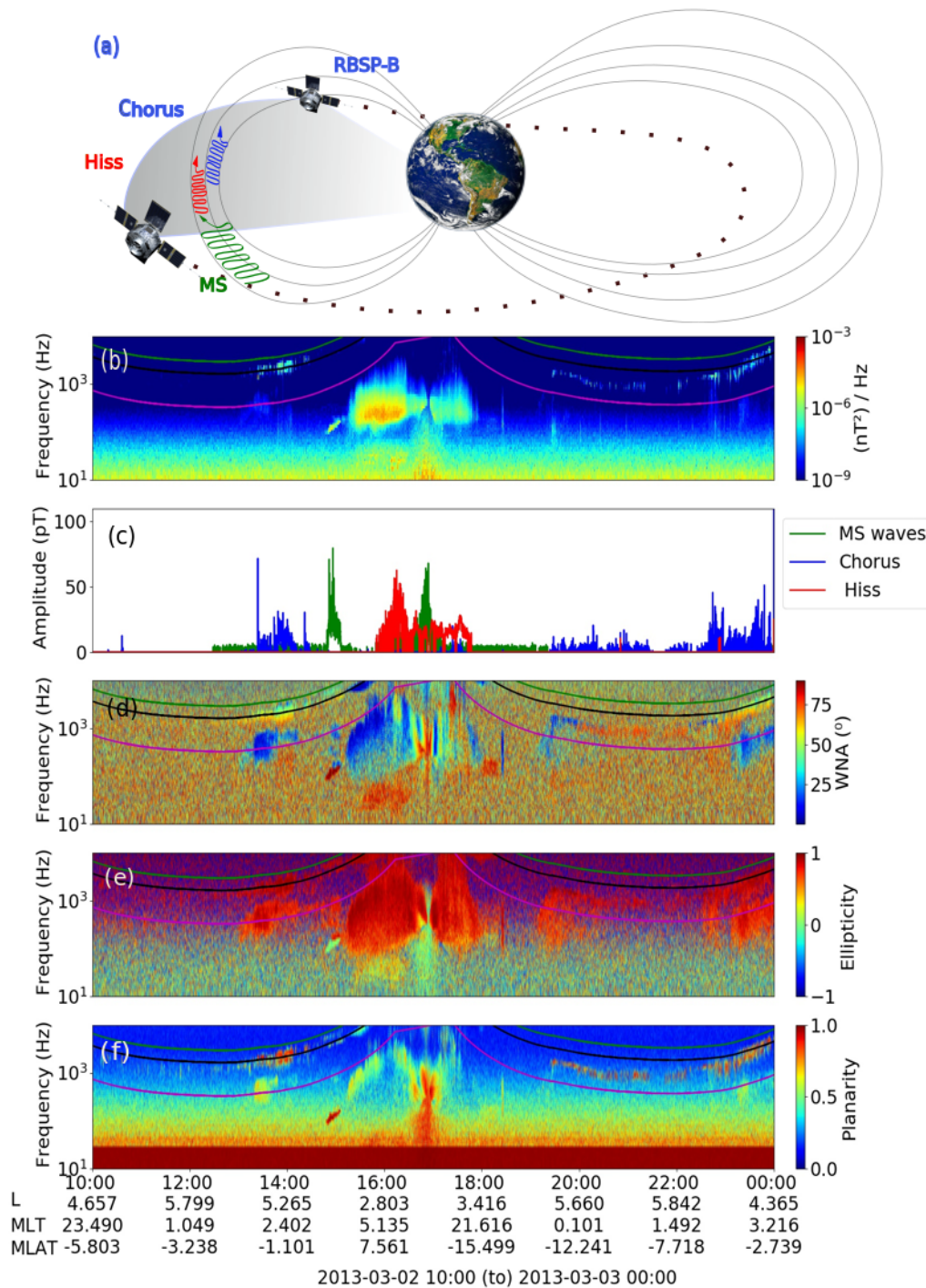
Para quantificar a amplitude das ondas *Chorus* na faixa de frequência desejada, aplica-se um filtro de identificação com base na metodologia de classificação proposta por Ni et al. (2020). Este método permite distinguir a atividade das ondas *Chorus* ao integrar o espectrograma de potência do campo magnético.

Para garantir uma integração rigorosa com a identificação da atividade das ondas *Chorus*, deve-se seguir alguns critérios bem estabelecidos e específicos. Assim, exige-se que o valor absoluto da elipticidade da onda seja de pelo menos 0,8 e que a planaridade seja superior a 0,2. Além disso, a atividade das ondas *Chorus* é filtrada dentro de suas respectivas faixas de frequência: a banda alta (0,5 - 0,9 f_{ce} Hz) e a banda baixa (0,1 - 0,5 f_{ce} Hz). Esses critérios permitem uma distinção precisa das ondas *Chorus* em relação a outras emissões de ondas que podem coexistir na mesma faixa de frequência, como as emissões de ondas magnetossônicas (MS) no espectrograma do campo magnético. A amplitude das ondas *Chorus* é então quantificada com base nesses critérios, utilizando-se dados obtidos do instrumento EMFISIS (Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science) (KLETZING et al., 2013).

A Figura 5.4 apresenta os mesmos parâmetros utilizados por Ni et al. (2020) para integrar as amplitudes de ondas na magnetosfera. Nesse exemplo são mostrados três tipos de ondas distintas com características distintas. No painel (a), apresenta

uma ilustração artística da órbita da Sonda Van Allen B à medida em que ela atravessa uma região com atividade de ondas *Chorus*. No painel (b) são mostrados os espectrogramas do campo magnético em função da frequência das ondas ao longo do tempo de observação medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda e a referida grandeza é integrada. No painel (c) é apresentada a amplitude de onda integrada das ondas *Chorus* (em azul) das ondas MS (em verde) e das ondas Hiss (em vermelho). No painel (d) são apresentados os ângulos normais (WNA) das ondas. Já nos painéis (e) e (f) encontram-se os valores de elipticidade e planaridade das ondas correspondentes às suas respectivas frequências. Esses parâmetros são cruciais para identificar a ocorrência de ondas MS, *Chorus* e Hiss, como exemplificado na Figura 5.4.

Figura 5.4 - Parâmetros usados na integração de amplitudes de ondas na magnetosfera, conforme definido por Ni et al. (2020).



Quantificação da amplitude de ondas na magnetosfera. (a) Ilustração artística da órbita da Sonda Van Allen B à medida em que a mesma atravessa uma região com atividade de ondas, (b) espectrogramas do campo magnético em função da frequência, (c) amplitude de onda integrada para ondas; *Chorus* (em azul), ondas MS (em verde) e ondas Hiss (em vermelho), (d) ângulos normais (WNA) das ondas, (e) elipticidade e (f) planaridade. A faixa de frequência para as ondas *Chorus* de banda alta e banda baixa situa-se entre as linhas verde e preta, bem como entre as linhas preta e rosa, conforme ilustrado nos painéis (b), (d), (e) e (f).

A partir disso, com o método de quantificação da amplitude das ondas *Chorus* estabelecido, a propagação dessas ondas e sua interação com partículas na magnetosfera serão analisadas na próxima seção.

5.6 Subelementos ondas *Chorus*

Para averiguar as variabilidades locais de fluxo de elétrons no cinturão de radiação, bem como suas potencialidades em desencadear o mecanismo *pitch-angle scattering* por atividade de ondas *Chorus*, faz-se necessário utilizar a identificação de *Bursts*, pacotes e seus subelementos de ondas, visando à sua caracterização e quantificação. Essa investigação sobre a ocorrência de *Bursts* baseia-se em medidas de altíssima resolução, conforme ilustrado na Figura 5.5, que ilustra um período de alta atividade de *Burst* no dia 15 de julho de 2016, no qual o intervalo apresentado é de $\approx 200mms$, e os pacotes de ondas podem ser analisados; e na Figura 5.6, que representa um exemplo desses *Bursts* e destaca características específicas desse subelemento, tais como o período do pacote de onda (τ), o período da onda (T), e a amplitude máxima da onda (B_{max}), a qual revela a ocorrência de múltiplos subelementos das ondas *Chorus* em um curto espaço de tempo. Para realizar essa investigação, utiliza-se o equipamento *Waveform Continuous Burst* (WFR), que faz parte do conjunto de instrumentos EMFISIS. O equipamento WFR é acionado automaticamente em regiões de alta intensidade de atividade de ondas *Chorus*, coletando seus dados em resolução excepcionalmente alta. Cada acionamento registra dados com uma duração de 6 segundos, com um intervalo de 0,032 segundos entre capturas sucessivas, fornecendo informações de campo elétrico e campo magnético em três eixos.

Os *Bursts* são variações abruptas no campo magnético $\geq 0,2nT$ em períodos de $\sim 0,1s$ até $1s$. Estes pacotes de ondas compostos por subelementos são de suma importância para o entendimento do papel das ondas *Chorus* na diminuição do fluxo de elétrons relativísticos como, por exemplo, o cálculo da variação do ângulo de abertura do cone de perdas $\Delta\alpha$ durante ocorrências de *dropouts* e atividades de ondas *Chorus*. Vale salientar que, diferentemente de Lakhina et al. (2010), esta tese considerará as interações ressonantes entre ondas *Chorus* e elétrons relativísticos ver (ALVES et al., 2016; DA SILVA et al., 2020), no qual o fator γ é incluído nos cálculos de $\Delta\alpha$ e Δt , conforme segue abaixo:

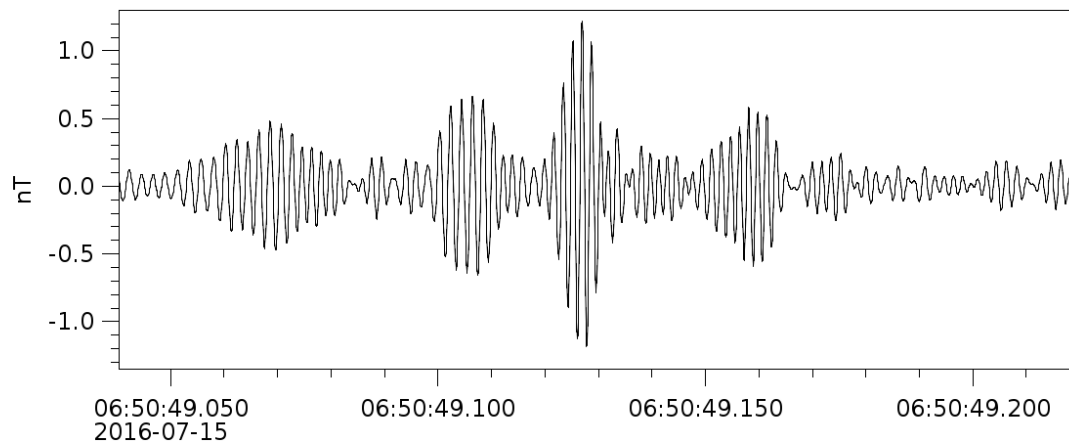
$$\Delta\alpha_i = \frac{B_w}{B_o} \frac{W_{ce}}{\gamma} \Delta t_i \quad (5.8)$$

Na equação, B_w e B_o são, respectivamente, a amplitude de pico do pacote de onda *Chorus* central e a magnitude do campo magnético no ambiente equatorial, W_{ce} é a frequência ciclotrônica do elétron, γ é o fator de Lorentz dado por $\gamma = (1 - V^2/c^2)^{-1/2}$ e Δt_i é o tempo de interação estimado.

$$\Delta t_i = \frac{V_{gi}}{V_s} \quad (5.9)$$

onde i refere-se ao índice de tempo de interação que pode assumir os valores de τ ou T , onde V_g é a velocidade de grupo e V_s é a velocidade relativa entre as ondas *Chorus* e a velocidade ressonante dos elétrons. A relação adotada entre a velocidade de grupo (V_g) e a velocidade de fase (V_p) para as ondas *Chorus* é expressa como $V_g = 2 \cdot V_p$, onde V_p é calculada usando a aproximação $V_p \approx (2\pi w)/W_{ce}$, em que a frequência das ondas *Chorus* w é obtido através de análise da densidade no campo magnético ver exemplo anexo A.2. Uma abordagem relativística abrangente do problema que considera a combinação de velocidades relativas entre elétrons e as onda *Chorus*, e como diferentes referenciais afetam as estimativas do tempo de interação além das suas implicações podem ser consultados em (ALVES et al., 2023).

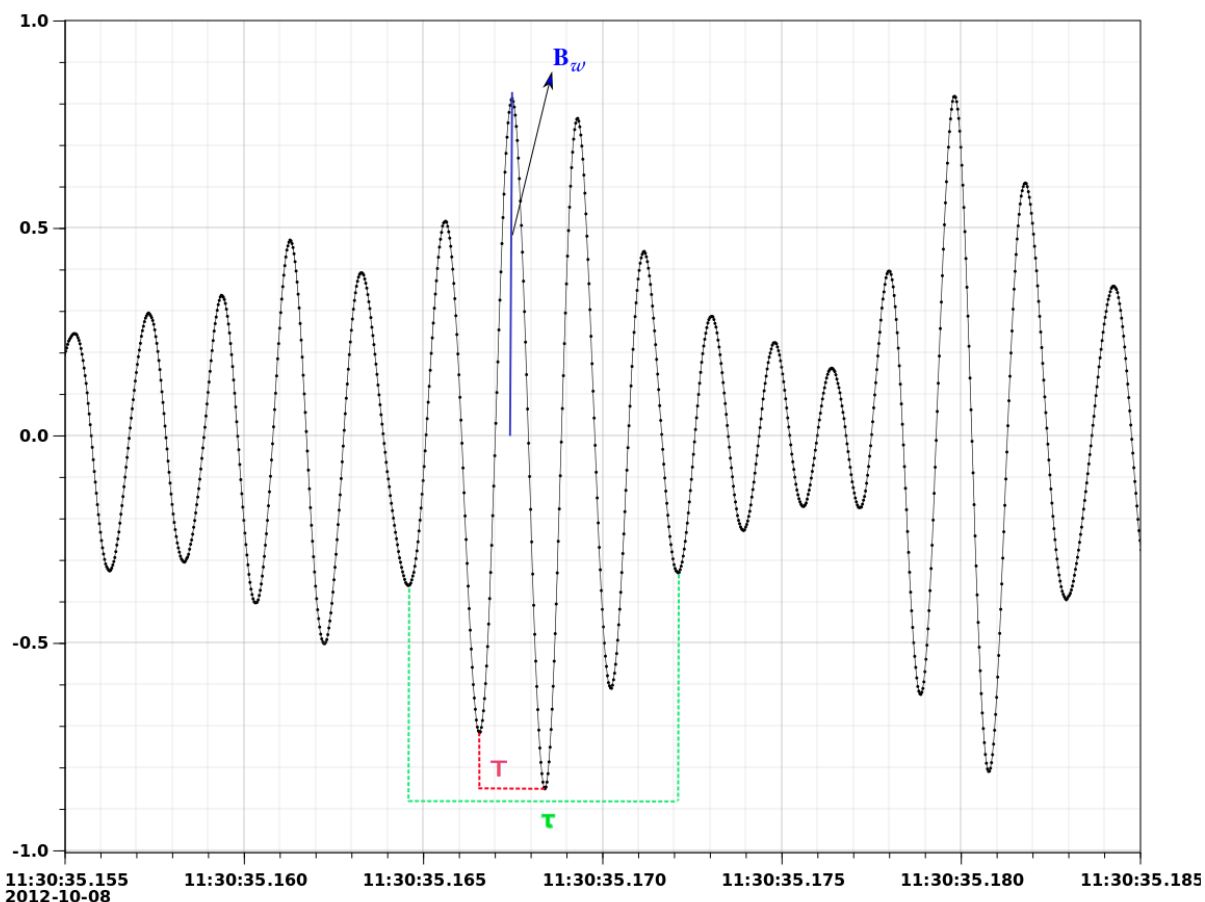
Figura 5.5 - Detecção de *Bursts* e identificação dos pacotes de ondas *Chorus*.



Atividade de *Bursts* no dia 15 de julho de 2016, para o intervalo de $\approx 06:50:49.050$ UT até $\approx 06:50:49.220$ UT, medindo a flutuação do campo magnético em (nT) pelo instrumento EMFISIS em altíssima resolução, na faixa de frequência das ondas *Chorus*, tornando possível a visualização de ciclo de onda e subelemento dessas ondas.

Fonte: Produção autoral.

Figura 5.6 - Detecção de *Bursts* e identificação dos pacotes de ondas *Chorus*.



Identificação de atividade de *Bursts* no dia 08 de outubro de 2012, para o intervalo de $11:30:35.155$ UT até $11:30:35.185$ UT, medindo a flutuação do campo magnético em (nT) pelo instrumento EMFISIS em altíssima resolução. Na Figura é identificado em τ e T que são os períodos respectivos do envelope de onda e do ciclo de onda do subelemento central, B_{max} é o valor absoluto instantâneo máximo da amplitude da onda do subelemento central.

Fonte: Produção autoral.

Os cálculos de $\Delta\alpha_i$ e Δt_i forma derivados das Equações 5.8 e 5.9 para se calcular as interações entre *Chorus* e os elétrons na região de interesse. Apenas aproximações de primeira ordem são levadas em consideração, em que a interação entre elétrons relativísticos e os subelementos gerados pelas ondas *Chorus* serão analisados (DA SILVA et al., 2020; ALVES et al., 2017a; ALVES et al., 2016; TSURUTANI et al., 2009).

Para cada subelemento, calcula-se a variação no *pitch angle* ($\Delta\alpha_i$) como resultado

da interação ressonante entre elétrons relativísticos para seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV) em dois tipos de interações diferentes: no primeiro, considera-se que os elétrons estão em ressonância com as ondas *Chorus* durante todo o período do subelemento (τ); no segundo, considera-se apenas um período do ciclo da onda (T) (veja a Figura 5.6). Dessa forma, estima-se $\Delta\alpha_i$ (Equação 5.8) (ALVES et al., 2017a; ALVES et al., 2016; DA SILVA et al., 2020) para interações mais longas ($\Delta\alpha_\tau$) e mais curtas ($\Delta\alpha_T$). Os períodos classificados como atividade de *Bursts* não lineares são identificados quando a razão $\frac{B_w}{B_o} \geq 1\%$. Os resultados para cada caso estudado são apresentados individualmente, destacando os pacotes classificados como não lineares.

Durante o período de interação ressonante, é fundamental a aquisição de medidas locais dos parâmetros do plasma do meio, os quais são incorporados nos cálculos das equações 5.8 e 5.9. A Figura em Anexo A.1 apresenta esses parâmetros no exato momento da identificação de um *Burst*. Somente com essas informações é possível calcular os valores de $\Delta\alpha$. Dentro desses parâmetros, é possível calcular várias grandezas que definem regiões específicas, sendo uma delas a razão entre a frequência do plasma da onda e a frequência ciclotrônica, representada como W_{pe}/W_{ce} .

5.7 Razão entre a frequência do plasma da onda e a frequência ciclotrônica de elétrons W_{pe}/W_{ce}

A razão entre a frequência do plasma da onda (W_{pe}) e a frequência ciclotrônica (W_{ce}) é um parâmetro importante que desempenha um papel significativo no escopo do estudo das ondas *Chorus* na magnetosfera e na variabilidade do fluxo de elétrons. Regiões, com uma pequena razão W_{pe}/W_{ce} entre (3.5~4.5), têm sido amplamente aceitas como regiões favoráveis a interação com ondas *Chorus* em tempo relativamente curto (até ~ 2 horas) (MEREDITH et al., 2003; SUMMERS; THORNE, 2003; TURNER et al., 2010). Existem alguns autores que incluem essa razão em modelos de aceleração induzida por *Chorus*, como pode ser observado em (LI et al., 2009; SHPRITS et al., 2009). A investigação nesta tese quanto a razão W_{pe}/W_{ce} serve para apontar regiões espaciais com potencial significativo para variações nos fluxos de elétrons do cinturão de radiação em tempos relativamente curtos, que pode está associado a ondas *Chorus*. Os valores utilizados na tese foram óbitos através de dados de Nivel L4 pelo instrumento (EMFISIS) a bordo das sondas Van Allen, e também foram calculados pela seguinte equação:

$$\frac{W_{pe}}{W_{ce}} = \frac{1}{B_0} \cdot \sqrt{\frac{n_e \cdot m_e}{\epsilon_0}} \quad (5.10)$$

Onde, W_{pe} é a frequência de plasma, W_{ce} é a frequência ciclotrônica eletrônica, n_e é a densidade eletrônica do plasma na região e B_0 é a magnitude do campo magnético.

A relação entre W_{pe} e W_{ce} é relevante porque ela está relacionada à ressonância entre as partículas carregadas (como elétrons) e as ondas *Chorus* quanto mais próximo essa razão de 1 isso indica que as partículas estão mais propensas a ressonância com as ondas *Chorus*, podendo levar a interações significativas (ARTEMYEV et al., 2016; AGAPITOV et al., 2019; HORNE et al., 2003). Assim, sendo um indicador chave para entender como as partículas na magnetosfera interagem com as ondas *Chorus* e como essas interações podem afetar o comportamento das partículas carregadas na magnetosfera interna.

5.8 PhSD Phase Space Density

Neste estudo, são analisados os perfis radiais da *Phase Space Density* (PhSD) em relação a L^* usando valores constantes de $K = 0.1280G^{1/2}R_E$ a fim de contemplar o espaço de fase referente a variabilidade causada por ondas *Chorus* (DA SILVA et al., 2021a; SOUZA et al., 2017; ASEEV et al., 2017) e valores constantes de $\mu = 1000.00MeV/G$ visando a interação de partículas com energias relativísticas (DA SILVA et al., 2021a; MURPHY et al., 2018). Para isso, utiliza-se tanto dados *in situ* coletados pelos instrumentos a bordo das Sondas Van Allen, quanto cálculos dos invariantes adiabáticos. O foco principal concentra-se na análise de $f(\mu, K, L^*)$ em relação a fenômenos associados à variação das partículas no cinturão de radiação externo. Os detectores de partículas geralmente medem o fluxo de elétrons em diferentes parâmetros: energia E , *pitch angle* α , posição x e tempo t , os instrumentos usados para quantificar essas valores no estudo foram REPT, MagEiS e EMFISIS, ambos a bordo das Sondas Van Allen.

A conversão do fluxo em PhSD envolve um processo que pode ser dividido em várias etapas. Inicialmente, determina-se o *pitch angle* (α) associado ao valor escolhido de K . Em seguida, calcula-se a energia correspondente aos valores de μ e K selecionados. Posteriormente, calcula-se os fluxos de elétrons para cada canal de energia no valor de K escolhido. Com esses fluxos, determina-se o fluxo de elétrons para os valores específicos de μ e K . Em seguida, converte-se esse fluxo em PhSD para os valores selecionados de μ e K . Por fim, calcula-se o parâmetro L^* . A análise do PhSD

permite a averiguação dos processos de aceleração ou perda localizada com um alto nível de confiabilidade, contribuindo assim para a compreensão dos mecanismos físicos envolvidos. Essa metodologia segue a abordagem proposta por [Hartley e Denton \(2014\)](#), que descreve resumidamente um processo em seis etapas para o cálculo da PhSD.

6 RESULTADOS

Neste capítulo, apresenta-se os resultados dos cinco estudos de caso selecionados, em que as condições do meio interplanetário são analisadas, assim como suas implicações no cinturão de radiação externo Van Allen. Os processos físicos responsáveis pelos impactos no fluxo de elétrons serão abordados, especificamente os que estão associados a atividade das ondas *Chorus*. Assim, considera-se desde a sua geração e propagação no plasma, até as suas condições de ressonância com as partículas carregadas, influenciando diretamente na variabilidade localizada dos elétrons relativísticos nessa região.

Os estudos de caso estão listados na Tabela 6.1, em que cada evento foi cuidadosamente selecionado e classificado com base em seus parâmetros do vento solar, abrangendo diferentes tipos de estruturas interplanetárias. Os eventos de ICMEs foram confirmados utilizando o repositório Richardson e Cane (2010), enquanto o evento de HSS foi confirmado utilizando o serviço *Space Weather Database of Notifications, Knowledge, Information* (DONKI). A partir do critério de seleção estabelecido na metodologia, tem-se os eventos, como segue abaixo:

- 1) um evento de ICME com nuvem, com rotação da componente Bz de Norte para Sul, chamado aqui de **CASO NS**;
- 2) um evento de ICME com nuvem, com rotação da componente Bz de Sul para Norte, chamado aqui de **CASO SN**;
- 3) um evento de ICME com nuvem, com rotação na componente By e com componente Bz Sul, chamado aqui de **CASO YS**;
- 4) um evento sem nuvem magnética, chamado aqui de **CASO sem MC**;
- 5) um evento de HSS, intitulado aqui de **CASO HSS**.

Tabela 6.1 - Tabela estudos de caso.

CASO/Classe	DATA
CASO NS	2012/11/12 - 2012/11/15
CASO SN	2015/11/06 - 2015/11/09
CASO YS	2016/10/12 - 2016/10/16
CASO sem MC	2014/06/07 - 2014/06/10
CASO HSS	2013/02/28 - 2013/03/04

Fonte: Produção autoral.

6.1 CASO NS: ICME com nuvem, com rotação da componente Bz de Norte para Sul

A Figura 6.1 apresenta os dados do cinturão de radiação e do meio interplanetário, referente ao estudo de caso NS da ICME que atingiu a Terra em 13 de novembro de 2012. Os dois primeiros painéis (a-b) apresentam dados do instrumento REPT, a bordo da sonda Van Allen B. Painel (a) o fluxo de elétrons relativísticos para a faixa de energia de 2,1 MeV no cinturão de radiação em função do tempo e do parâmetro L^* ; Painel (b) fluxo de partículas referente a um corte em $L^* = 5$, para quatro níveis de energia (1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV). Os cinco painéis seguintes (c-g), apresentam os dados dos instrumentos MAG e SWEPAM a bordo do satélite ACE; Painel (c) a velocidade do vento solar em [km/s]; Painel (d) a densidade do vento solar em [cm^{-3}]; Painel (e) componentes Bx_{gsm} e By_{gsm} do IMF, em [nT]; Painel (f) o campo magnético total B, do IMF, em [nT]; Painel (g) a componente Bz_{gsm} do IMF, em [nT]. Todas as grandezas vetoriais do IMF estão em coordenadas GSM. O painel (h) apresenta o parâmetro β de plasma; e por último, no painel (i), o índice simétrico SYM_H .

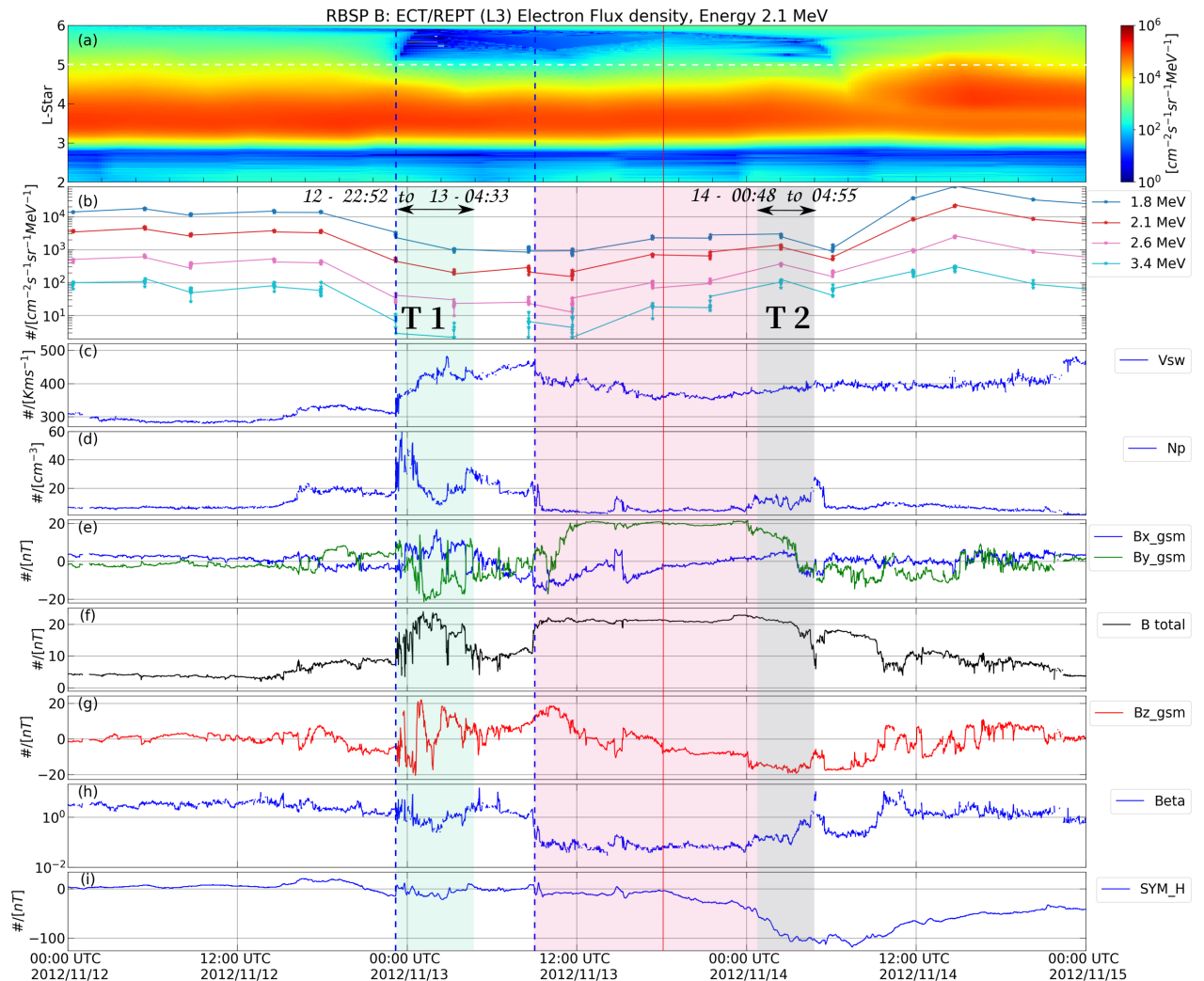
Na Figura 6.1, painel (a), nota-se que o fluxo de elétrons para a energia de 2,1 MeV apresenta uma queda consideravelmente grande (mais de uma ordem de grandeza) para $L^* > 5$, região mais externa do cinturão de radiação, o que caracteriza um *dropout*. Essa região mais externa se mantém com baixa população de elétrons durante todo o período de atuação da estrutura interplanetária, da ordem de dezenas de [$cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}MeV^{-1}$].

Na Figura 6.1, as linhas verticais pontilhadas em azul indicam o instante do choque da estrutura e o início da MC, respectivamente. A primeira linha pontilhada azul, às

22:52 UT de 12 de novembro de 2012, sinaliza a chegada da frente de choque, notável pelo salto abrupto em todos os parâmetros interplanetários, e especificamente a velocidade do vento solar, V_{sw} salta de $\sim 300\text{km/s}$ para $\sim 400\text{km/s}$. Após o choque, a velocidade continua aumentando até valores próximos a 500km/s . O salto na densidade N_p é de $\sim 20p/cm^3$ atingindo valores maiores que $50p/cm^3$. Pode-se identificar quatro cruzamentos de setor, que ocorre quando há inversão entre as componentes B_x e B_y , no painel (e): o primeiro ocorre aproximadamente 6 horas antes da chegada da frente de choque, coincidindo com uma queda assintótica na componente B_z ; o segundo cruzamento de setor ocorre aproximadamente na linha pontilhada vertical azul; o terceiro coincide com a segunda linha pontilhada azul, e o quarto cruzamento de setor ocorre aproximadamente no final da segunda região verde. A bainha magnética do ICME apresenta alta flutuabilidade para o IMF, delimitada pelas linhas verticais pontilhadas em azul. A faixa verde hachurada transparente, contida na bainha magnética, delimita o primeiro intervalo de interesse no estudo de ondas para esse caso, chamado de T1. A diminuição do fluxo de elétrons para $L^* > 5$ atinge uma ordem de grandeza, desde o período pré-choque até o período sob influência da região turbulenta da bainha do ICME. Esta tendência foi observada para todos os níveis de energia relativística (1,8 MeV – 3,4 MeV), mostrados no painel (b).

A MC responsável pelas perturbações no meio interplanetário inicia-se às 9:00 UT do dia 13 e estende-se até às 4:55 UT do dia 14 de novembro de 2012, e está indicada pela faixa transparente rosa hachurada mais segunda faixa verde hachurada. O comportamento do IMF para o intervalo é característico de uma nuvem magnética, com os valores baixos do parâmetro β do painel (h), rotação suave na componente B_z do IMF, de norte (valores positivos) para sul (valores negativos), painel (g), classificando-o como CASO NS. A extensão da MC abrange o período de análise para a atividade de ondas *Chorus*, localizada na segunda região verde hachurada transparente T2, das 00:48 UT às 04:55 UT, no dia 14.

Figura 6.1 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: **CASO NS**.



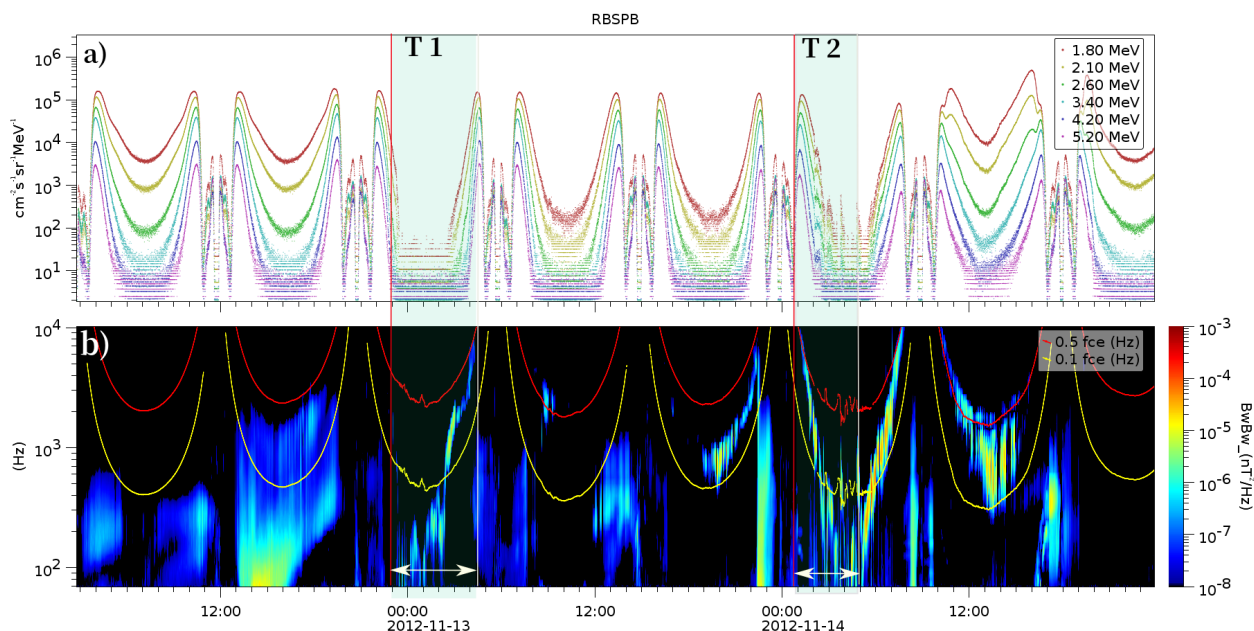
ICME - com MC, em 13 de novembro de 2012. De cima para baixo: (a) Fluxo de elétrons relativístico para a faixa de energia de 2.1 MeV, medido pelo instrumento REPT a bordo do Van Allen Probes B, cujo mapa de cores representa o fluxo integrado dado em $[cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}MeV^{-1}]$ em função de L^* dado em (Re); (b) fluxo para cinco diferentes níveis de energia (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV), em $L^* = 5$; (c) Velocidade do vento solar V_{sw} , em $[Km/s]$; (d) densidade N_p , em $[cm^{-3}]$; (e) Componentes do Campo Magnético Interplanetário (IMF) Bx_{gsm} (azul) e By_{gsm} (verde), em $[nT]$; (f) módulo da amplitude da intensidade IMF B_{total} em (preto), em $[nT]$; (g) componente IMF Bz_{gsm} ; (h) beta de plasma e (i) index symmetric SYM_H . As linhas pontilhadas verticais azuis referem-se ao tempo de início das fases da tempestade geomagnética, que representam o choque da estrutura e o início do MC, respectivamente. Linhas verticais pontilhadas azuis separam as três diferentes regiões do evento, da esquerda para a direita: o vento solar, a bainha e a nuvem magnética. A linha vertical vermelha sólida representa o início do período em que a polaridade da MC se torna Sul. As duas regiões em verde claro, nos períodos T1 e T2, entre 12 de 22:52 UT até 13 de 04:33 UT e de 14 de 00:48 UT até 04:55 UT, correspondem ao período de interesse no estudo das ondas e variações de fluxo.

Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.2 mostra o fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação, para o intervalo de 12 a 14 de novembro de 2012, onde são apresentados os fluxos de elétrons em seis canais de energia distintos (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV; 4,20 MeV e 5,20 MeV). Diferentemente da Figura 6.1 esta utiliza dados de contagem por posição para se investigar com mais precisão as variações locais no fluxo de elétrons de alta energia. Isso é crucial para uma compreensão dos processos físicos relacionados aos mecanismos de espalhamento/difusão por *pitch angle* dirigidos por ondas *Chorus*. No painel (a) nota-se uma diminuição no fluxo de elétrons no intervalo T1, especificamente na terceira órbita, sendo quase simultâneo com a chegada do choque interplanetário e início da interação da estrutura com a magnetosfera. O painel (b) da Figura 6.2 apresenta a potência espectral do campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS, a bordo da sonda Van Allen B. É possível observar um aumento da densidade média na faixa de frequência que abrange as ondas *Chorus*, com assinaturas de mapeamento do campo magnético.

Na Figura 6.2 são identificadas assinaturas de mapeamento para os dois intervalos de estudo, T1 e T2. Atividades de ondas *Chorus*, localizadas entre $0,1 f_{ce}$ e $0,5 f_{ce}$ e também abaixo de $0,1 f_{ce}$ são observadas no painel (b), as quais são classificadas como assinaturas de ondas *Chorus* de banda baixa, em concomitância com a variabilidade do fluxo. Os valores nos intervalos T1 e T2 são notavelmente baixos em comparação com outras órbitas durante o mesmo período, conforme observado no painel (a) da Figura 6.2.

Figura 6.2 - Atividade de ondas Chorus e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos: **CASO NS.**



Fluxo de elétrons relativísticos e assinaturas de ondas *Chorus* no modo *Whistler*, **CASO NS.** De cima para baixo: a) Fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação durante o intervalo de 12 a 14 de novembro de 2012, para cinco níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV; 4,2 MeV e 5,2 MeV), utilizando os dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen B; b) potência espectral do campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen Probes B, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo $y(Hz)$, a frequência, em função do tempo. A linha na cor amarela representa os valores de $0,1f_{ce}(Hz)$ e a linha em vermelho, $0,5f_{ce}(Hz)$.

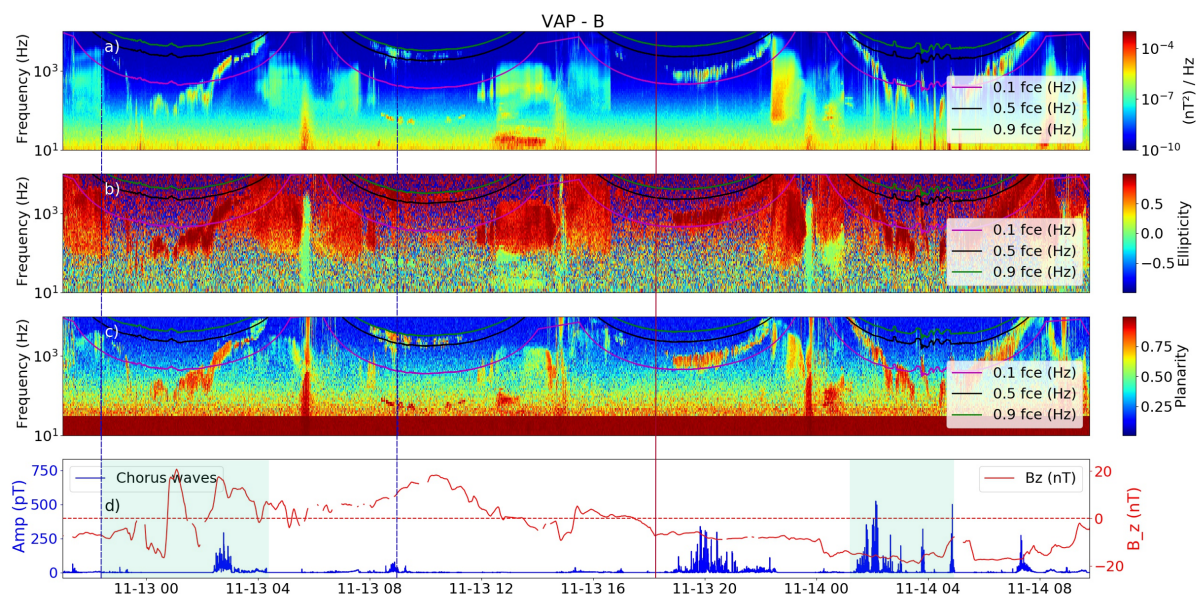
Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.3 é composta por quatro painéis identificados como (a-d), de cima para baixo, exibindo parâmetros relacionados às ondas *Chorus* e à componente B_z do IMF. No painel (a) é apresentado o espectrograma do campo magnético, obtido por meio do instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen B. Os valores estão expressos em unidades de $[nT^2/Hz]$, fornecendo informações sobre a densidade espectral do campo magnético em relação à frequência. As linhas rosa, preta e verde indicadas na legenda ilustram as frequências de $0,1f_{ce}$, $0,5f_{ce}$ e $0,9f_{ce}$, respectivamente, que são utilizadas para avaliar a distinção das bandas e das assinaturas das ondas *Chorus*.

Os painéis (b) e (c) representam a elipticidade e planaridade, respectivamente, que são métricas importantes para caracterização da polarização das ondas *Chorus*. Por fim, o painel (d) apresenta a integração das amplitudes das ondas *Chorus*, conforme calculado de acordo com Ni et al. (2020). Os valores destas amplitudes são exibidos em azul e estão expressos em [pT]. Além disso, nesse mesmo painel, a componente Bz_{gsm} do Campo Magnético Interplanetário (IMF) é representada pela linha vermelha, medida em [nT].

Na Figura 6.3, é possível observar ondas *Chorus* com intensidades magnéticas superiores a 10^{-6} nT/Hz em alguns períodos, chegando a atingir valores de até 10^{-3} nT/Hz. É notável que a atividade das ondas *Chorus* está concentrada em banda baixa ($0,1 - 0,5$) f_{ce} durante a chegada do choque, conforme representado pela primeira linha pontilhada azul. A atividade das ondas *Chorus* após a interação da bainha magnética com a magnetosfera mostra-se em banda baixa, começando em frequências menores que $0,1 f_{ce}$, mas com um aumento na faixa de frequência conforme o MC aproxima-se da magnetosfera. Pouco antes da chegada do MC, às 9:00 UT do dia 13 de novembro, é possível observar atividade do *Chorus* na banda alta ($0,5 - 0,9$) f_{ce} , porém essa atividade é pouco intensa e se estende até as primeiras horas de interação da magnetosfera com o MC. Para este caso, os maiores valores de amplitude das ondas *Chorus* são observados após a rotação do MC, representada pela linha vermelha vertical. Isso sugere que as maiores amplitudes são alcançadas quando a componente Bz está direcionada para sul. Pode ser observado no painel d) que, após a rotação da componente Bz, o valor médio da mesma é em torno de -15 nT. As assinaturas de atividade de ondas *Chorus* são identificadas em banda baixa.

Figura 6.3 - Atividade de ondas *Chorus* do modo *Whistler* Versus IMF Bz: **CASO NS**.



Amplitude e características das ondas *Chorus* no modo *Whistler* , **CASO NS**. De cima para baixo: (a) Espectrograma de campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda *Van Allen Probes B*, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1fce , a linha preta, 0,5 fce, e a linha verde, 0,9 fce; (b) Elipticidade; (c) Planaridade; (d) Amplitude do campo magnético na faixa de frequência das ondas Chorus é representada pela linha azul, em [pT], com dados da sonda Van Allen B e aplicando-se filtro de identificação segundo Ni et al. (2020). A linha vermelha apresenta os valores do Campo Magnético Interplanetário (IMF) no sistema de coordenadas GSM para a componente Bz, em [nT], obtido pelo satélite ACE. A linha vermelha vertical indica o centro da MC, marcando o instante em que a componente Bz se torna predominantemente negativa.

Fonte: Produção autoral.

As Figuras 6.4 e 6.5 são compostas por quatro painéis cada uma, sendo o painel (a) o fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV); o segundo painel (b) apresenta o espectrograma de campo magnético, em que o mapa de cor representa a densidade em (nT^2/Hz) e o eixo y, a frequência em (Hz) em função do tempo; (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^\circ$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (Wpe/Wce).

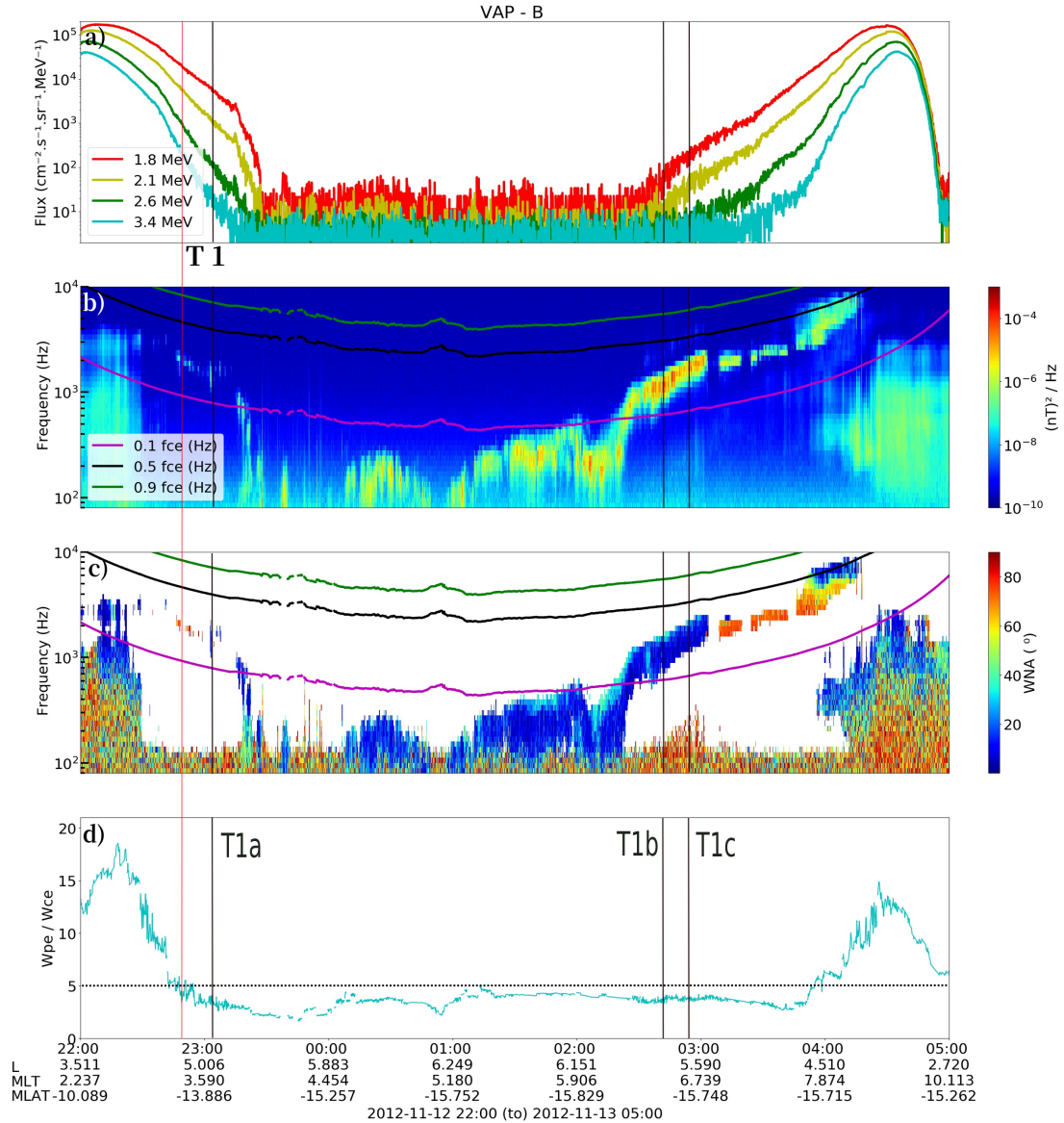
A Figura 6.4 apresenta o intervalo de estudo da primeira região de interesse T1 para o caso NS. O instante do choque é indicado pela linha solida vertical vermelha. Observa-se no painel (a) que o fluxo de elétrons sofre uma abrupta diminuição no final do dia 12, por volta das 23:20 UT, visível próximo à linha vertical vermelha. O fluxo nos canais de energia entre 1,8–3,4 MeV exibiram uma diminuição considerável a partir desse momento e permanecem em valores abaixo de 100 [$cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}MeV^{-1}$] até 02:40 UT do dia 13, configurando-se como um *dropout*. Durante esse período, a sonda B está em $L^* = 4.5 - 6$ RE. Concomitante a este *dropout*, observa-se um aumento na atividade e intensidade das ondas *Chorus* de banda baixa, conforme mostrado no painel (b).

As ondas *Chorus* foram observadas continuamente quase ao longo de toda a órbita, na banda inferior. Os valores para WNA, Figura 6.4 (c), assimilados à atividade das ondas *Chorus* têm ângulos normais baixos ($0^\circ - 30^\circ$) e ângulos altos ($30^\circ - 80^\circ$), indicando que a atividade tem componentes quase paralelos e oblíquos à direção do campo geomagnético. Isso sugere que a variabilidade do fluxo de elétrons nesse período de *dropout* pode ter a participação do mecanismo localizado de espalhamento por *pitch angle* dirigido por ondas *Chorus* (AGAPITOV et al., 2015).

Para $L \sim 5$, durante o choque indicado pela linha vertical vermelha na Figura 6.4 (d), observa-se uma queda na relação (Wpe/Wce). Os valores atingidos estão abaixo de 5 e apresentam uma potencialidade capaz de proporcionar condições favoráveis em poucas horas para a energização de elétrons de alta energia através da interação ressonante com ondas *Chorus*, contribuindo assim para ocorrência de espalhamento por *pitch angle* (AGAPITOV et al., 2020). No instante do *dropout*, a elipticidade no painel (b) da Figura 6.3 e o ângulo normal da onda no painel (c) da Figura 6.5 estão próximos de 0,8 e 70° (obliqua), respectivamente.

As linhas sólidas pretas verticais que indicam os instantes T1a, T1b e T1c, selecionados dentro da região T1, que indicam os instantes das atividades de *Bursts*. Esses períodos foram quantificados em termos de magnitude para subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler*, a fim de identificar características e potencialidades dessas atividades. Essas grandezas estão apresentadas na Tabela 6.2.

Figura 6.4 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO NS - T1.



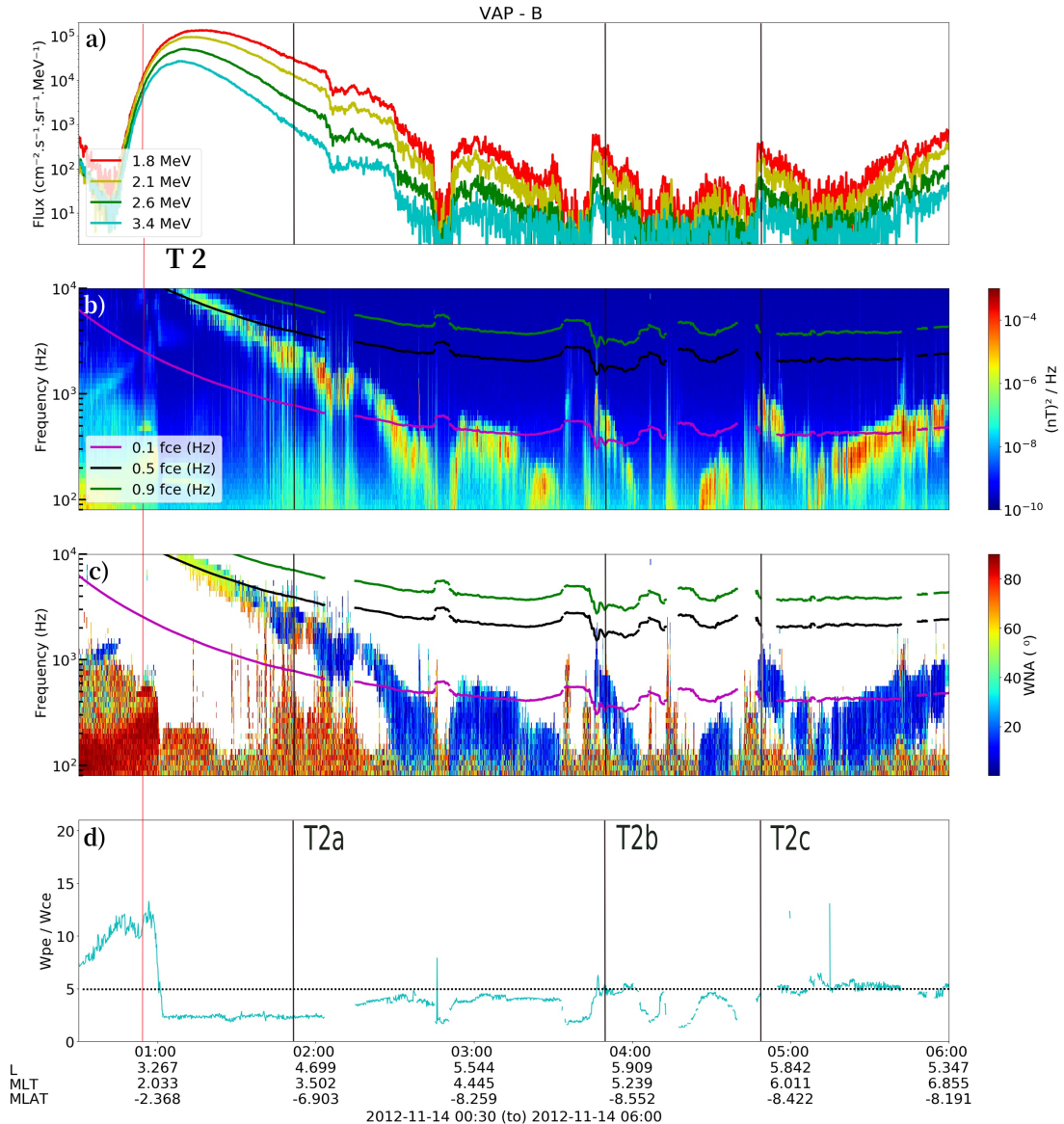
Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO NS - T1. De cima para baixo: (a) fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen B; (b) espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1fce (Hz), a linha preta, 0,5 fce (Hz) e a linha verde, 0,9 fce (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^\circ$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (W_{pe}/W_{ce}).

Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.5 ilustra as mesmas variáveis apresentadas na Figura 6.4, porém para o intervalo T2, associado ao CASO NS. A linha vermelha vertical serve como referência para indicar o início da região de estudo. Durante este intervalo, a sonda Van Allen B está em sua fase ascendente, em modo *Outbound*, dirigindo-se em direção a regiões de L^* mais externas, variando de aproximadamente $3RE$ até alcançar cerca de $6RE$. Nesse intervalo são observadas diversas diminuições no fluxo de elétrons relativísticos com vales geralmente seguidos de uma rápida recuperação localizada. Isso se observa concomitante ao aumento na intensidade da atividade das ondas *Chorus*, conforme mostrado o painel (b) da Figura 6.5. As ondas *Chorus* foram observadas continuamente quase ao longo de toda a órbita, principalmente na banda baixa (0,1-0,5 fce). Os ângulos assimilados à atividade das ondas são bem variados e apresentam características de atividade de ondas *Chorus* no modo *Whistler*, quase paralelas e oblíquas à direção do campo geomagnético. Os períodos em que a atividade oblíqua mantém-se por mais tempo, geralmente apresenta-se próximo do intervalo de estudo T2a. Entretanto, ângulos abaixo de 30° também são detectados, indicando a presença de atividade de ondas *Chorus* quase paralelas, conforme ilustrado no painel (c) da Figura T2.

As linhas sólidas pretas verticais que indicam os instantes T2a, T2b e T2c, selecionados dentro da região T2, referem-se às atividades de *Bursts* identificadas. Esses períodos foram quantificados em termos de magnitude para subelementos e pacotes de ondas de *Chorus* no modo *Whistler*. É importante destacar que essa identificação é feita em todos os estudos de caso.

Figura 6.5 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO NS - T2.

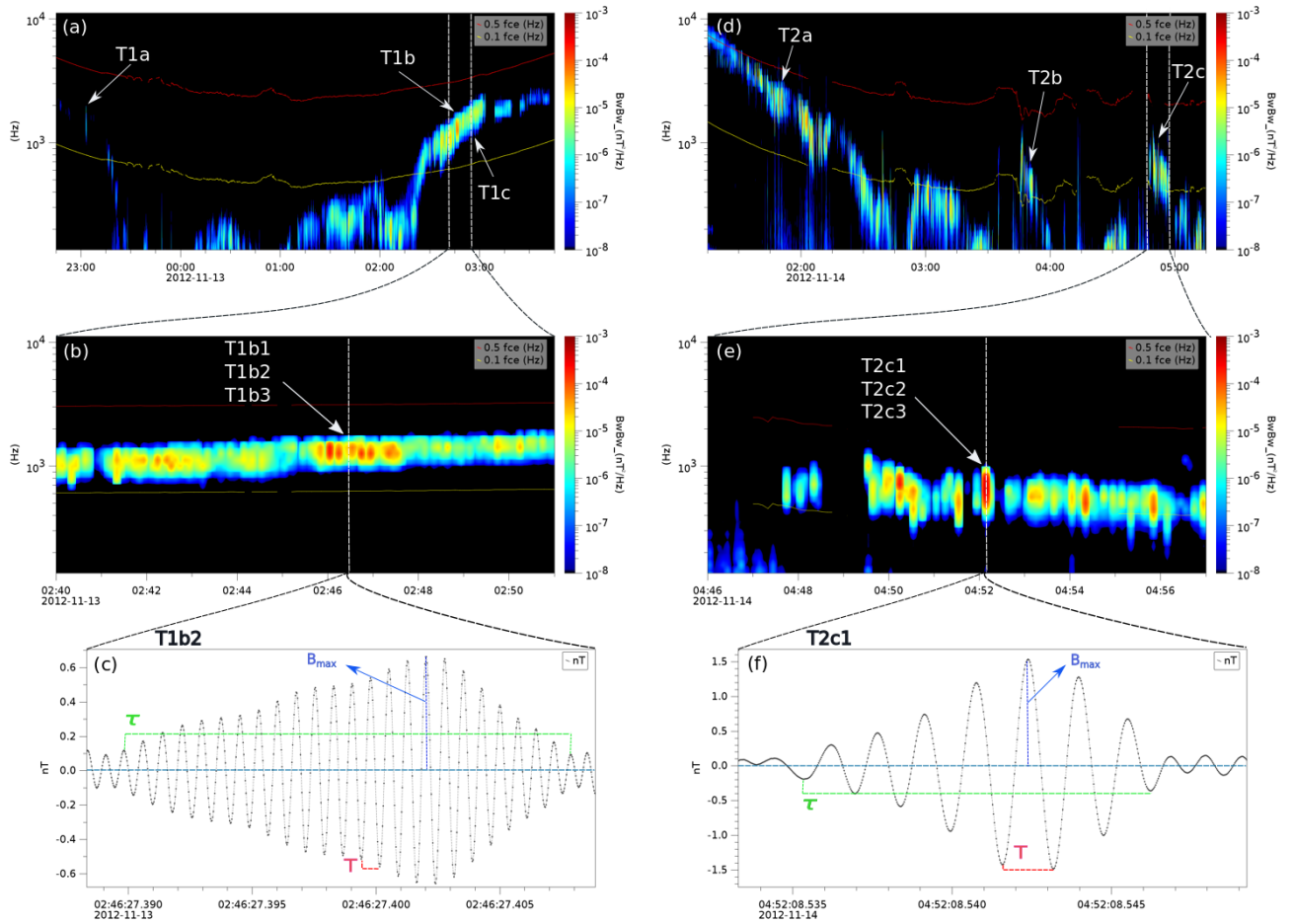


Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO NS - T2. De cima para baixo: (a) O fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen B; (b) Espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1fce (Hz), a linha preta, 0,5 fce (Hz), e a linha verde, 0,9 fce (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^\circ$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (Wpe/Wce).

Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.6 visa enfatizar os locais e a caracterização dos *Bursts* dentro do período em estudo. Observa-se na Figura 6.6 (painéis (a) e (d)) a atividade de ondas para os tempos T1 e T2 do CASO NS. As linhas horizontais pontilhadas brancas nos painéis (a) e (d) indicam o intervalo onde é aplicado um zoom, aumentando a resolução temporal. Esse intervalo é representado nos painéis (b) e (e) respectivamente e corresponde a um zoom temporal que vai de 5 horas para 11 minutos. Esses painéis representam o primeiro zoom, referem-se aos espectrogramas de campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda *Van Allen B*, em que o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência em função do tempo. Aumentando-se a resolução temporal, observa-se nos painéis (b) e (e) uma potência significativa no espectro do campo magnético com pontos mais densos, a qual é investigada a ocorrência de *Bursts* a partir de medidas em altíssima resolução, como observado nos painéis (c) e (f). Como mencionado anteriormente, as assinaturas das ondas *Chorus* são notáveis nesses instantes. Embora vários subelementos das *Chorus* sejam detectados dentro deste pequeno intervalo de tempo, apenas um exemplo de *Bursts* é apresentado para cada intervalo de estudo. Os pacotes de ondas denominados como T1b2 e T2c1 estão ilustrados na Figura 6.6 (painéis (c) e (f)), destacando-se as seguintes características desses subelementos: período do pacote de onda (τ), período da onda (T) e amplitude máxima da onda (B_{max}). Ainda a Figura 6.6 identifica as regiões onde estão todos os *Bursts* quantificados no estudo de caso. Os subelementos *Chorus* denominados T1b2 e T2c1 mostrados nos painéis (c) e (f) apresentam uma amplitude no campo magnético da onda B_{max} de aproximadamente, de 0,67 (nT) e 1,53 (nT) respectivamente.

Figura 6.6 - Subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* CASO NS - T1 e T2.



Subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO NS. De cima para baixo: (a) e (d) representando espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) , a frequência no eixo y (Hz), em função do tempo, medida pelo instrumento EMFISIS-(MAG) a bordo da sonda *Van Allen Probes B*; as barras paralelas e horizontais indicam o zoom no tempo usado em (b) e (e) respectivamente para o mesmo parâmetro. A linhas pontilhada no gráfico (b) e (e) ilustram um novo *Zoom* no tempo para a região em que o instrumento EMFISIS-(EVW) capta a variação no campo magnético local em alta resolução, expresso em [nT]. Os parâmetros das ondas: τ e T referem-se aos períodos respectivos do envelope de onda e do ciclo de onda do subelemento central. B_{max} é o valor instantâneo máximo da amplitude da onda do subelemento central.

Fonte: Produção autoral.

A Tabela 6.2 apresenta os parâmetros coletados a partir da sonda Van A (T1a1,

T1a2 e T1a3 para o CASO NS, onde foram escolhidos e quantificados três instantes de tempo dentro de três ocorrências de *Bursts* o período T1 (T1a1, T1a2 e T1a3; T1b1, T1b2 e T1b3; e T1c1, T1c2 e T1c3) e para o período T2 (T2a1, T2a2 e T2a3; T2b1, T2b2 e T2b3; e T2c1, T2c2 e T2c3), durante a ocorrências de *Bursts* assim pode-se calcular os principais parâmetros associados aos subelementos, como, o ângulo de abertura do cone de perda $\Delta\alpha$ e o tempo de interação das ondas *Chorus* Δt . Os resultados obtidos a partir desses cálculos estão apresentados na Tabela 6.2. As equações 5.8 e 5.9 são utilizadas para calcular o $(\Delta\alpha)$ e o (Δt) na escala dos subelementos, respectivamente. Considerando τ e T como o período do pacote de onda e de um ciclo de onda, respectivamente, a Tabela 6.2 apresenta o ângulo de abertura do cone de perda para cada pacote de onda $(\Delta\alpha\tau)$ e para cada ciclo de onda $(\Delta\alpha T)$ de cada subelemento. O mesmo procedimento foi realizado para o tempo de interação $(\Delta t\tau)$. A Tabela também inclui os parâmetros da onda, como a frequência da onda (ω) , a razão W_{pe}/W_{ce} , o valor instantâneo máximo da amplitude da onda do subelemento central B_{max} , o tempo característico de cada envelope de onda τ , e o valor absoluto do campo magnético de fundo B_o para o instante de tempo do envelope em questão. Deve-se salientar que as correções relativísticas são incluídas nestes cálculos, considerando uma aproximação de primeira ordem, especificamente para o nível de energia de 1,8 MeV.

A Tabela 6.2 apresenta os principais parâmetros identificados durante esse período, que incluem as ocorrências de T1a1, T1a2 e T1a3, todas identificadas no dia 12 de novembro de 2012, às 23:03:02.54 UT, 23:03:02.57 UT e 23:03:02.64 UT, respectivamente, identificados no instante do *dropout*, observando-se aproximadamente de 7,0 a 9,0 ciclos de onda em todo o pacote. Para o intervalo T1, as amplitudes de B foram baixas. A maior amplitude foi registrada no elemento T1c2, atingindo-se o valor de 0,66 (nT). Nos intervalos T1b e T1c distanciam-se no tempo por menos de 10 minutos. Os valores calculados para a razão W_{pe}/W_{ce} estão abaixo 4, sugerindo eficiência na interação entre as ondas *Chorus* e as partículas (AGAPITOV et al., 2019; WANG, 2023).

$\Delta\alpha T$ apresenta valores consideravelmente baixos, principalmente para o intervalo T1a, que atingiu um máximo de $0,78^\circ$ para um único elemento. Os valores para $\Delta\alpha\tau$ nesse mesmo intervalo não passaram de 6° . Ainda para o período de estudo T1, nos intervalos T1b e T1c, os valores de $\Delta\alpha\tau$ apresentam-se significativamente maiores que observados em T1a. Isto sugere que as ondas *Chorus* no intervalo de tempo dos *Bursts* T1b e T1c apresentaram maior potencialidade para interagir com os elétrons relativísticos por meio do mecanismo de *pitch-angle scattering*. No caso

do *Burst* T1b2, os valores $\Delta\alpha_\tau$ atingiram $85,55^\circ$ para energias de 1.8 MeV, sendo este o mais significativo quando comparado como os outros, T1b e T1c.

No intervalo T2, as amplitudes de B foram significativamente maiores em comparação ao intervalo T1, exceto em T2b2 e T2b3. A maior amplitude foi registrada no elemento T2c1, atingindo o valor de 1,53 (nT). Os valores calculados para a razão W_{pe}/W_{ce} mostraram-se menores que 5 nos intervalos T2a e T2b e ligeiramente abaixo de 6 no intervalo T1c, sugerindo possível eficiência de interação em poucas horas (HORNE et al., 2003; AGAPITOV et al., 2019; WANG, 2023). A interação entre os subelementos das ondas *Chorus* e os elétrons relativísticos parece ser significativa também pelos altos valores observados em $\Delta\alpha\tau$ e $\Delta\alpha T$ quando comparados com os subelementos T1, exceto em T2b2 e T2b3. Os *Bursts* T2b1, T2c1 e T2c1 apresentaram valores para a razão B/B_o muito perto de 1, indicando que mecanismos não lineares podem ter atuado nesses intervalos.

.As frequências de onda ω estão ligeiramente maiores que 2 kHz para o intervalo T2a, enquanto para os intervalos T2b e T2c, variam entre 470 e 740 (Hz). O período T2 teve uma predominância de ondas *Chorus* em banda baixa ($0,1 - 0,5 f_{ce}$), conforme visto na Figura 6.6, também sugerindo possível eficiência para ocorrência de perda localizada dirigida por ondas *Chorus* (AGAPITOV et al., 2015; AGAPITOV et al., 2019; ARTEMYEV et al., 2021).

Tabela 6.2 - Parâmetros e cálculo de ($\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso NS.

DATA	T1-T2	τ (ms)	B (nT)	B_o (nT)	ω (Hz)	W_{pe}/W_{ce}	Δt_τ (ms)	$\Delta\alpha_\tau$ ($^\circ$)	$\Delta\alpha_T$ ($^\circ$)
12/11/13	T1a								
23:03:02.54	T1a1	4,23	0,13	285	1730	3,73	18,94	5,49	0,78
23:03:02.57	T1a2	5,24	0,11	285	1760	3,73	23,47	5,75	0,66
23:03:02.64	T1a3	4,16	0,12	285	1780	3,73	18,64	4,98	0,72
13/11/13	T1b								
02:46:27.36	T1b1	6,95	0,57	224	1370	3,73	31,24	39,68	4,4
02:46:27.39	T1b2	12,7	0,67	224	1380	3,73	57,3	85,55	4,78
02:46:27.46	T1b3	6,59	0,45	224	1400	3,73	29,95	30,03	3,51
13/11/13	T1c								
02:55:20.70	T1c1	5,57	0,61	241	1530	3,76	25,51	34,67	3,42
02:55:20.71	T1c2	6,53	0,66	241	1530	3,76	29,91	43,98	4,04
02:55:20.77	T1c3	5,39	0,49	241	1530	3,76	24,69	26,95	2,8

14/11/13	T2a								
01:47:15.41	T2a1	3,05	1,23	293	2100	2,18	14,8	40,55	5,32
01:47:15.48	T2a2	4,19	1,02	293	2300	2,18	21,16	48,1	5,51
01:47:15.51	T2a3	5,7	0,97	293	2230	2,18	28,41	61,39	4,95
14/11/13	T2b								
03:48:50.89	T2b1	10,09	1,29	128	470	4,54	33,93	90	19,91
03:51:14.43	T2b2	13,01	0,38	131	500	4,70	44,83	37,96	6,71
03:51:14.53	T2b3	16,04	0,28	131	500	4,70	55,27	34,49	4,3
14/11/13	T2c								
04:52:08.53	T2c1	9,29	1,53	145	693	5,97	36,6	90	20,69
04:52:08.88	T2c2	9,98	1,18	145	711	5,97	39,89	90	15,45
04:52:08.96	T2c3	8,06	1,45	145	740	5,97	33,02	90	18,22

Tabela apresentando os principais parâmetros para os cálculos de *pitch-angle* e tempo de interação através de *Bursts* gerados por ondas *Chorus* para o estudo de **CASO NS**. Calculados por meio das equações 5.9,5.8, assumem aproximações de primeira ordem para o nível de energia de 1,8 MeV.

Fonte: Produção autoral.

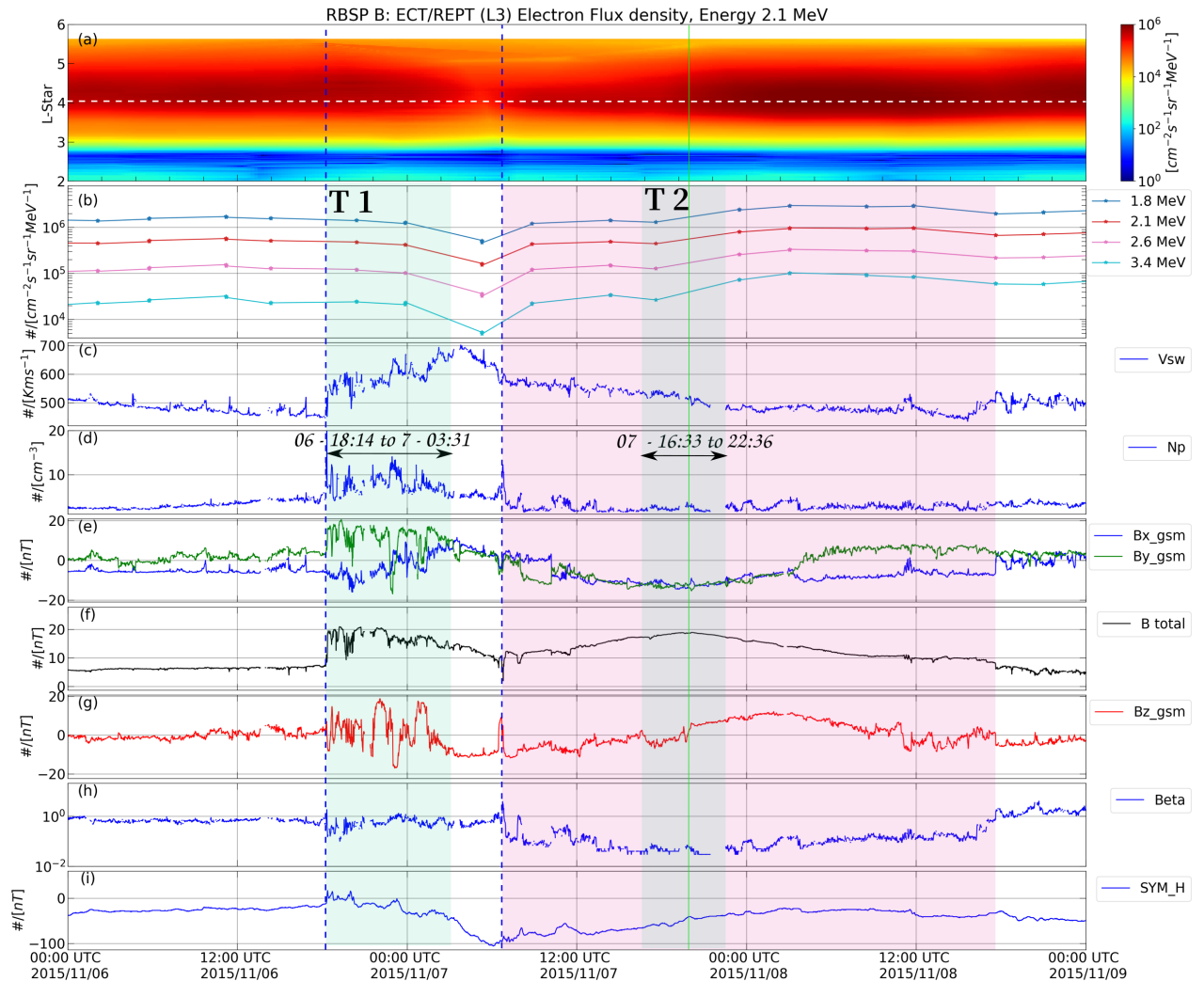
6.2 CASO SN: ICMEs com nuvem, com rotação da componente Bz de Sul para Norte

A Figura 6.7 apresenta os dados para o estudo de caso SN, durante o período de 6 a 9 de novembro de 2015. A ordem dos painéis é a mesma apresentada na Figura 6.1. Concomitantemente com a chegada da frente de choque da ICME, indicada pela primeira linha tracejada azul, observa-se o início de uma queda na densidade populacional do cinturão externo, visível no painel (a) e (b). O painel (b) mostra que a diminuição é também observada em outros níveis de energia relativísticos, aqui apresentado entre (1,8 MeV e 3,4 MeV). A queda na população do cinturão de radiação é gradual na bainha magnética e atinge a menor densidade momentos antes do início da passagem da MC. A bainha magnética da Ejeção de Massa Coronal Interplanetária (ICME) está localizada entre as linhas verticais pontilhadas em azul, notável pelo salto abrupto na velocidade do vento solar, V_{sw} , de aproximadamente 450 km/s para 600 km/s, e pelo aumento substancial na densidade no vento solar N_p . A bainha magnética da estrutura estende-se por aproximadamente 12:30 horas até a chegada da estrutura magnética indicada pela segunda linha pontilhada azul na Figura 6.7, às 06:47 UT do dia 7 de novembro de 2015. A nuvem magnética estende-se até as 18:21 UT em 8 de novembro de 2015, e sua extensão é representada pela região sombreada em rosa transparente. O comportamento do IMF, para este intervalo, é característico de uma nuvem magnética com baixos valores do parâmetro β de plasma, painel (h). É importante destacar que a passagem da nuvem apresenta uma rotação do campo Bz, visível conforme mostrado no painel (g), indo de Sul (valores negativos), para Norte (valores positivos). Os valores do índice SYM_H apontam o menor valor para o instante da chegada da MC, próximo de $-100nT$. Isso se justifica pela média negativa da componente Bz do IMF e é o momento em que se observa a menor densidade de população do cinturão externo para o período visível no painel (a).

O que se destaca neste caso é que um dos períodos de repovoamento do cinturão de radiação intensificou-se durante a passagem da ICME, coincidindo com a rotação da componente Bz do IMF de Sul para Norte. A recuperação na população do cinturão externo ocorre em dois estágios. O primeiro estágio ocorre no coração do cinturão de radiação em $L^* \sim 4RE$, começando no instante em que a MC atinge a magnetosfera. A componente Bz permanece negativa em todos os estágios. A segunda etapa começa às 19h15 UT do dia 7 de novembro de 2015, marcada pelo momento em que a componente Bz torna-se positiva, é indicada na Figura 6.7 pela linha vertical verde. Neste momento o cinturão externo é repovoado principalmente em valores mais

externos, instante em que a estrutura magnética tem uma orientação média positiva na componente B_z . As regiões de estudo escolhidas, são as de variabilidade do fluxo de elétrons do cinturão de radiação e estão delimitadas pelas faixas transparentes sombreadas em verde, a primeira na bainha magnética, chamada aqui de T1, e a segunda na nuvem magnética, definindo o segundo período, T2.

Figura 6.7 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: **CASO SN**.



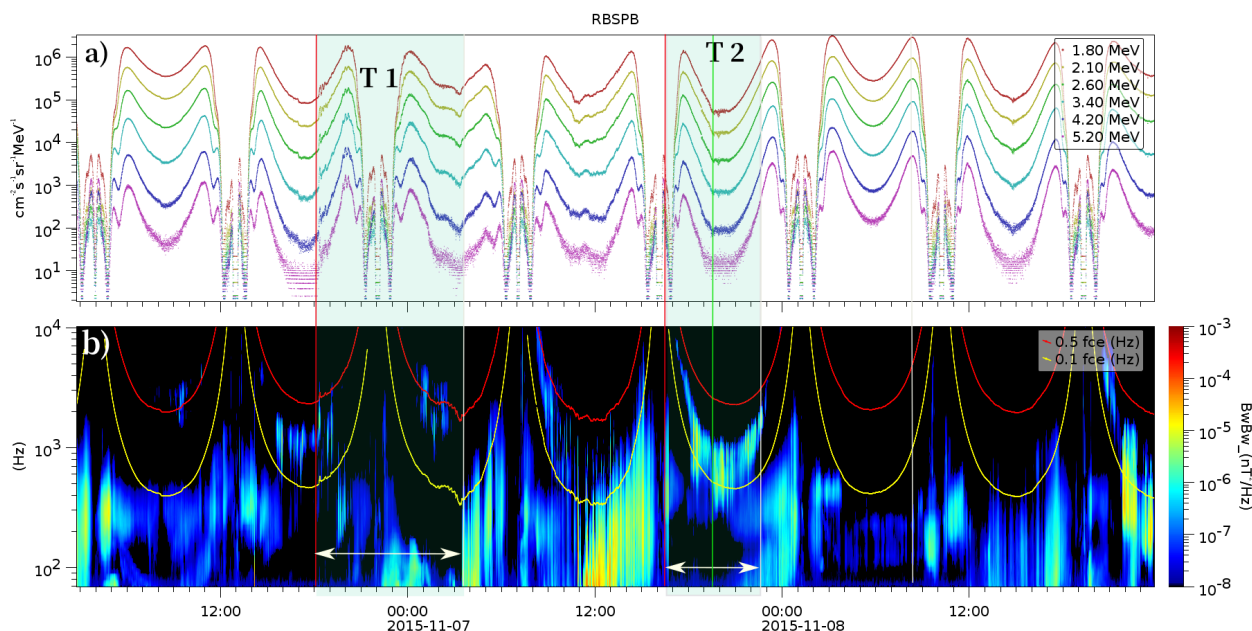
ICME, com MC Caso-SN, em 7 de novembro de 2015. De cima para baixo: (a) 2.10 fluxo de elétrons omnidirecional medido pelo instrumento REPT a bordo do Van Allen Probes B, em função de L^* e tempo; (b) fluxo para cinco diferentes níveis de energia (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV), em $L^* = 5$; (c) velocidade do vento solar V_{sw} ; (d) densidade N_p ; (e) componentes do Campo Magnético Interplanetário (IMF) B_x_{gsm} (azul) e B_y_{gsm} (verde), em $[nT]$; (f) módulo da amplitude da intensidade IMF B total em (preto), em $[nT]$; (g) componente IMF B_z_{gsm} ; (h) Beta de plasma; e (i) index symmetric SYM_H . As linhas pontilhadas verticais azuis referem-se ao tempo de início das fases da tempestade geomagnética, que representam o choque da estrutura e o início do MC, respectivamente. Linhas verticais pontilhadas azuis separam as três diferentes regiões do evento, da esquerda para a direita: o vento solar, a bainha e a nuvem magnética. A linha vertical verde sólida representa a chave de polaridade MC. As duas regiões em verde claro, T1 e T2, correspondem ao período de interesse no estudo das ondas e variação de fluxo. A região vermelha clara corresponde ao período de MC, que vai das 06:47 UT do dia 7 de novembro de 2015 até às 18:21 UT, em 8 de novembro de 2015.

Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.8 (a) ilustra as variações no fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação sob influência de uma tempestade geomagnética ocorrida no dia 07 de novembro de 2015. A ordem dos painéis é a mesma apresentada na Figura 6.2. Na Figura 6.8 (b) é identificada a presença de atividade de ondas *Chorus* para os intervalos de estudo de interesse, T1 e T2, os quais podem coincidir com variabilidades localizadas de fluxo de elétrons. Observa-se uma diminuição no fluxo de elétrons no intervalo T1, a qual é quase simultâneo ao início do choque interplanetário e o começo da interação da estrutura com a magnetosfera.

No painel (b) é possível observar um aumento na densidade média na faixa de frequência que abrange as ondas *Chorus* no modo *Whistler*, com assinaturas em ambas as bandas de ação, banda baixa (abaixo de $0.5 f_{ce}$) e banda alta (acima de $0.5 f_{ce}$). As ondas *Chorus* são observadas momentos antes da chegada da estrutura solar, onde um aumento na densidade espectral indica uma atividade de ondas mais intensa e localizada nas regiões de maior variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos. Dentro da MC, na região T2, observa-se uma alta flutuação no fluxo de elétrons logo após a componente do campo Bz tornar-se majoritariamente positiva, momento destacado no gráfico pela linha vertical sólida em verde claro.

Figura 6.8 - Atividade de ondas *Chorus* e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos: CASO SN.



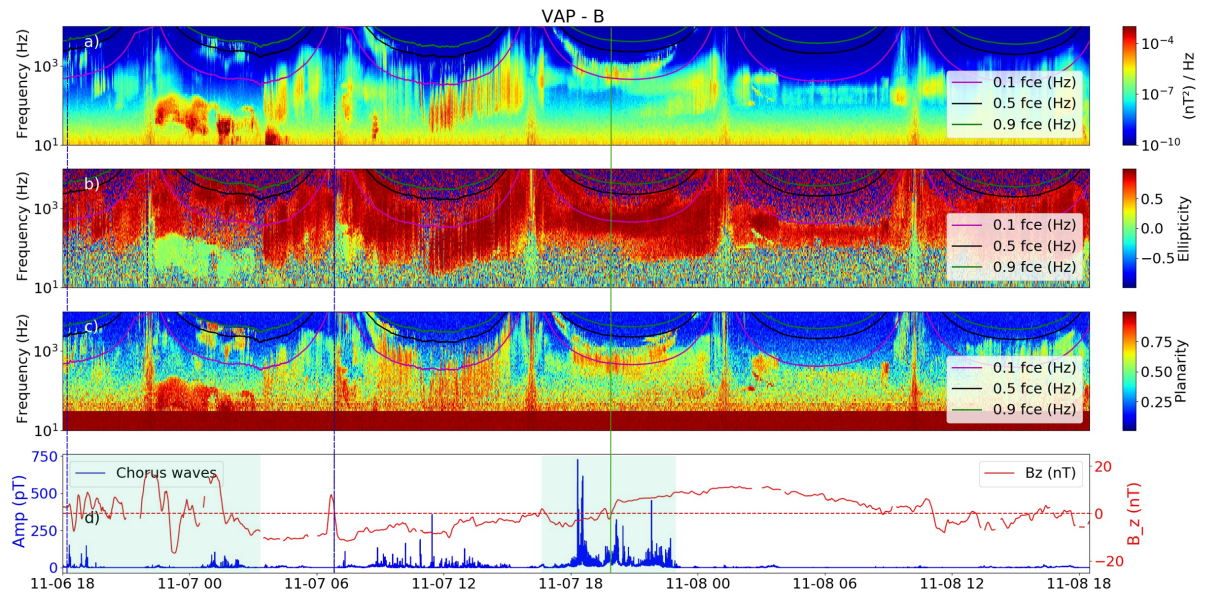
Fluxo de elétrons relativísticos e assinaturas de ondas *Chorus* no modo *Whistler*, CASO SN. De cima para baixo: a) Fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação durante o intervalo de 12 a 14 de novembro de 2012, para cinco níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV; 4,2 MeV e 5,2 MeV), utilizando os dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen B; b) potência espectral do campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen Probes B, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo $y(Hz)$, a frequência, em função do tempo. A linha na cor amarela representa os valores de $0,1 fce(Hz)$ e a linha em vermelho, $0,5 fce(Hz)$.

Fonte: Produção autoral.

Na Figura 6.9, são observadas as ondas *Chorus* e suas amplitudes são quantificadas no tempo. A ordem dos painéis é a mesma apresentada na Figura 6.3. A distinção na atividade das ondas *Chorus* é mostrada entre a banda alta ($0,5 - 0,9 fce$) e a banda baixa ($0,1 - 0,5 fce$). Essa atividade é simultânea em ambas as bandas de frequência na primeira órbita após o choque. O momento do choque da estrutura é sinalizado pela primeira linha vertical pontilhada azul. A amplitude integrada, painel (d), mostra que valores mais elevados têm predominância no início do MC, instante indicado pela segunda linha vertical pontilhada azul. As maiores amplitudes são alcançadas quando a componente B_z apresenta-se negativa. A atividade de ondas *Chorus* para o intervalo MC é identificada principalmente como sendo de banda

baixa, notadamente na segunda órbita da sonda dentro do MC região T2.

Figura 6.9 - Atividade de ondas *Chorus* no modo *Whistler* Versus IMF Bz: **CASO SN**.



Amplitude e características das ondas *Chorus* no modo *Whistler*, CASO SN. De cima para baixo: (a) Espectrograma de campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda *Van Allen Probes B*, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de $0,1f_{ce}$, a linha preta, $0,5 f_{ce}$ e a linha verde, $0,9 f_{ce}$; (b) Elipticidade; (c) Planaridade; (d) Amplitude do campo magnético na faixa de frequência das ondas *Chorus* é representada pela linha azul, em [pT], com dados da sonda Van Allen B, aplicando-se filtro de identificação segundo Ni et al. (2020). A linha vermelha apresenta os valores do Campo Magnético Interplanetário (IMF) no sistema de coordenadas GSM para a componente Bz, em [nT], obtido pelo satélite ACE.

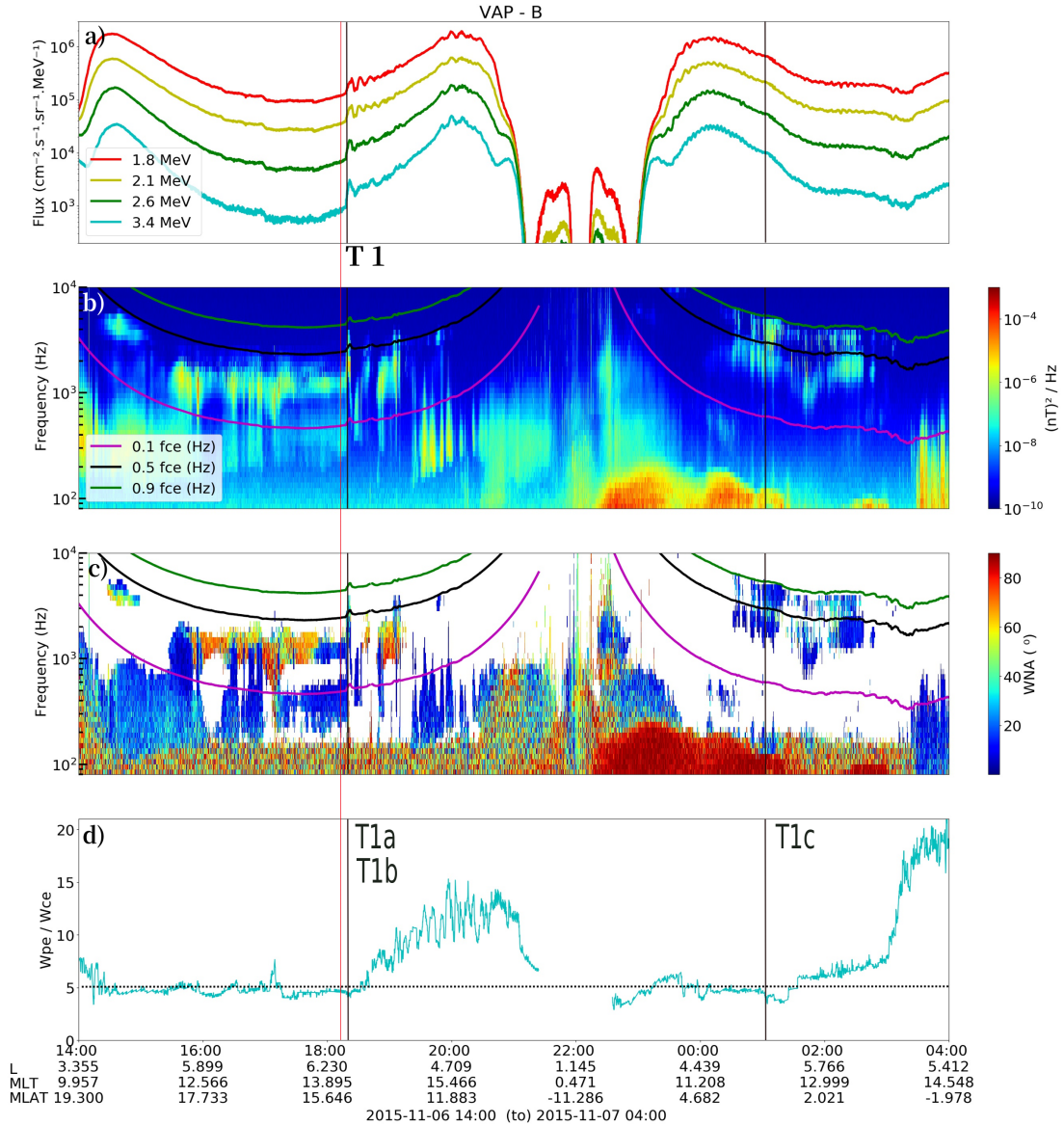
Fonte: Produção autoral.

O primeiro painel na Figura 6.10 apresenta a primeira região T1 a ser estudada para o caso C-SN. A ordem dos painéis é a mesma apresentada na Figura 6.5 e também na Figura 6.10 nesse estudo de caso. O período refere-se à chegada do choque, mostrada pela linha vertical vermelha. No painel (a), pode-se observar que o fluxo de elétrons sofre um rápido aumento no instante da chegada da estrutura seguido de uma flutuação, o qual ocorre concomitantemente com o início de atividade de ondas

Chorus de banda baixa (painel b). Verifica-se no painel (c) que a atividade das ondas *Chorus* tem uma propagação quase paralela e oblíqua ao campo magnético de fundo, indicada pelos valores baixos nos ângulos normais da onda ($0^\circ - 30^\circ$) e altos valores ($30^\circ - 70^\circ$), respectivamente. São observadas ondas *Chorus* entre as bandas baixas e altas, esses ingredientes sugerem uma possível competição entre perdas de partículas no cinturão de radiação e possíveis acelerações locais na faixa de energia relativística (AGAPITOV et al., 2017; DA SILVA et al., 2020)

As ondas *Chorus* em banda alta são capazes de interagir com partículas na faixa de energia relativística, acelerando-as localmente. Neste período, a sonda atinge seu apogeu em $L^* = 5 - 6RE$. A fase descendente tende a apresentar maiores densidades de plasma, e assim, verificam-se valores mais elevados para a razão W_{pe}/W_{ce} , sugerindo baixa eficiência na interação ressonante entre as partículas relativísticas e as ondas *Chorus* (HORNE et al., 2003). No entanto, é importante observar que o período de aumento localizado ligeiramente após a chegada do choque apresenta ondas *Chorus* quase paralelas e $W_{pe}/W_{ce} < 5$, isto sugere uma possibilidade de eficiência na interação ressonante entre as ondas *Chorus* e as partículas relativísticas em um curto período de tempo (AGAPITOV et al., 2019; ARTEMYEV et al., 2021).

Figura 6.10 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO SN - T1.

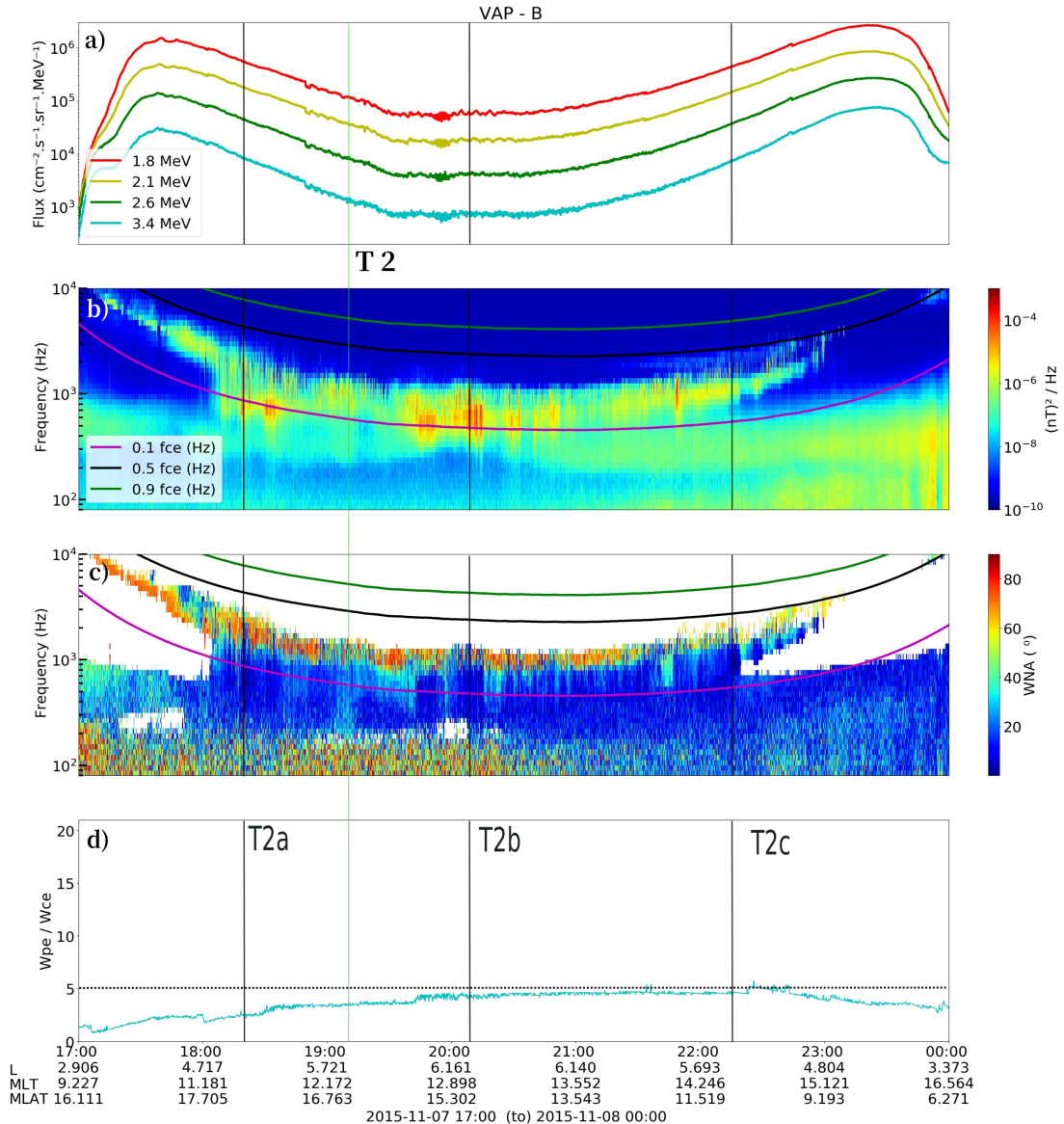


Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO SN - T1. De cima para baixo: (a) O fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen B; (b) Espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1f_{ce} (Hz), a linha preta, 0,5 f_{ce} (Hz), e a linha verde, 0,9 f_{ce} (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^{\circ}$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (W_{pe}/W_{ce}).

Fonte: Produção autoral.

Na Figura 6.11 são observadas pequenas variações aparentemente localizadas no fluxo de elétrons relativísticos. Isso ocorre concomitante ao aumento na intensidade da atividade das ondas *Chorus*, conforme mostrado o painel (b). As ondas *Chorus* foram observadas continuamente quase ao longo de toda a órbita, principalmente na banda baixa ($0,1 - 0,5 f_{ce}$), apresentando-se como ondas *Chorus* quase paralelas e oblíquas. Os períodos em que a atividade oblíqua mantém-se por mais tempo referem-se à região do intervalo de estudo T2a. No entanto, as maiores intensidades no espectro de potência apresentado no painel (b) estão associadas a atividades com ângulos inferiores a 30° , conforme mostrado no painel (c), as quais se configuram como ondas *Chorus* quase paralelas. A razão (W_{pe}/W_{ce}) mantém-se em valores menores que 5 para todo o intervalo T2 neste caso, indicando maior probabilidade de interação ressonante entre as atividades de ondas *Chorus* e elétrons na região (HORNE et al., 2003; AGAPITOV et al., 2019; WANG, 2023).

Figura 6.11 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO SN - T2.



Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO SN - T2. De cima para baixo: (a) O fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen B; (b) Espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1f_{ce} (Hz), a linha preta, 0,5 f_{ce} (Hz), e a linha verde, 0,9 f_{ce} (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus (°); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (W_{pe}/W_{ce}).

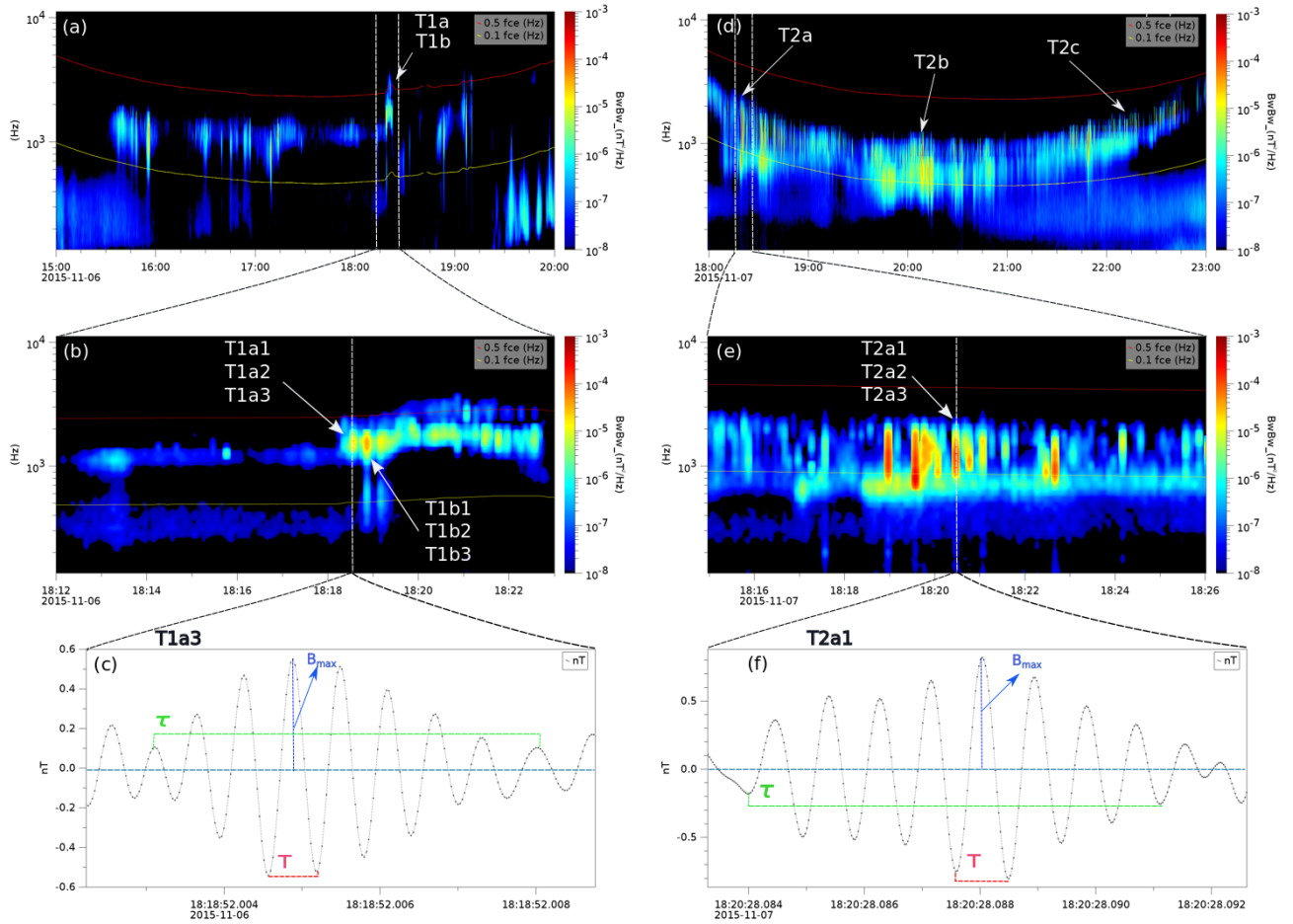
Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.12 apresenta o espectro de potência do campo magnético, os subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO SN - T1 e T2. Nos painéis (a) e (d) da Figura 6.12, pode-se observar a atividade das ondas nos tempos T1 e T2 do CASO SN. A ordem dos painéis é a mesma que foi apresentada anteriormente na Figura 6.6. O espectro de potência do campo magnético no primeiro painel da Figura 6.12 representa a última órbita da espaçonave Van Allen B em 6 de novembro de 2015. As linhas verticais pontilhadas brancas no painel (a) indicam a faixa onde um zoom é aplicado aumentando a resolução temporal, representando o referido período no painel (b) que é de aproximadamente 11 min (18:12 UT às 18:23 UT do dia 06 de novembro de 2015). Nesse período a sonda está situada em um $L^* \sim 6RE$ em fase ascendente, período que a onda de choque causada pela MC chega à magnetosfera. Observa-se atividade de ondas *Chorus* em banda baixa e alta, assim como alta flutuabilidade na componente B_z do IMF.

No painel (d) da Figura 6.12, as linhas verticais pontilhadas brancas marcam a região onde foi aplicado um zoom para aumentar a resolução temporal. Esse zoom abrange o período destacado no painel (e), que compreende aproximadamente 11 minutos, das 18:15 UT às 18:26 UT do dia 07 de novembro de 2015. Durante essa janela de tempo, a sonda estava posicionada em um L^* próximo a 6 RE. Nesse intervalo, observa-se a presença de atividade de ondas *Chorus* em banda baixa. A componente B_z do IMF está na direção Sul nesse período, coincidindo com a ocorrência de pacotes de ondas *Chorus* que apresentaram as maiores amplitudes durante esse evento.

Como já mencionado, as assinaturas das ondas do *Chorus* naquele instante são notáveis. Vários subelementos de ondas *Chorus* foram detectados neste pequeno intervalo de tempo, mas apenas um exemplo de *Bursts* para este período é mostrado na Figura 6.12, painel (e). O terceiro painel mostra a caracterização dos *Bursts* através de medições de campo magnético em alta resolução. O subelemento de *Chorus* selecionado nos painéis (c) e (f) apresentaram amplitude do campo magnético da onda máxima do subelemento central $B_{max} \sim 0,58nT$ e $B_{max} \sim 0,82nT$ respectivamente, durante os intervalos T1a e T2a. Essas representações gráficas mostram respectivamente os maiores e menores valores para a amplitude dos *Bursts* encontrada nos pacotes T1a3 e T2a1. As amplitudes no intervalo T2a atingem valores de até ($B_{max} \sim 1,18nT$). Esses dados quantitativos e seus parâmetros de onda são detalhados na Tabela 6.3.

Figura 6.12 - Subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* CASO SN - T1 e T2.



Subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO NS. De cima para baixo: (a) e (d) representando espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo medida pelo instrumento EMFISIS-(MAG) a bordo da sonda *Van Allen Probes B*; as linhas paralelas verticais indicam a região do zoom no tempo usado em (b) e (e) respectivamente para o mesmo parâmetro. As linhas pontilhadas no gráfico (b) e (e) ilustram um novo *Zoom* no tempo para a região em que o instrumento EMFISIS-(EVW) capta a variação no campo magnético local em alta resolução, expresso em [nT]. Os parâmetros das ondas: τ e T se referem aos períodos respectivos do envelope de onda e do ciclo de onda do subelemento central. B_{max} é o valor instantâneo máximo da amplitude da onda do subelemento central.

Fonte: Produção autoral.

A Tabela 6.3 exibe os parâmetros coletados pela sonda Van Allen B nos intervalos de

interesse T1 e T2 para o estudo de caso SN. Durante essa investigação, identificaram-se ocorrências de *Bursts* em seis períodos distintos, sendo três deles registrados em cada um dos intervalos de interesse. As colunas apresentadas na Tabela 6.3 são as mesmas descritas na Tabela 6.2. Importante mencionar que a Tabela 6.2 leva em consideração as correções relativísticas, e os valores são calculados com uma aproximação de primeira ordem, sendo apresentados para o nível de energia de 1,8 MeV.

No intervalo T1a e T1b, os *Bursts* foram selecionados com menos de dois minutos de diferença entre eles. Durante o intervalo T1a e T1b, as observações foram realizadas em 06 de novembro de 2015, às 18:18:51.66 UT e 18:18:53.23 UT, respectivamente. A sonda estava localizada na magnetosfera com uma posição aproximada de $MLT \sim 13,8(H)$ e um valor de L^* em torno de 5,5 RE. Já os *Bursts* analisados em T1c, as observações ocorreram em 07 de novembro de 2015. Os valores calculados para a razão W_{pe}/W_{ce} para todos os intervalos T1 e T2 ficaram em aproximadamente 4,5 que é favorável para a interação entre as ondas *Chorus* e as partículas na região em poucas horas (<2h) (HORNE et al., 2003; AGAPITOV et al., 2019; WANG, 2023).

As amplitudes de pico dos *Bursts* em T1 mostraram-se discretas, com valores menores que 0,6 (nT), enquanto que T2 apresenta-se 1,18 (nT). A interação entre os subelementos da onda *Chorus* e os elétrons relativísticos foi mais significativa para os pacotes de ondas, quando comparados com o ciclo da onda. Isto pode ser observado nos valores de $\Delta\alpha T$ que atingiu seu máximo em T1 de $4,68^\circ$, enquanto os valores de $\Delta\alpha\tau$ alcançaram até $52,03^\circ$. Fazendo-se a mesma analogia para T2, o máximo de $\Delta\alpha T$ foi observado no subelemento T2c1, atingindo o valor de $13,97^\circ$ e $\Delta\alpha\tau$ máximo de $71,85^\circ$ em T2c2.

Os pacotes de ondas para o intervalo T1 apresentaram de 8 a 12 ciclos de onda por pacote analisado. As frequências de onda ω (Hz) mostraram valores em torno de ~ 1600 (Hz) para os instantes T1a e T1b, enquanto no instante T1c, esses valores chegaram a cerca de 2,4 kHz. O intervalo T1c apresentou atividade de ondas *Chorus* em ambas as bandas, alta ($(0,1 - 0,5 f_{ce})$) e baixa ($(0,5 - 0,9 f_{ce})$), os quais podem ser observados na Figura 6.11, onde as maiores amplitudes para o período concentram-se em banda alta. Os *Bursts* detectados com frequências mais altas foram aqueles que apresentaram maiores valores para $\Delta\alpha\tau$. Os pacotes de ondas para o intervalo T2 apresentaram de 5 a 8 ciclos de onda por pacote analisado. As frequências de onda ω ficaram em torno de 1 k(Hz) para os intervalos T2a e T2c, e 700 (Hz) para o intervalo T2b. O período T2 apresentou uma predominância de

ondas *Chorus* em banda baixa ($(0,1 - 0,5f_{ce})$).

Tabela 6.3 - Parâmetros e cálculo de $(\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso SN.

DATA	T1-T2	τ (ms)	B (nT)	B_o (nT)	ω (Hz)	W_{pe}/W_{ce}	Δt_τ (ms)	$\Delta\alpha_\tau$ (°)	$\Delta\alpha_T$ (°)
06/11/15	T1a								
18:18:51.66	T1a1	3,9	0,34	183	1600	4,5	20,64	15,64	2,73
18:18:51.67	T1a2	4,66	0,36	183	1600	4,5	24,66	19,78	2,97
18:18:52.00	T1a3	4,95	0,58	183	1590	4,5	26,13	33,77	4,57
06/11/15	T1b								
18:18:53.23	T1b1	4,33	0,53	183	1600	4,5	22,86	26,99	4,68
18:18:53.25	T1b2	4,5	0,42	183	1600	4,5	23,82	22,29	3,22
18:18:53.43	T1b3	3,67	0,55	183	1600	4,5	19,58	24	3,96
07/11/15	T1c								
01:02:27.85	T1c1	8,65	0,47	214	2400	4,23	50,3	52,24	3,02
01:02:27.92	T1c2	6,4	0,41	214	2400	4,23	37,22	32,6	2,26
01:02:32.34	T1c3	4,5	0,58	214	2020	4,23	24,56	31,74	2,82
07/11/15	T2a								
18:20:28.08	T2a1	7	0,82	305	1150	2,59	23,87	43,61	5,61
18:20:28.09	T2a2	5,72	1,14	305	1150	2,59	19,51	49,55	7,8
18:20:28.10	T2a3	4,7	1,18	305	1170	2,59	16,2	42,6	6,98
07/11/15	T2b								
20:09:39.33	T2b1	11,81	0,62	170	709	4,27	42,96	59,35	6,18
20:09:39.39	T2b2	13,4	0,55	170	703	4,27	47,28	57,95	5,79
20:11:19.69	T2b3	8,4	0,29	170	680	4,27	31,89	20,25	2,89
07/11/15	T2c								
22:14:52.14	T2c1	11,7	0,52	194,5	1420	4,48	57,26	66,35	13,97
22:14:52.41	T2c2	12,5	0,53	194,5	1410	4,46	60,84	71,85	4,02
22:14:52.45	T2c3	11,23	0,3	196,5	1410	4,43	54,38	36,65	2,47

Tabela apresentando os principais parâmetros para os cálculos de *pitch-angle* e tempo de interação através de *Bursts* gerados por ondas *Chorus* para o estudo de **CASO SN**. Calculados por meio das equações 5.9, 5.8, assumem aproximações de primeira ordem para o nível de energia de 1,8 MeV.

Fonte: Produção autoral.

6.3 CASO YS: ICMEs com nuvem, com rotação da componente By e Bx com componente Bz Sul

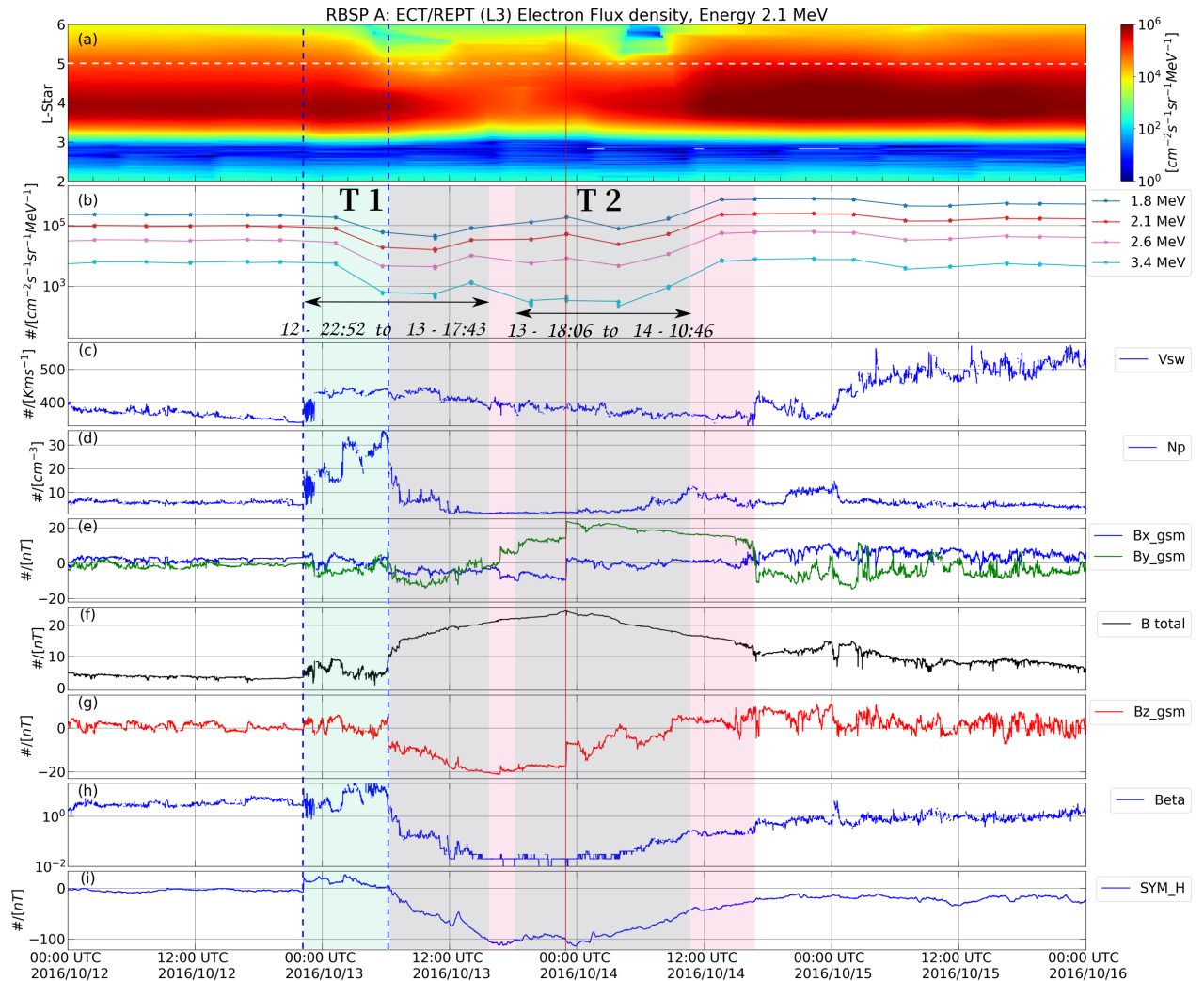
A Figura 6.13 apresenta os dados de fluxo de elétrons relativísticos do cinturão de radiação e do meio interplanetário, para o estudo de caso do evento que ocorreu no período de 12 a 16 de outubro de 2016. A ordem dos painéis é a mesma apresentada na Figura 6.1, porém com dados obtidos da sonda Van Allen A. Este estudo está relacionado a uma ICME que inclui uma nuvem magnética, com rotação das componentes By e Bx, apresentando ainda a componente Bz para Sul. A chegada da frente de choque gerada por essa ICME foi observada às 22:52 UT do dia 12 de outubro, sendo indicada pela primeira linha vertical pontilhada azul. No instante do choque observa-se uma queda na densidade populacional do cinturão externo, como evidenciado no painel (a) da Figura 6.13. Esta diminuição de fluxo de elétrons relativísticos é observada para níveis de energia entre (1,8 MeV e 3,4 MeV), para $L^* = 5RE$ na Figura 6.13 (b). A queda na população do cinturão de radiação em $L^* = 5RE$ cessa com a chegada da MC, porém diminuições de fluxo são observadas em L^* mais internos $L^* < 5$. Os valores do índice SYM_H , no painel (i), refletem as três fases de uma tempestade geomagnética: primeiramente observa-se um aumento no índice devido à compressão do capo magnético Terrestre, causada pelo impacto do choque da ICME; em seguida, a interação da MC com a magnetosfera, com uma intensa e longa componente negativa do IMF, causando reconexão magnética e resultando em uma queda significativa do índice, que atinge valores próximos a $-100nT$. Esses valores são mantidos no centro da estrutura interplanetária por um período de aproximadamente 8 horas. Esse comportamento é justificado pela média negativa da componente Bz do IMF, a qual ocorre quase simultaneamente a menor densidade populacional observada no cinturão de radiação externo, conforme visível no painel (a); por último, observa-se uma lenta recuperação no índice que tem início no centro da MC.

A região da bainha magnética da ICME está localizada entre as linhas verticais pontilhadas em azul, notável pelo salto abrupto na velocidade do vento solar V_{sw} de aproximadamente 300 km/s para 450 km/s, assim como, pelo aumento abrupto na densidade no vento solar N_p , observado em vários estágios dentro da bainha magnética. A densidade do vento solar passa de $5cm^{-3}$ para $35cm^{-3}$ nesse período. A chegada da estrutura magnética está indicada pela segunda linha pontilhada azul na Figura 6.13, ocorre às 06:24 UT do dia 13 de Outubro de 2016. A extensão da MC é representada pela região sombreada em rosa transparente. O comportamento do IMF, para este intervalo, é característico de uma nuvem magnética e coerente

com os valores encontrados no período para o parâmetro β de plasma apresentado no painel (h). A passagem da nuvem tem a componente Bz majoritariamente na direção Sul em toda passagem da MC, visível no painel (g). Observa-se que o repositivo do cinturão se intensifica no final da passagem da MC, período em que se observa intervalos de Bz para Norte. A recuperação da população do cinturão externo ocorre também durante a passagem da MC, sendo mais visível em L^* mais altos, especificamente no instante em que a estrutura magnética apresenta os menores valores para a componente Bz do IMF de aproximadamente $-20[nT]$ durante quase 12 horas subsequentes. Após atingir esse valor, a componente Bz apresenta tendências de rotacionar para valores positivos, que coincidem com o aumento do fluxo de elétrons relativísticos em $L^* < 5RE$ e diminuição em $L^* > 5RE$.

O primeiro intervalo, T1, na faixa transparente sombreada em verde, engloba toda a região da bainha magnética e parte da MC. Já a segunda faixa transparente sombreada em verde, que corresponde ao intervalo de interação com a MC, define o segundo período, T2. Durante a passagem da nuvem magnética, ocorrem variações significativas no fluxo de elétrons relativísticos, tanto de aumentos, quanto de diminuições. O que chama a atenção nesse estudo de caso, é que essas variações (aumentos e diminuições) ocorrem de maneira simultânea, porém em diferentes L^* . Este comportamento proporciona uma particular complexidade dos possíveis processos físicos envolvidos durante a interação entre a magnetosfera e a MC.

Figura 6.13 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: CASO YS.



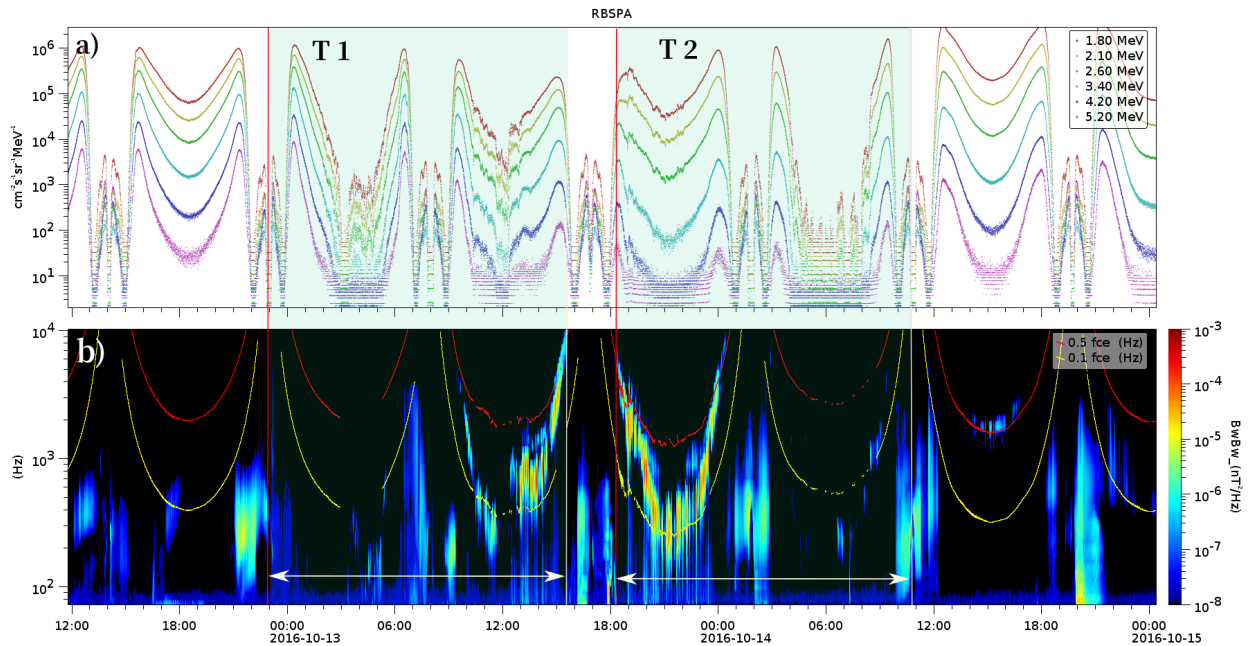
ICME, com MC C-YS, em 13 de Outubro de 2016. De cima para baixo: (a) 2.10 fluxo de elétrons omnidirecional medido pelo instrumento REPT a bordo do Van Allen Probes A, em função de L^* e tempo; (b) fluxo para cinco diferentes níveis de energia (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV), em $L^* = 5$; (c) velocidade do vento solar V_{sw} ; (d) densidade N_p ; (e) componentes do Campo Magnético Interplanetário (IMF) Bx_{gsm} (azul) e By_{gsm} (verde), em nT ; (f) módulo da amplitude da intensidade IMF B total em (preto), em nT ; (g) componente IMF Bz_{gsm} ; (h) Beta de plasma; e (i) index symmetric SYM_H . As linhas pontilhadas verticais azuis referem-se ao início das fases da tempestade geomagnética, que representam o choque da estrutura e o início do MC, respectivamente. Linhas verticais pontilhadas azuis separam as três diferentes regiões do evento, da esquerda para a direita: o vento solar, a bainha e a nuvem magnética. As duas regiões em verde claro, T1 e T2, correspondem ao período de interesse no estudo de ondas *Chorus* e variação de fluxo. A região vermelha clara corresponde ao período da passagem da MC, começando em 13 de outubro às 06:11 UT e terminando no dia 14 de outubro às 16:41 UT.

Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.14 retrata as variações no fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação e a atividade de ondas *Chorus* nos períodos de interesse, T1 e T2 do evento YS. Algumas das variações no fluxo de elétrons, nos intervalos T1 e T2 parecem ser abruptas e localizadas em L^* . A Diminuição de fluxo de elétrons no intervalo T1 é notável nas duas órbitas conforme mostrado no painel (a). O painel (b) revela um aumento na densidade média nas frequências associadas às ondas *Chorus* do modo *Whistler* de banda baixa para ambos intervalos T1 e T2.

Observa-se ainda um aumento na densidade espectral na região T2, período referente à passagem da MC. Esse período é identificado com atividade de ondas *Chorus* de banda baixa, concentrada na primeira órbita do período T2. Contudo, é importante destacar que maior depleção durante T2 coincide com baixa atividade de ondas *Chorus*, principalmente de baixa potência.

Figura 6.14 - Atividade de ondas *Chorus* e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos:
CASO YS.

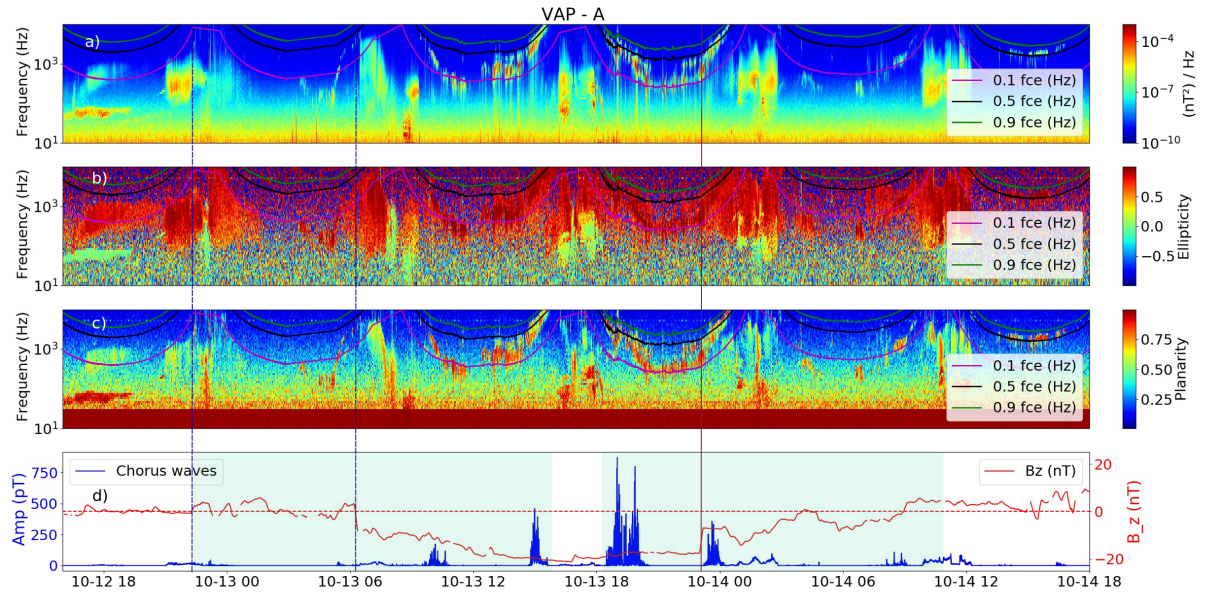


Fluxo de elétrons relativísticos e assinaturas de ondas *Chorus* no modo *Whistler*, CASO YS. De cima para baixo: a) fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação durante o intervalo de 12 a 16 de Outubro de 2016, para cinco níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV; 4,2 MeV e 5,2 MeV), utilizando os dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen A; b) potência espectral do campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen Probes A, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo $y(Hz)$, a frequência, em função do tempo. A linha na cor amarela representa os valores de $0,1 fce(Hz)$ e a linha em vermelho, $0,5 fce(Hz)$.

Fonte: Produção autoral.

Na Figura 6.15, observa-se a presença de ondas *Chorus* em banda baixa e banda alta, conforme pode ser visto no painel (a). A amplitude dessas ondas, linha azul no painel (d), aumenta significativamente dentro da MC, indicando uma maior intensidade de atividade de ondas *Chorus* nessa região. Além disso, nota-se que as assinaturas e as maiores intensidades dessas atividades de ondas *Chorus* estão mais pronunciadas durante valores negativos da componente B_z do IMF.

Figura 6.15 - Atividade de ondas *Chorus* no modo *Whistler* Versus IMF Bz: **CASO YS**.



Amplitude e características das ondas *Chorus* no modo *Whistler*, **CASO YS**. De cima para baixo: (a) Espectrograma de campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda *Van Allen Probes A*, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de $0,1f_{ce}$, a linha preta, $0,5 f_{ce}$, e a linha verde, $0,9 f_{ce}$; (b) Elipticidade; (c) Planaridade; (d) Amplitude do campo magnético na faixa de frequência das ondas *Chorus* é representada pela linha azul, em [pT], com dados da sonda Van Allen A e aplicando-se filtro de identificação segundo Ni et al. (2020). A linha vermelha apresenta os valores do Campo Magnético Interplanetário (IMF) no sistema de coordenadas GSM para a componente Bz, em [nT], obtido pelo satélite ACE.

Fonte: Produção autoral.

Na Figura 6.16 e, na Figura 6.17, apresentam fluxo de elétrons, potência espectral do campo magnético, WNA e a relação entre W_{pe}/W_{ce} . As demarcações dos curtos períodos de tempo T1a, T1b, T1c, na Figura 6.16, e T2a, T2b, T2c, na Figura 6.17, são também apresentadas para realizar as análises das principais características da ondas *Chorus* durante as variabilidades fluxo de elétrons. A primeira região de estudo para o caso YS refere-se ao intervalo T1, em que o instante do choque interplanetário é marcado pela linha sólida vertical vermelha. No painel (a) é possível observar uma acentuada diminuição no fluxo de elétrons por volta das 03:00 UT do dia 12 de outubro. O *dropout* ocorre na região da bainha magnética da nuvem, afetando todos

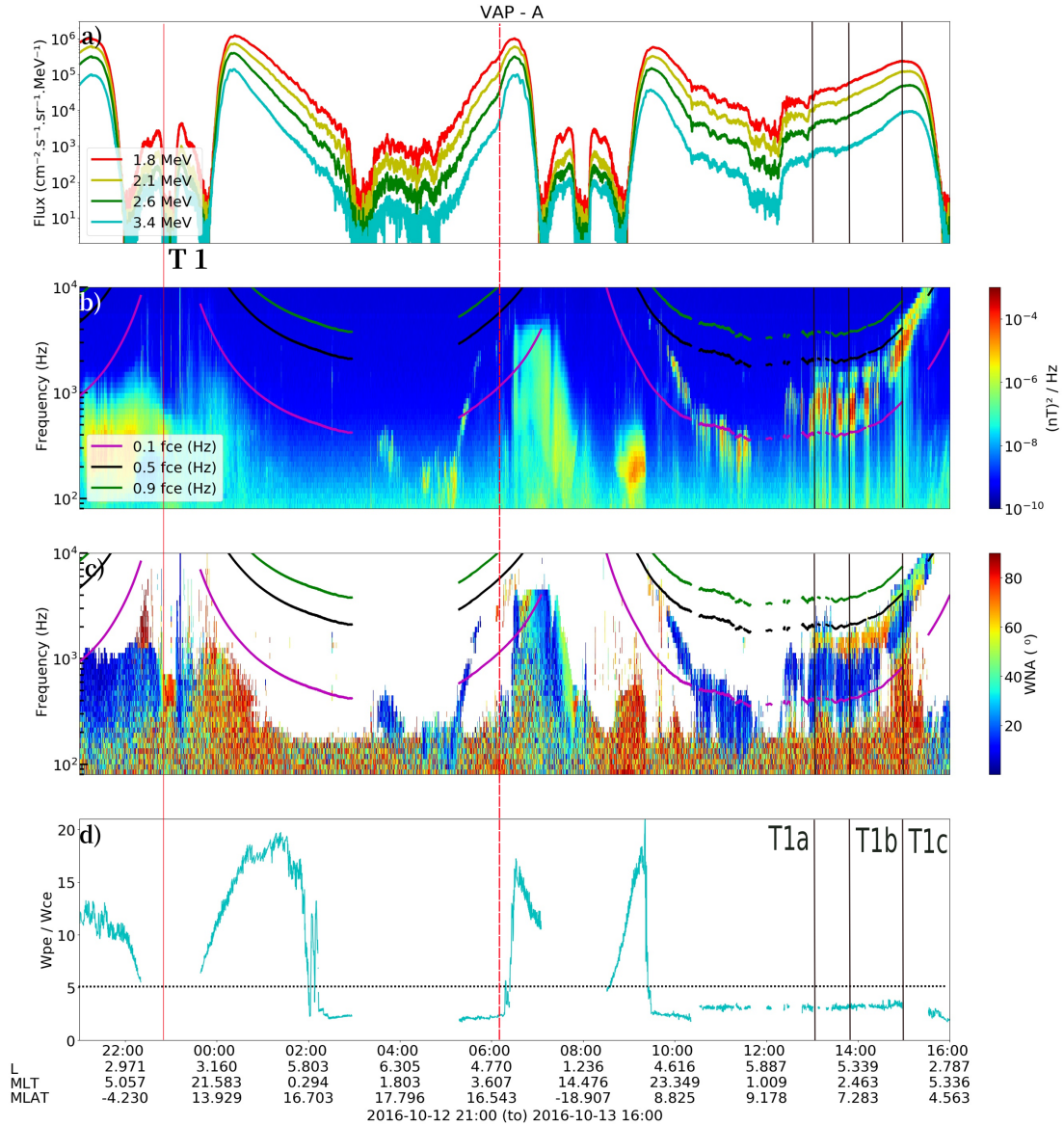
os canais de energia entre 1,8 e 3,4 MeV. A atividade das ondas *Chorus*, conforme mostrado no painel (b), apresenta assinaturas nas bandas baixa e alta, além de valores de WNA considerados como paralelos.

Entretanto, é importante destacar que, momentos antes do *dropout*, foram identificadas assinaturas de curta duração na faixa de frequência das ondas *Chorus* em banda baixa, com valores de WNA considerados oblíquos, ou seja, ângulos altos ($30^\circ - 80^\circ$). Além disso, a relação (W_{pe}/W_{ce}), que avalia a interação entre elétrons e ondas *Chorus*, apresenta valores inferiores a 5, indicando um maior potencial para essa interação entre *Chorus* e elétrons nessa região.

Pouco antes da chegada da MC, observa-se um aumento gradual na faixa de frequência das ondas *Chorus*, acompanhado por uma intensificação da atividade painel (b). Mesmo assim, as assinaturas das ondas *Chorus* permanecem na banda baixa, com ângulos normais baixos ($0^\circ - 30^\circ$). Esse comportamento na atividade ondas *Chorus* permanece até o instante do início da interação entre a MC e a magnetosfera, que é indicado pela segunda linha vertical pontilhada vermelha. Os valores de WNA indicam atividade quase paralela e oblíqua com ângulos altos ($30^\circ - 80^\circ$) para as regiões onde as ondas *Chorus* estão ativas. A relação (W_{pe}/W_{ce}) apresenta valores baixos no primeiro contato com a MC.

Dentro da MC, as intensidades das atividades de ondas *Chorus* tornam-se mais pronunciadas, e as assinaturas abrangem tanto a banda baixa quanto a banda alta, variando os ângulos normais entre ($0^\circ - 30^\circ$) e ($30^\circ - 80^\circ$). Nessas atividades de ondas *Chorus*, a competição torna-se evidente nas regiões onde o espectrograma indica maiores intensidades. A relação (W_{pe}/W_{ce}) permanece abaixo de 5 sugerindo grande eficiência de ressonância em poucas horas entre ondas *Chorus* e elétrons relativísticos. Os instantes T1a, T1b e T1c, marcados pelas linhas verticais pretas, indicam os períodos em que atividades de *Bursts* foram identificadas e selecionadas para estudos mais detalhados.

Figura 6.16 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO YS - T1.



Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO YS - T1. De cima para baixo: (a) fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen A; (b) espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1fce (Hz), a linha preta, 0,5 fce (Hz), e a linha verde, 0,9 fce (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^{\circ}$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (W_{pe}/W_{ce}).

Fonte: Produção autoral.

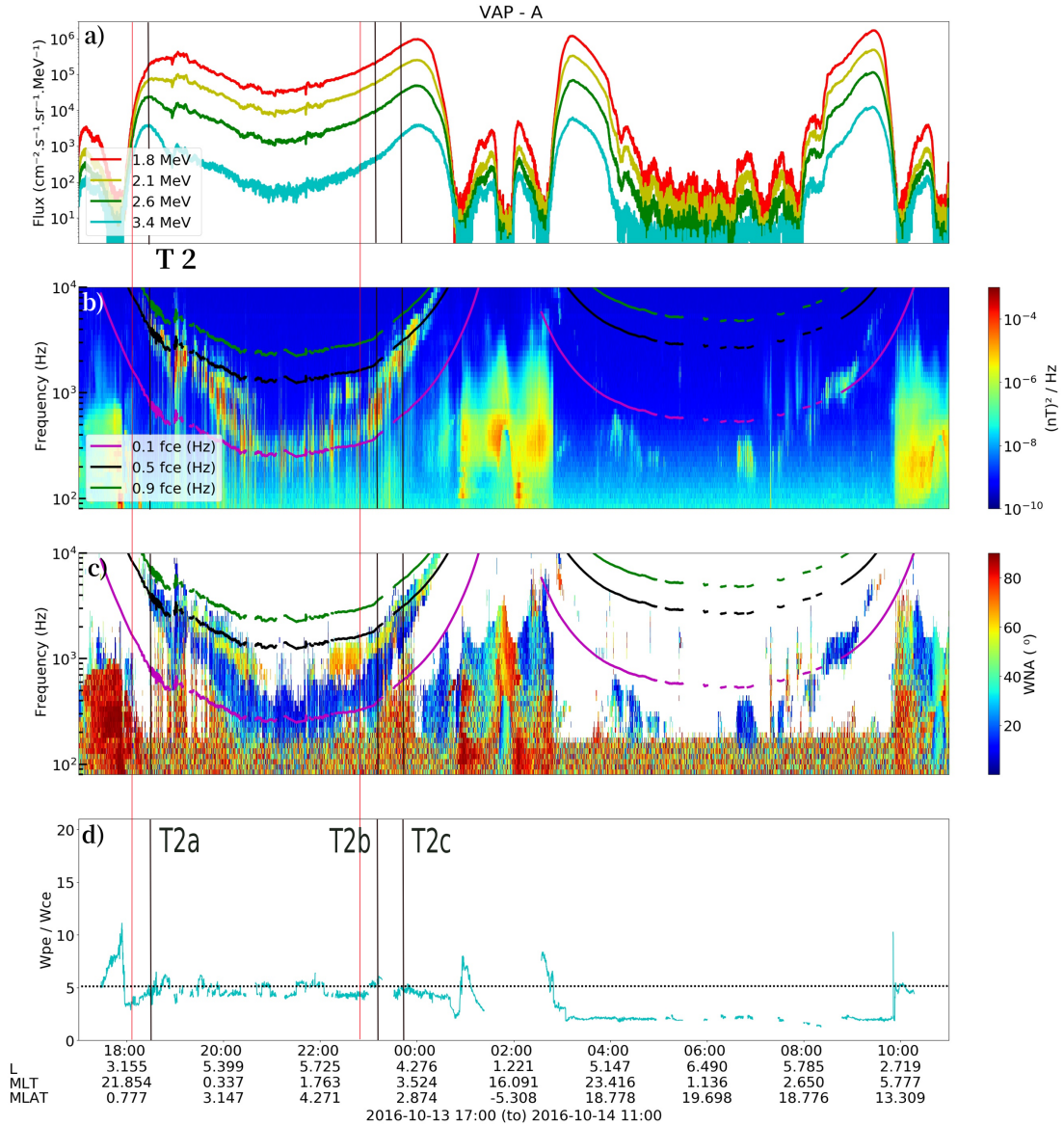
Na Figura 6.17, a primeira linha sólida vermelha indica o início da região de estudo T2. A segunda linha sólida vertical vermelha indica o instante dentro da MC, em que a componente Bz apresenta o início da sua rotação para valores positivos, caracterizando o centro da MC.

As assinaturas das ondas *Chorus* que apresentam maior densidade no espectro de campo magnético têm uma maior predominância em banda baixa, com ângulos normais baixos ($0^\circ - 30^\circ$). Durante esse período, os valores do WNA indicam atividade quase paralela e oblíqua com ângulos altos ($30^\circ - 80^\circ$) para as regiões onde as ondas *Chorus* estão ativas.

Dentro da MC, as intensidades das atividades de ondas *Chorus* são mais presentes na primeira órbita apresentada na Figura 6.17. As assinaturas abrangem tanto a banda baixa quanto a banda alta. Os ângulos normais variam entre baixos ($0^\circ - 30^\circ$) e altos ($30^\circ - 80^\circ$). Essa região concentra um longo período em que a componente Bz está em situação Sul. A relação (Wpe/Wce), observada no painel (d) permanece abaixo de 5 para os períodos de atividades. A relação (Wpe/Wce) cai ainda mais para segunda órbita, em que as atividades de ondas *Chorus* são mais pontuais e espaçadas, apresentando apenas atividades em banda baixa. Esta segunda órbita apresenta indícios de perdas e acelerações localizadas, uma vez que o fluxo de elétrons é marcado pela alta flutuabilidade observado no painel (a). Assinaturas de curta duração na faixa de frequência das ondas *Chorus* em banda baixa, com valores de WNA considerados oblíquos, ou seja, ângulos altos ($30^\circ - 80^\circ$) foram identificados. Os instantes selecionados para identificação de *Bursts* estão marcados pelas linhas verticais pretas.

A primeira linha sólida vermelha, na Figura 6.17, marca o início da região de estudo T2. A segunda linha sólida vertical vermelha indica o centro da MC, em que a componente Bz do IMF começa a mostrar um aumento gradual. Isso ocorre predominantemente na primeira órbita da Sonda Van Allen A. As intensidades das atividades de ondas *Chorus* são mais acentuadas na primeira órbita, conforme mostrado na Figura 6.17, abrangendo tanto a banda baixa quanto a banda alta. Os ângulos normais variam de baixos ($0^\circ - 30^\circ$) a altos ($30^\circ - 80^\circ$). Essa região concentra um longo período em que a componente Bz está orientada para o Sul.

Figura 6.17 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO YS - T2.



Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO YS - T2. De cima para baixo: (a) O fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen A; (b) Espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1fce (Hz), a linha preta, 0,5 fce (Hz), e a linha verde, 0,9 fce (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^{\circ}$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (W_{pe}/W_{ce}).

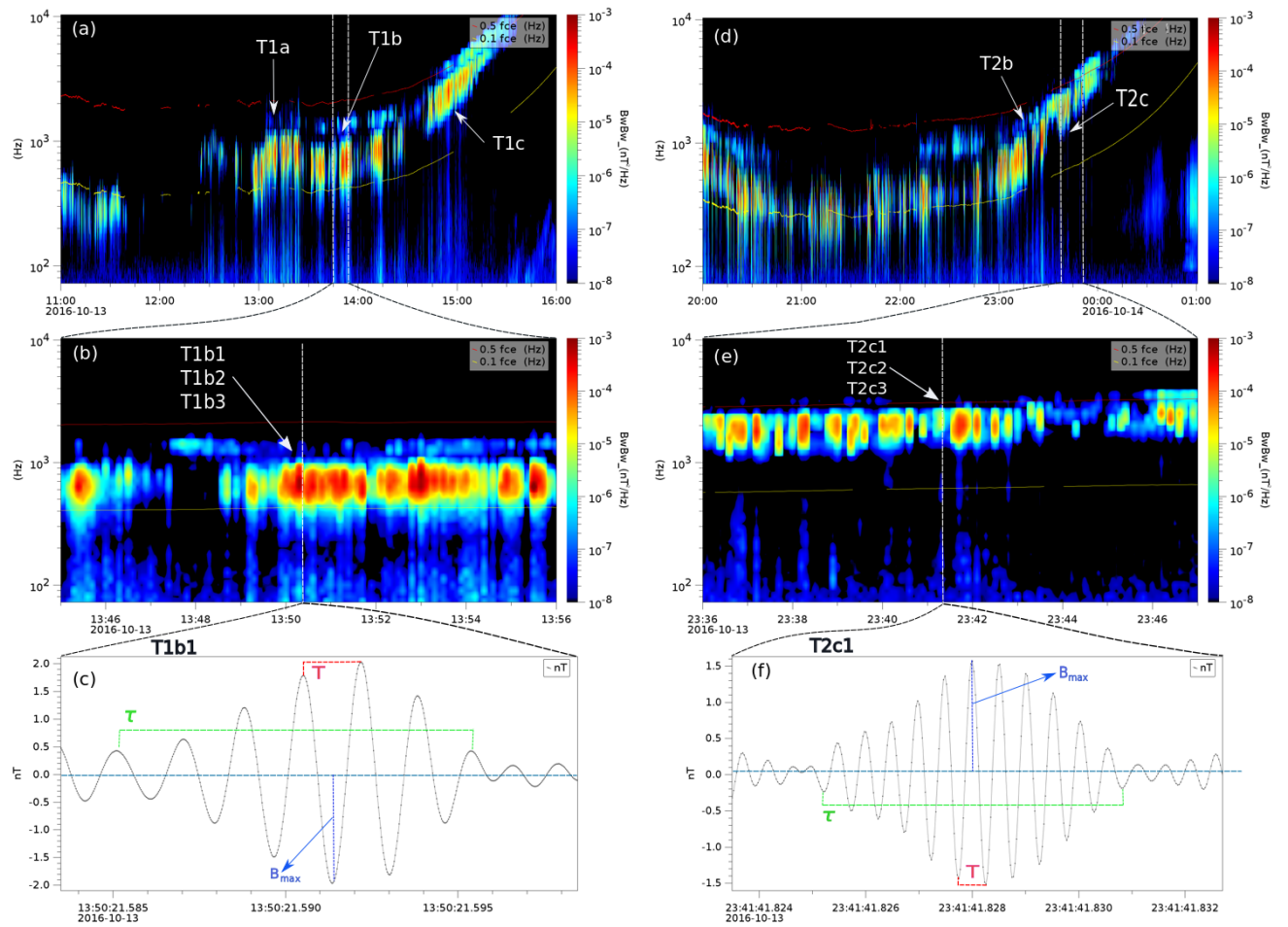
Fonte: Produção autoral.

Pode-se observar que, nas regiões em que o espectrograma indica maiores intensidades, a relação (Wpe/Wce), apresentada no painel (d), permanece abaixo de 5. A relação (Wpe/Wce) diminui ainda mais na segunda órbita e as atividades de ondas *Chorus* são mais pontuais e espaçadas, apresentando apenas atividades em banda baixa. Essa segunda órbita exibe claramente sinais de perdas e acelerações localizadas devido às flutuações acentuadas observadas no fluxo de elétrons relativísticos do painel (a). Foram identificadas assinaturas de curta duração na faixa de frequência das ondas *Chorus* em banda baixa, com valores de WNA considerados oblíquos, ou seja, ângulos altos ($30^\circ - 80^\circ$). Além disso, a relação (Wpe/Wce) apresenta valores inferiores a 5. Os instantes selecionados para identificação de *Bursts* estão marcados pelas linhas verticais pretas.

A Figura 6.18 apresenta o espectro de potência do campo magnético, os subelementos e os pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO YS - T1 e T2. Os painéis seguem a mesma distribuição previamente descrita na Figura 6.6, porém para a sonda Van Allen A, neste estudo de caso. Nos painéis (a), (b), (d) e (e), observam-se espectros de potência do campo magnético em que as maiores densidades espectrais observadas referem-se às atividades das ondas *Chorus* de banda baixa ($0,1 - 0,5fce$), na maior parte do tempo em ambas as órbitas. Contudo, vale salientar que também foram observada assinaturas discretas em banda alta ($0,5 - 0,9fce$) ao final da órbita em ambos os gráficos, após as 14:45 do dia 13 (painel (a)) e após as 23:30 do dia 13 (painel (d)), respectivamente. Nos painéis (b) e (e), as densidades do espectro de potência do campo magnético apresentam picos pontuais e espaçados, características fortes da atividade de *Bursts* nessas regiões.

Como mencionado anteriormente, as assinaturas das ondas *Chorus* nesse momento são notáveis. Vários subelementos de ondas *Chorus* foram detectados nesse curto intervalo de tempo, mas apenas um exemplo de *Bursts* para este período é mostrado em cada intervalo de estudo. Os subelementos *Chorus* selecionados nos painéis (c) e (f) apresentaram amplitude máxima do campo magnético da onda central ($B_{max} \sim 2,02nT$) e ($B_{max} \sim 1,6nT$), respectivamente, durante os intervalos T1b1 e T2c1. Essas representações gráficas ilustram os maiores valores encontrados para os pacotes selecionados em T1 e T2. Ambas as regiões analisadas mostraram alta concentração de *Bursts* ao longo de todo o período, assim vários outros parâmetros que caracterizam os *Bursts* são apresentados na Tabela 6.4 para facilitar as discussões acerca das potencialidades destas ondas *Chorus* em interagir com os elétrons relativísticos aprisionados no cinturão externo de Van Allen.

Figura 6.18 - Subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* CASO YS - T1 e T2.



Subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO YS. De cima para baixo: (a) e (d) representando espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y é a frequência em (Hz) , em função do tempo, medida pelo instrumento EMFISIS-(MAG) a bordo da sonda *Van Allen Probes A*; as barras paralelas e horizontais indicam o zoom no tempo usado em (b) e (e) respectivamente para o mesmo parâmetro. A linhas pontilhada no gráfico (b) e (e) ilustram um novo *Zoom* no tempo para a região em que o instrumento EMFISIS-(EVW) capta a variação no campo magnético local em alta resolução, de alta resolução, expresso em $[nT]$. Os parâmetros das ondas: τ e T referem-se aos períodos respectivos do envelope de onda e do ciclo de onda do subelemento central. B_{max} é o valor instantâneo máximo da amplitude da onda do subelemento central.

Fonte: Produção autoral.

A Tabela 6.4 apresenta os parâmetros coletados pela sonda *Van Allen A*, nos in-

intervalos de interesse T1 e T2, durante o estudo de caso YS. No intervalo T1, foram selecionados três intervalos de tempo próximos em 13 de outubro de 2016, às 13:09:54.56 UT, 13:50:21.58 UT e 14:59:06.25 UT. Os valores da razão W_{pe}/W_{ce} para T1 apresentam-se abaixo de 3,22, o que é favorável para a interação entre as ondas *Chorus* e as partículas na região (AGAPITOV et al., 2013; TANG et al., 2017; WANG, 2023). Seus pacotes de ondas apresentaram ciclos variáveis, se estendendo entre 4 e 11 ciclos. As amplitudes de pico, B , mostraram-se elevadas em todos os elementos, variando entre 0,92 e 2,02 (nT). Os *Bursts* T1b1 e T1b3 apresentaram valores para a razão B/B_o maiores que 1%, indicando que mecanismos não lineares podem ter atuado nesses intervalos. A interação entre os subelementos das ondas *Chorus* e os elétrons relativísticos foi significativa, uma vez que o ângulo $\Delta\alpha T$ atingiu $27,52^\circ$, e o ângulo $\Delta\alpha\tau$ 90° . Comportamento similar a respeito dos ângulos $\Delta\alpha T$ e $\Delta\alpha\tau$ também foram observados no intervalo T2.

Alguns subelementos apresentaram baixos valores em suas frequências de onda ω (Hz) como 623 (nT) em T1b3 e 792 (nT) em T2b1. Por outro lado em T1c2, esses valores chegaram a 2,88 kHz e 2,04 kHz em T2c2. No intervalo T2, as amplitudes B em média, foram menores do que no intervalo T1, mas ainda assim bastante elevadas. A maior amplitude foi observada no elemento T2c1, onde B atingiu o valor de 1,6 (nT). O intervalo T2 abrange um período mais espaçado no tempo, ainda dentro do dia 13 de outubro de 2016. Os valores calculados para a razão W_{pe}/W_{ce} ficaram em torno de 5 propícios para interação ressonante entre as atividades de ondas *Chorus* e elétrons na região (HORNE et al., 2003; AGAPITOV et al., 2019; WANG, 2023).

Tabela 6.4 - Parâmetros e cálculo de ($\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso YS.

DATA	T1-T2	τ (ms)	B (nT)	B_o (nT)	ω (Hz)	W_{pe}/W_{ce}	Δt_τ (ms)	$\Delta\alpha_\tau$ ($^\circ$)	$\Delta\alpha_T$ ($^\circ$)
13/10/16	T1a								
13:09:54.56	T1a1	8,16	0,92	149	790	3,04	34,04	69,79	11,02
13:09:54.61	T1a2	7,47	1,1	149	790	3,04	31,21	76,39	11,96
13:09:54.62	T1a3	8,2	1,3	149	790	3,04	34,21	90	13,54
13/10/16	T1b								
13:50:21.58	T1b1	10,41	2,02	154	631	3,22	37,44	90	27,52
13:50:21.90	T1b2	10,28	1,07	153	640	3,10	37,43	89,24	12,59
13:50:22.51	T1b3	4,21	1,55	153	623	3,1	15,08	52,08	16,58
13/10/16	T1c								
14:59:06.25	T1c1	8	1,2	430	2800	2,68	37,1	90	4,59
14:59:06.31	T1c2	5,89	1,46	430	2880	2,68	27,31	88,85	6,34
14:59:06.32	T1c3	3,7	1,31	430	2810	3,1	17,19	50,17	4,88

13/10/16	T2a								
18:30:55.47	T2a1	8	0,94	258	4490	5,2	53,12	90	2,92
18:20:28.09	T2a2	3,63	1,06	258	4400	5,2	23,98	24,04	1,46
18:20:28.10	T2a3	7,87	1,06	258	4430	5,2	52,08	90	2,92
13/10/16	T2b								
23:12:03.42	T2b1	9,46	1,28	143	792	5,5	40,41	90	14,13
23:12:04.41	T2b2	6,41	0,59	143	802	5,5	27,56	36,23	6,44
23:12:04.62	T2b3	11,6	0,62	141	802	5,5	49,87	68,87	7,6
13/10/16	T1c								
23:41:42.00	T2c1	6,16	1,6	220	2010	4,9	33,19	90	9,6
23:41:42.10	T2c2	3,8	0,98	220	2040	4,9	20,6	44,98	4,97
23:41:41.82	T2c3	8,41	0,72	220	2010	4,9	45,32	72,7	4,58

Tabela apresentando os principais parâmetros para os cálculos de *pitch-angle* e tempo de interação através de *Bursts* gerados por ondas *Chorus* para o estudo de **CASO YS**. Calculados por meio das equações 5.9 e 5.8, assumem aproximações de primeira ordem para o nível de energia de 1,8 MeV.

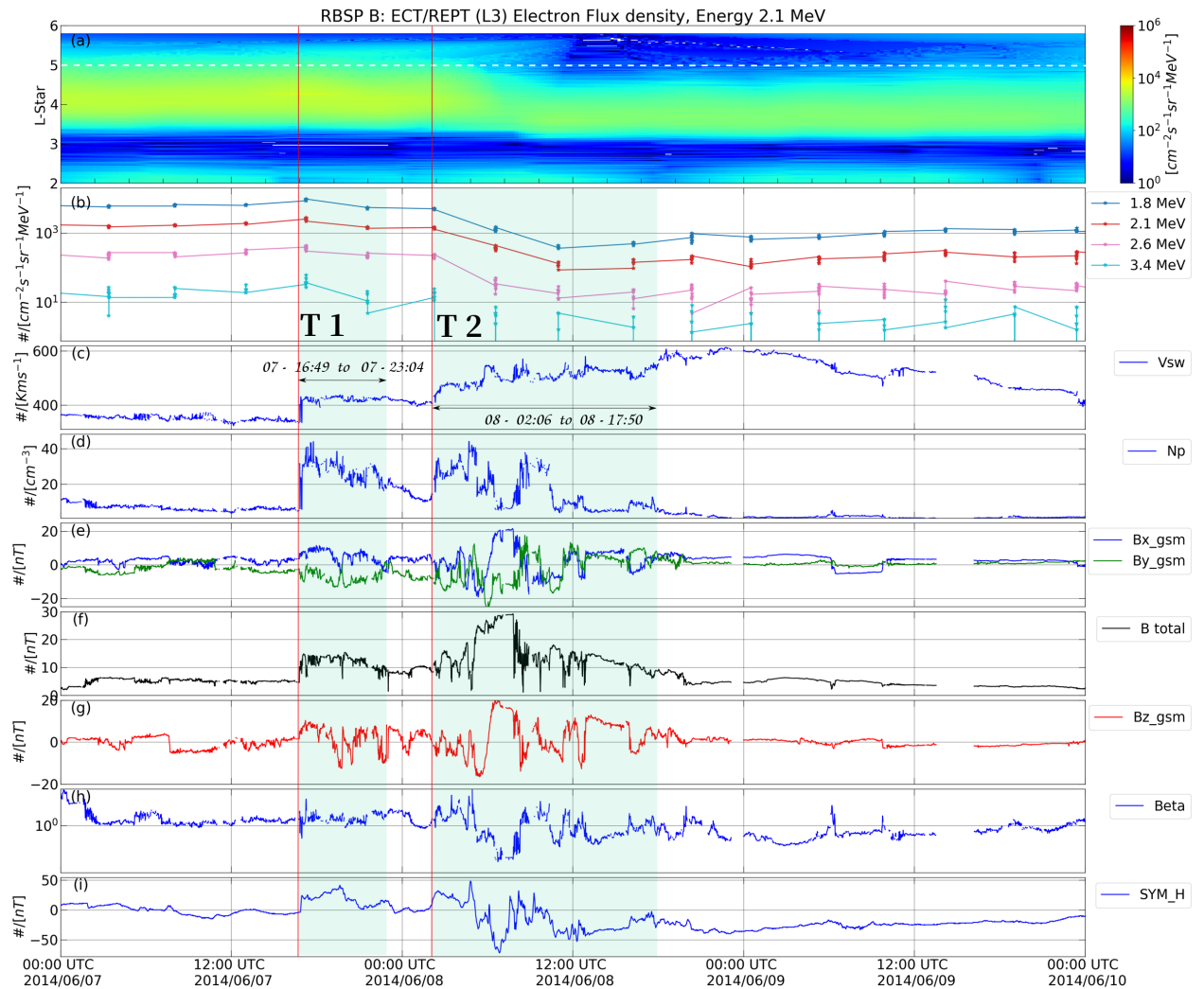
Fonte: Produção autoral.

6.4 CASO sem MC: ICME sem nuvem magnética

A Figura 6.19 apresenta os dados do fluxo de elétrons relativísticos e do meio interplanetário para o estudo de caso do evento que ocorreu de 7 a 9 de Junho de 2014, referente a uma ICME, a qual não foi detectada rotação nas componentes do IMF, a chegada da frente de choque, observada às 16:49 UT do dia 7 de Junho, é indicada pela primeira linha sólida vertical vermelha, em que, ocorre simultaneamente um salto abrupto na velocidade do vento solar V_{sw} e na densidade no vento solar Np , conforme indicado nos painéis (c) e (d). Logo após esse choque a velocidade V_{sw} mantém-se constante em $\sim 420 km/s$ e a densidade diminui gradativamente até alcançar valores perto de $15 cm^{-3}$. Em seguida, pode-se observar um segundo choque, sinalizado na Figura 6.19 pela segunda linha sólida vermelha 2:06 UT do dia 8 de Julho de 2014. O comportamento do IMF, para este intervalo, apresenta forte variabilidade (painéis (e) e (g)). O parâmetro β de plasma mostrado no painel (h) não apresenta características de MC. As flutuações na componente Bz (painel (g)) apresentam variações entre $-20[nT]$ para $20[nT]$ simultaneamente a maior diminuição de densidade populacional de elétrons no nível 2.1 MeV no cinturão externo (painel (a)), assim como para os níveis entre 1,8 MeV e 3,4 MeV, especificamente em $L^* = 5RE$ (painel (b)).

A leve diminuição no fluxo de elétrons relativísticos observada após o primeiro choque, é intensificada após o segundo choque. Contudo, é importante destacar que este evento apresenta uma densidade de partículas consideravelmente baixa, quando comparada aos outros eventos desta tese. A região delimitada pela faixa transparente sombreada em verde, que tem início no primeiro Choque, refere-se ao primeiro intervalo, T1. A segunda faixa transparente sombreada em verde, que tem início no segundo choque, define o segundo período, T2.

Figura 6.19 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: **CASO Sem MC**.

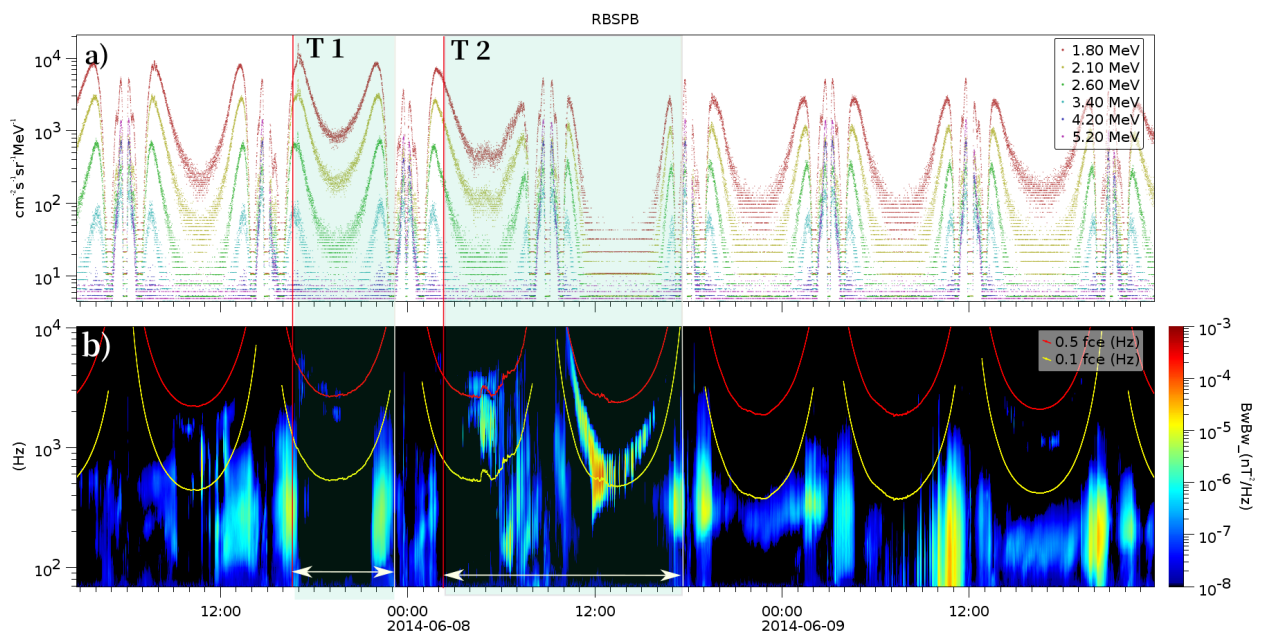


ICME sem nuvem magnética, em 7 de Junho de 2014. De cima para baixo: (a) fluxo de elétrons relativístico para a faixa de energia de 2.1 MeV medido pelo instrumento REPT a bordo do Van Allen Probes B, cujo mapa de cores representa o fluxo integrado dado em $[cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}MeV^{-1}]$ em função de L^* dado em (Re); (b) fluxo para cinco diferentes níveis de energia (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV), em $L^* = 5$; (c) velocidade do vento solar V_{sw} , em $[Km/s]$; (d) densidade N_p , em $[cm^{-3}]$; (e) componentes do Campo Magnético Interplanetário (IMF) Bx_{gsm} (azul) e By_{gsm} (verde), em $[nT]$; (f) módulo da amplitude da intensidade IMF B total em (preto), em $[nT]$; (g) componente IMF Bz_{gsm} ; (h) Beta de plasma e (i) index symmetric SYM_H . As linhas pontilhadas verticais azuis referem-se ao tempo de início das fases da tempestade geomagnética, que representam o choque da estrutura e o início do MC, respectivamente. As duas regiões em verde claro, nos períodos T1 e T2, entre 16:49 UT e 23:04 do dia 7 de Junho, e entre as 02:06 UT e 17:50 UT do dia 8 de Junho, correspondem ao período de interesse no estudo das ondas e variações de fluxo.

Fonte: Produção autoral.

As variações no fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação são apresentadas na Figura 6.20. No painel (a), observa-se um leve aumento em todos os níveis de energia durante o intervalo T1. Por outro lado, durante o intervalo T2 observa-se forte diminuição de fluxo de elétrons, principalmente na segunda órbita deste intervalo. Durante o período T1, uma atividade discreta de ondas *Chorus* é identificada, com assinaturas em banda baixa e banda alta, ocorrendo por um curto intervalo de tempo. No entanto, as regiões com picos na densidade espectral das ondas *Chorus* são coincidentes com a forte diminuição de fluxo de elétrons durante T2, sugerindo que estas ondas podem ter contribuído com perda localizada através do mecanismo de espalhamento por *pitch angle*.

Figura 6.20 - Atividade de ondas *Chorus* e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos: **CASO Sem MC.**

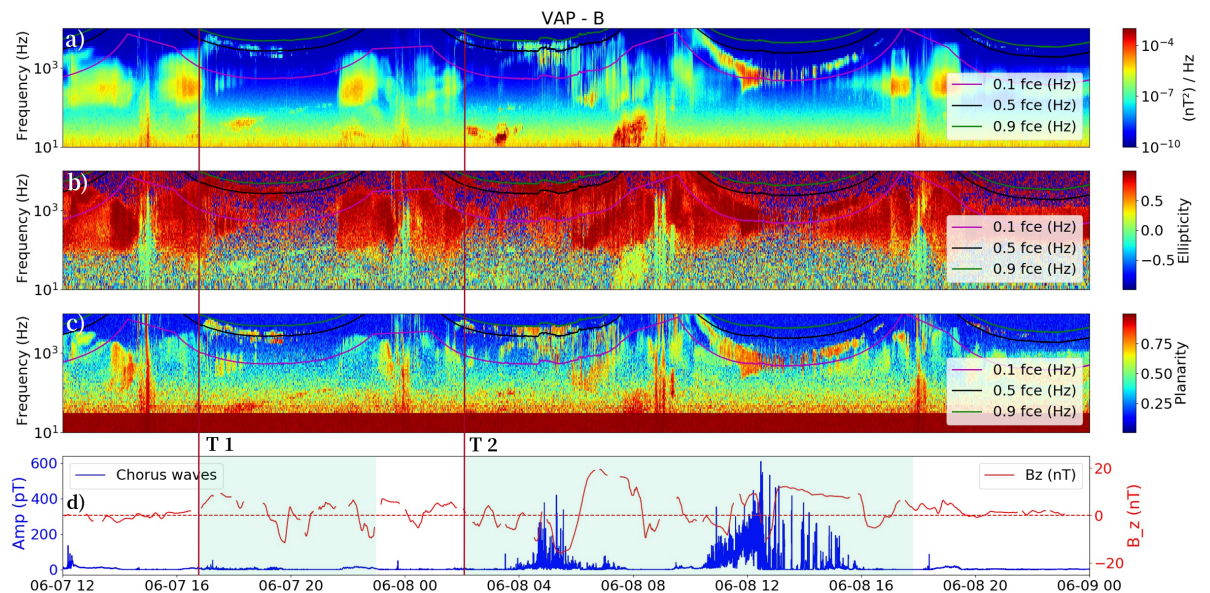


Fluxo de elétrons relativísticos e assinaturas de ondas *Chorus* no modo *Whistler*, sem MC. De cima para baixo: a) fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação durante o intervalo de 12 a 14 de novembro de 2012, para cinco níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV; 4,2 MeV e 5,2 MeV), utilizando os dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen B; b) potência espectral do campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen Probes B, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo $y(Hz)$, a frequência, em função do tempo. A linha na cor amarela representa os valores de $0,1 f_{ce}(Hz)$ e a linha em vermelho, $0,5 f_{ce}(Hz)$.

Fonte: Produção autoral.

Na Figura 6.21, pode-se observar a atividade de ondas *Chorus* tanto em banda baixa quanto em banda alta no intervalo T1. No entanto, durante esse período, as amplitudes dessas ondas não atingem valores elevados. O intervalo T2 apresenta amplitudes significativamente altas, assim como, atividade de ondas *Chorus* em ambas as bandas e frequências para a primeira órbita, e apenas frequências de banda baixa na segunda órbita. É notável que as maiores amplitudes, linha azul no painel (d), são observadas em banda baixa, coincidentes com a diminuição de fluxo de elétrons em T2 e componente Bz do IMF negativa.

Figura 6.21 - Atividade de ondas *Chorus* no modo *Whistler* Versus IMF Bz: CASO Sem MC.



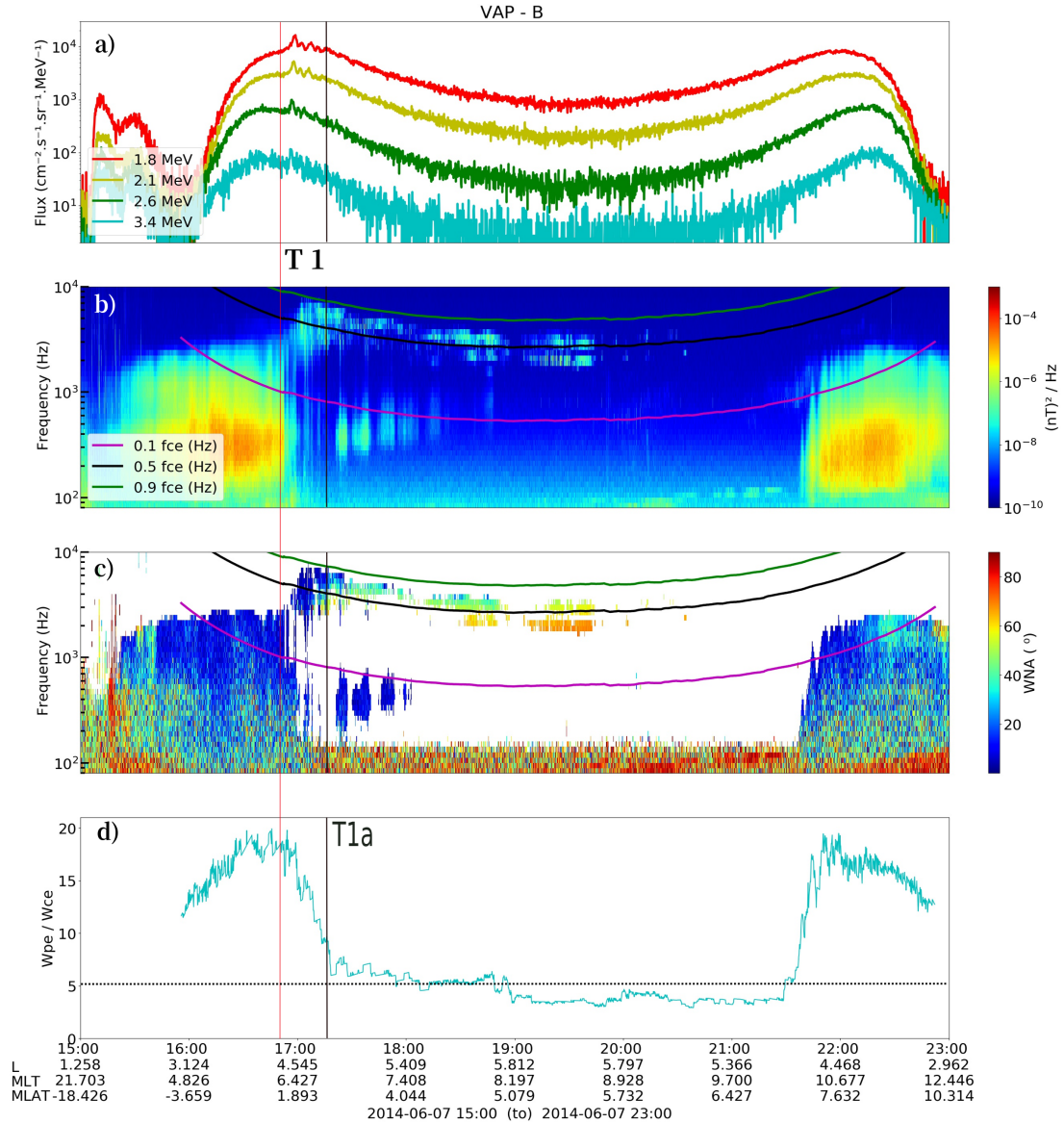
Amplitude e características das ondas *Chorus* no modo *Whistler*, sem MC. De cima para baixo: (a) Espectrograma de campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda *Van Allen Probes A*, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz) , a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de $0,1f_{ce}$, a linha preta, $0,5 f_{ce}$, e a linha verde, $0,9 f_{ce}$; (b) Elipticidade; (c) Planaridade; (d) Amplitude do campo magnético na faixa de frequência das ondas *Chorus* é representada pela linha azul, em pT, com dados da sonda *Van Allen A* e aplicando-se filtro de identificação segundo Ni et al. (2020). A linha vermelha apresenta os valores da componente Bz, em nT, do Campo Magnético Interplanetário (IMF), no sistema de coordenadas GSM, obtido pelo satélite ACE.

Fonte: Produção autoral.

Na Figura 6.22, é apresentada uma órbita completa da sonda Van Allen B, que corresponde à região de estudo para o caso sem MC, referente ao intervalo T1. Nesse intervalo, pode-se observar atividade das ondas *Chorus* em ambas as bandas, tanto na banda baixa quanto na banda alta. A região destacada por flutuações locais no fluxo de elétrons relativísticos afeta todos os canais de energia entre 1,8 e 3,4 MeV, como mostrado no painel (a). Essas flutuações ocorrem logo no início da órbita da sonda e coincidem com o início do choque interplanetário, conforme indicado pela linha vertical sólida vermelha.

Nesse momento inicial, as assinaturas das ondas *Chorus* são consideradas paralelas ao campo magnético local, WNA baixos, painel (c). Além disso, a relação (W_{pe}/W_{ce}) aponta valores elevados até o momento em que a atividade de ondas *Chorus* começam a mostrar ângulos mais altos, variando entre ($30^\circ - 80^\circ$). Posteriormente, a relação cai para valores em torno de 6, sugerindo possibilidade de forte interação, porém não se observa grandes variabilidades no fluxo de elétrons nesse período marcado a partir da linha vertical preta T1a. É interessante notar que existe uma variação entre as bandas alta e baixa durante esse período, além de uma baixa ocorrência de atividades de *Bursts*, o que dificultou a seleção desses eventos para o estudo.

Figura 6.22 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO sem MC - T1.



Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO Sem MC - T1. De cima para baixo: (a) O fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen A; (b) Espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1fce (Hz), a linha preta, 0,5 fce (Hz), e a linha verde, 0,9 fce (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^\circ$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (W_{pe}/W_{ce}).

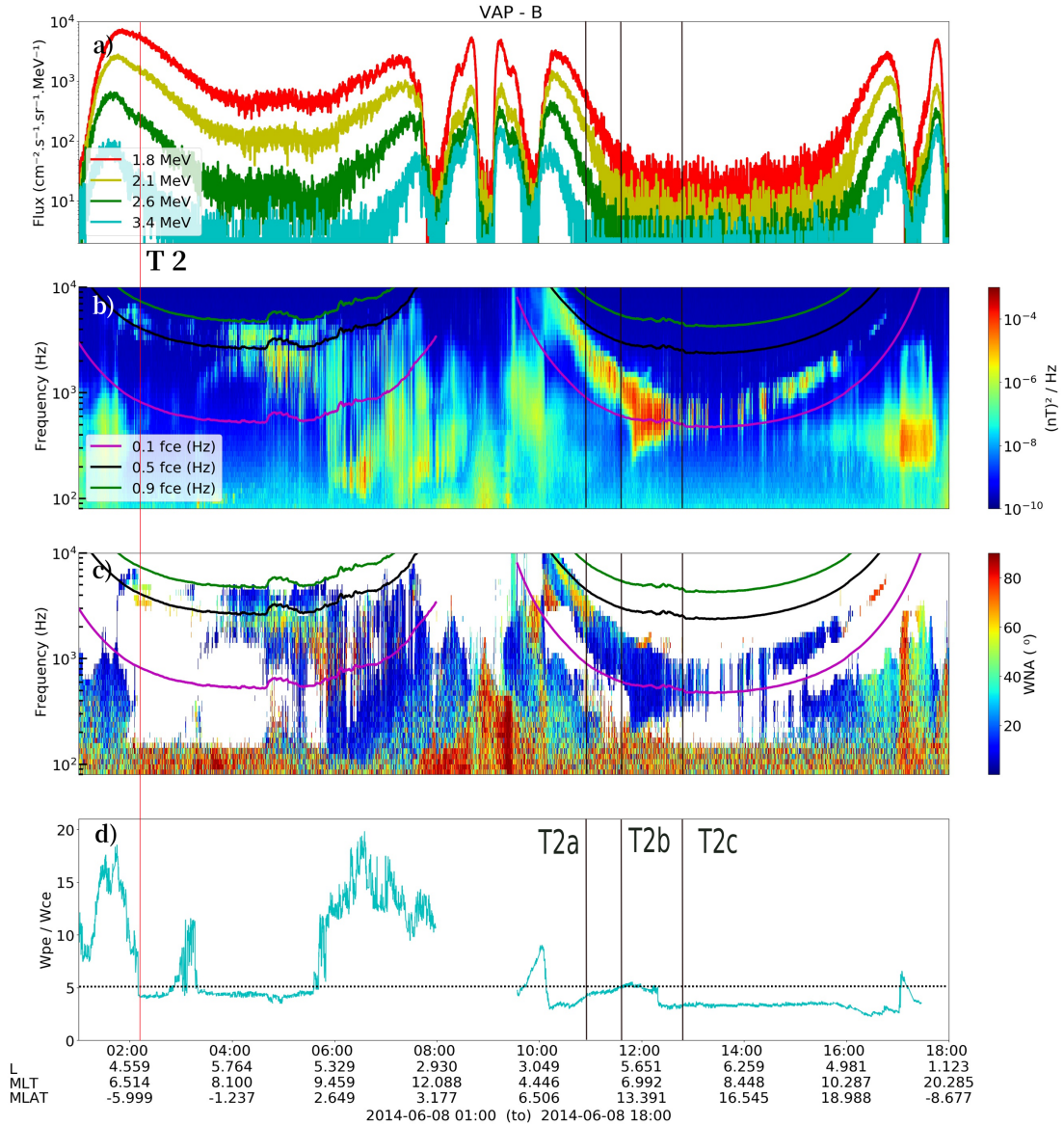
Fonte: Produção autoral.

Na Figura 6.23, a análise concentrou-se no intervalo T2. Durante esse período, a atividade das ondas *Chorus* se destaca de maneira notável, atingindo níveis significativamente elevados na densidade do espectrograma do campo magnético, painel (b). A Figura abrange integralmente duas órbitas da sonda Van Allen B. Na primeira órbita, observa-se atividade das ondas *Chorus* abrangendo bandas altas (0,5-0,9) e as bandas baixas (0,1-0,5), enquanto isso, na segunda órbita, as assinaturas estão predominantemente associadas às ondas de banda baixa.

Um ponto de destaque é a redução no fluxo de elétrons relativísticos em todos os canais de energia simultâneo a atividade de ondas *chorus*, principalmente na segunda órbita, conforme evidenciado no painel (a). As características das ondas *Chorus* nesse período T2 apresentam-se tanto em configurações paralelas quanto oblíquas ao campo magnético local, como visto no painel (c). A atividade de ondas em banda baixa é mais intensa quando comparadas às ondas *Chorus* de banda alta da primeira órbita.

Além disso, a relação (W_{pe}/W_{ce}) sugere valores predominantemente baixos durante todo o intervalo T2, sugerindo a ocorrência do mecanismo de espalhamento por *pitch angle* dirigido por ondas *Chorus* no início da segunda órbita, uma vez que estas ondas são oblíquas. Regiões com valores elevados dessa relação são visíveis durante a fase descendente da primeira órbita. No entanto, na segunda órbita, a relação cai para valores inferiores a 5, e a atividade das ondas *Chorus* passa a apresentar ângulos mais elevados, variando entre ($30^\circ - 80^\circ$). Observa-se que nas regiões onde a razão (W_{pe}/W_{ce}) apresenta valores baixos existe uma predominância de atividade de ondas *Chorus* em banda baixa, e muitas vezes uma competição em relação a obliquidade da onda.

Figura 6.23 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO Sem MC - T2.



Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO YS - T2. De cima para baixo: (a) O fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen A; (b) Espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por $(nT)^2/\text{Hz}$ e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1fce (Hz), a linha preta, 0,5 fce (Hz), e a linha verde, 0,9 fce (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^\circ$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (W_{pe}/W_{ce}).

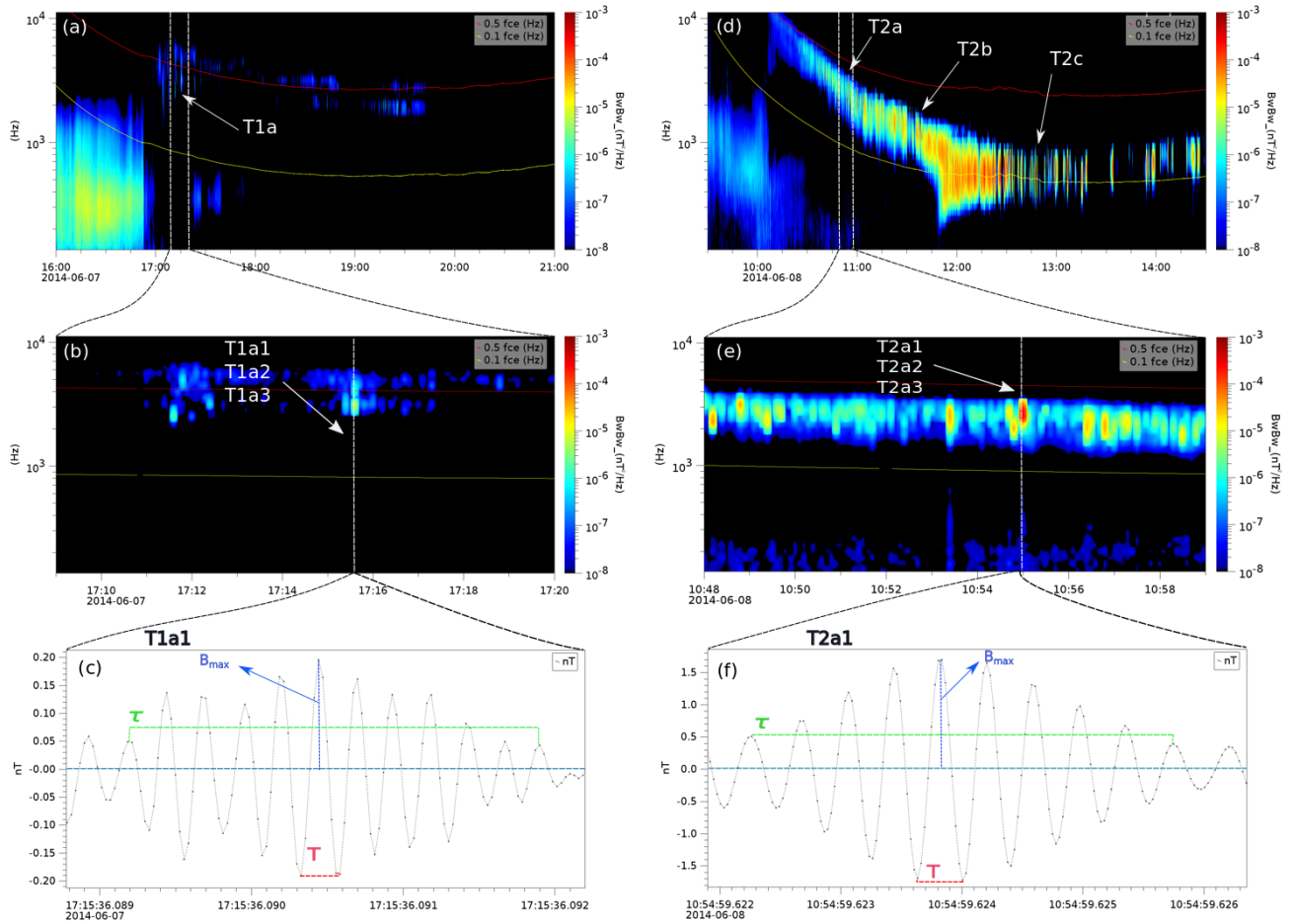
Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.24 apresenta o espectro de potência do campo magnético, os subelementos e os pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO sem MC - T1 e T2. Os painéis seguem a mesma disposição previamente descrita na Figura 6.6. A atividade das ondas *Chorus* em ambas as bandas, tanto na banda baixa ($0,1 - 0,5f_{ce}$) quanto na banda alta ($0,5 - 0,1f_{ce}$), no intervalo T1, conforme mostrado no painel (a). Por outro lado, o intervalo T2 apresenta atividades de ondas *Chorus* em banda baixa ($0,1 - 0,5f_{ce}$), painel (d).

Nos painéis (b) e (e), as densidades do espectro de potência do campo magnético exibem picos pontuais e espaçados, características distintivas da atividade de *Bursts* nessas regiões. Nota-se que essas assinaturas para o intervalo T1 são fracas, com atividades de *Bursts* muito discretas e em baixa quantidade. Em contraste, no intervalo T2, vários subelementos de ondas *Chorus* foram detectados.

Os subelementos *Chorus* selecionados nos painéis (c) e (f) apresentaram amplitude máxima do campo magnético da onda central ($B_{max} \sim 0,14nT$) e ($B_{max} \sim 1,52nT$), respectivamente, durante os intervalos T1a1 e T2a1. A região T2 analisada mostrou uma alta concentração de *Bursts* ao longo de todo o período, ao passo que, diferentemente, a região T1 apresentou atividade de *Bursts* mais fraca e em menor quantidade. Outros parâmetros que caracterizam os *Bursts* são mostrados na Tabela 6.5.

Figura 6.24 - Subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* CASO Sem MC - T1 e T2.



Subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO Sem MC. De cima para baixo: (a) e (d) representando espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo medida pelo instrumento EMFISIS-(MAG) a bordo da sonda *Van Allen Probes A*; as barras paralelas e horizontais indicam o zoom no tempo usado em (b) e (e) respectivamente para o mesmo parâmetro. A linhas pontilhada no gráfico (b) e (e) ilustram um novo *Zoom* no tempo para a região em que o instrumento EMFISIS-(EVW) capta a variação no campo magnético local em alta resolução, de alta resolução, expresso em [nT]. Os parâmetros das ondas: τ e T se referem aos períodos respectivos do envelope de onda e do ciclo de onda do subelemento central. B_{max} é o valor instantâneo máximo da amplitude da onda do subelemento central.

Fonte: Produção autoral.

A Tabela 6.6 apresenta os parâmetros coletados pela sonda Van Allen A nos intervalos

los de interesse T1 e T2 durante o estudo de caso sem MC. Assim, os *Bursts* foram detectados entre 7 e 8 de junho de 2014. No intervalo T1, apenas uma região com atividade de *Bursts* foi identificada, e o conjunto de observações para T2 seguiu o padrão dos outros casos.

As frequências de onda ω (Hz) mostram valores em torno de ~ 3 kHz para o instante T1a. Os intervalos de aquisição dos *Bursts* ocorreram no dia 07 de junho de 2014, às 17:15:36.008 UT, 17:15:36.088 UT e 17:15:36.104 UT, respectivamente. Os cálculos para a razão W_{pe}/W_{ce} em T1a apresentaram valores elevados, de aproximadamente ~ 9 . Também foram observados aproximadamente 10 a 12 ciclos de onda em todo o pacote de ondas. Entretanto, os subelementos da onda *Chorus* e os elétrons relativísticos não apresentaram significância, com baixos valores do ângulo $\Delta\alpha T$ (abaixo de 1°) e $\Delta\alpha\tau$ (abaixo 9°).

O intervalo T2 corresponde ao período de *dropout* no fluxo de elétrons no cinturão de radiação. Os ângulos $\Delta\alpha T$ e $\Delta\alpha\tau$ para esse período atingiram valores mais elevados, quando comparados ao intervalo T1, como $15, 24^\circ$ e 90° , respectivamente. Os valores para $\Delta\alpha\tau$ variaram de $\sim 25, 9^\circ$ até o máximo. Durante esse intervalo, os subelementos observados apresentaram, em média, aproximadamente 6,0 a 8,0 ciclos de onda em todo o pacote de ondas.

Tabela 6.5 - Parâmetros e cálculo de ($\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso sem MC.

DATA	T1-T2	τ (ms)	B (nT)	B_o (nT)	ω (Hz)	W_{pe}/W_{ce}	Δt_τ (ms)	$\Delta\alpha_\tau$ ($^\circ$)	$\Delta\alpha_T$ ($^\circ$)
07/06/14	T1a								
17:15:36.008	T1a1	2,22	0,14	291	3160	9,81	12,67	3,95	0,47
17:15:36.088	T1a2	3,35	0,2	291	3180	9,1	18,78	8,36	0,64
17:15:36.104	T1a3	3,16	0,16	291	3180	9,1	18,48	6,59	0,5
08/06/14	T2a								
10:54:59.619	T2a1	2,3	1,52	320	2500	4,13	11,6	39,3	6,49
10:54:59.635	T2a2	3,13	1,17	320	2520	4,13	15,85	60,02	7,67
10:54:59.689	T2a3	2,3	1,2	320	2500	4,13	11,6	31,03	5,13
08/06/14	T2b								
11:35:29.660	T2b1	6,25	0,9	217	1270	5,01	27,47	55,1	7,07
11:35:29.867	T2b2	6,61	0,4	217	1270	5,01	29,06	25,9	3,13
11:35:29.904	T2b3	7,1	0,32	217	1270	5,01	31,21	22,25	2,35
08/06/14	T1c								
12:47:24.130	T2c1	10,1	1,35	183	580	3,18	30,78	90	15,24
12:47:24.141	T2c2	7,09	1,1	183	580	3,18	21,61	52,69	11,43
12:47:24.370	T2c3	8,86	0,89	183	580	3,18	27	53,55	10,52

Tabela apresentando os principais parâmetros para os cálculos de *pitch-angle* e tempo de interação através de *Bursts* gerados por ondas *Chorus* para o estudo de **CASO sem MC**. Calculados por meio das equações 5.9 e 5.8, assumem aproximações de primeira ordem para o nível de energia de 1,8 MeV.

Fonte: Produção autoral.

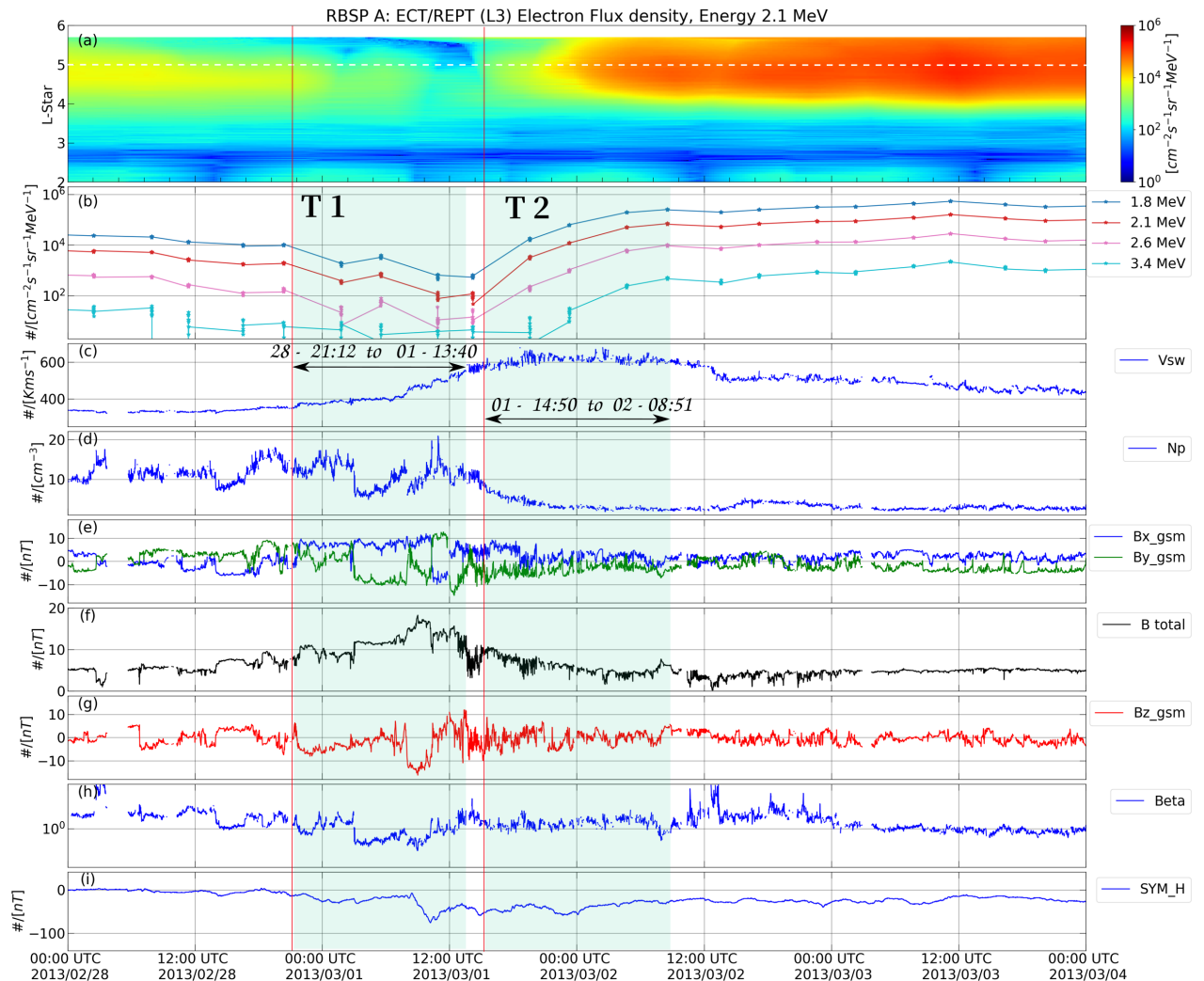
6.5 CASO HSS: High-Speed Stream

As condições do vento solar e dos parâmetros do campo magnético interplanetário, além do comportamento do fluxo de elétrons no cinturão de radiação externo, são apresentados na Figura 6.25, durante a influência de um HSS. A estrutura atingiu o ponto Lagrangiano L1 em 28 de Fevereiro de 2013. As análises são separadas em dois estágios de acordo com a variabilidade do fluxo de elétrons no cinturão de radiação externo. No primeiro estágio observa-se um dropout do fluxo de elétrons, e no segundo estágio observa-se uma aceleração. Pode-se notar o abandono da população de elétrons na Figura 6.25 (a) concomitante à chegada da HSS. A redução nos elétrons de 2,10 MeV apresenta uma diminuição gradativa em todas as regiões do cinturão externo concomitante, ao aumento da velocidade do vento solar painel (c). A linha

vertical vermelha, na Figura 6.25, marca o início desse período e o início de um dropout. Esta diminuição também é observada para níveis de energia relativística entre (1,8 MeV e 3,4 MeV), painel (b).

No instante em que a densidade de prótons cai abruptamente, por volta das 21 : 12UT do dia 28 de fevereiro de 2013, a velocidade do vento solar começa a aumentar gradualmente, de 400km/s para 600km/s . Pouco antes da queda brusca do Np , ele havia atingido níveis próximos a $20\text{partículas/cm}^{-3}$. O comportamento dos parâmetros do vento solar, para este intervalo, é característico de uma HSS. A segunda etapa começa às 14 : 50UT, em 1 de março de 2013. Neste momento, o cinturão externo aumenta sua população ultrapassando os valores que antecedem a chegada da estrutura à magnetosfera.

Figura 6.25 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e condições do meio interplanetário: CASO HSS.

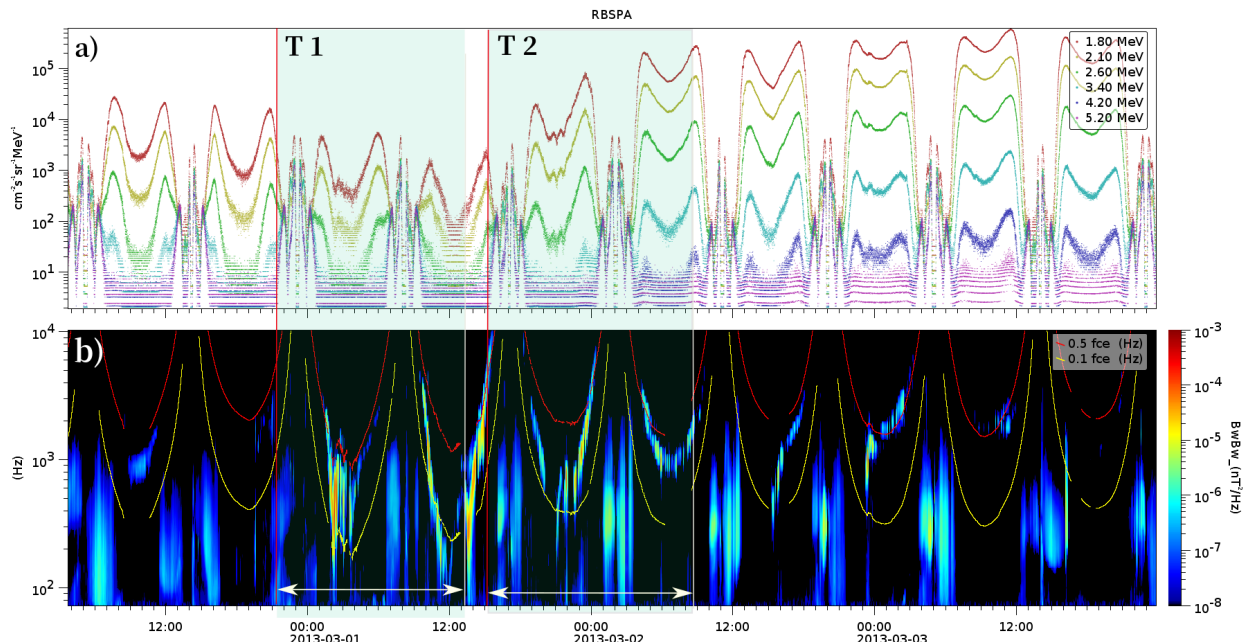


HSS, em 28 de fevereiro de 2013. De cima para baixo: (a) fluxo de elétrons relativístico para a faixa de energia de 2.1 MeV medido pelo instrumento REPT a bordo do Van Allen Probes B, cujo mapa de cores representa o fluxo integrado dado em $[cm^{-2}s^{-1}sr^{-1}MeV^{-1}]$ em função de L^* dado em (Re); (b) fluxo para cinco diferentes níveis de energia (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV), em $L^* = 5$; (c) velocidade do vento solar V_{sw} , em $[Km/s]$; (d) densidade N_p , em $[cm^{-3}]$; (e) componentes do Campo Magnético Interplanetário (IMF) Bx_{gsm} (azul) e By_{gsm} (verde), em $[nT]$; (f) módulo da amplitude da intensidade IMF B total em (preto), em $[nT]$; (g) componente IMF Bz_{gsm} ; (h) Beta de plasma e (i) index symmetric SYM_H . A linha vertical vermelha sólida representa o início do período em que a polaridade da MC se torna Sul. As duas regiões em verde claro, T1 e T2, respectivamente, compreendem os intervalos do dia 28 de fevereiro, às 21:12 UT até o dia 01 de março, às 13:40 UT e dia 01 de março, das 14:50 UT até às 08:51 UT, os quais correspondem ao período de interesse no estudo das ondas e variações de fluxo.

Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.26 apresenta as variações no fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação (painel (a)) e a potência espectral do campo magnético (painel (b)). No painel (a), pode-se observar uma diminuição gradual em todos os níveis de energia durante o primeiro período de estudo, T1, que corresponde à chegada da estrutura em 28 de fevereiro de 2013. Esta diminuição no fluxo de elétrons relativísticos apresenta as características de um *dropout* uma vez que, atinge mais de uma ordem de grandeza. Atividades de ondas *Chorus* com potencialidades de causar variabilidades no fluxo de elétrons no cinturão de radiação são observadas no painel (b) da Figura 6.26 neste momento, as quais caracterizam ondas *Chorus* em banda baixa.

Figura 6.26 - Atividade de ondas *Chorus* e variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos: **CASO HSS**.



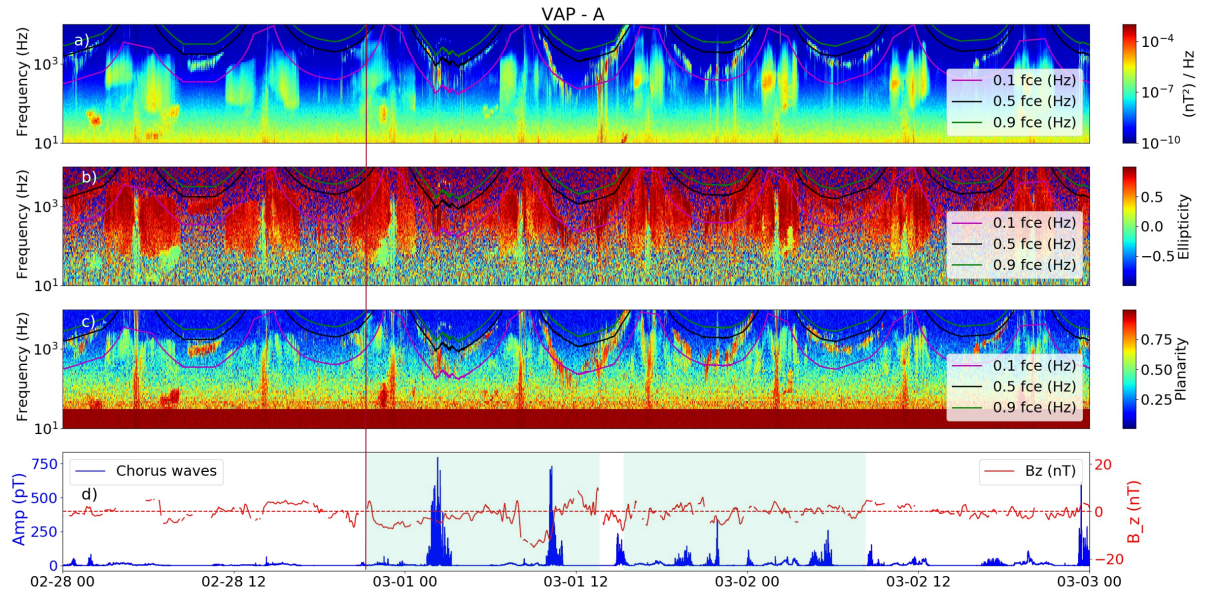
Fluxo de elétrons relativísticos e assinaturas de ondas *Chorus* no modo *Whistler*, **CASO HSS**. De cima para baixo: a) fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação durante o intervalo de 12 a 14 de novembro de 2012, para cinco níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV; 4,2 MeV e 5,2 MeV), utilizando os dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen B; b) potência espectral do campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda Van Allen Probes B, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e no eixo $y(Hz)$, a frequência em função do tempo. A linha na cor amarela representa os valores de $0,1 fce(Hz)$ e a linha em vermelho, $0,5 fce(Hz)$.

Fonte: Produção autoral.

No segundo período de estudo, T2, também observa-se alta atividade das ondas de *Chorus*, mas desta vez podendo estar relacionado ao aumento nas populações de energia em todos os níveis. Isso se enquadra nas características de *enhancement*, as quais representam um aumento no fluxo de elétrons relativísticos também com mais de uma ordem de grandeza. É interessante notar que o repovoamento do cinturão de radiação intensifica-se imediatamente após a diminuição inicial no fluxo, o que coincide com a atividade das ondas de *Chorus* em banda baixa.

Na Figura 6.27, pode-se observar uma atividade de ondas *Chorus* duradoura, a qual abrange um maior número de órbitas. Os intervalos selecionados no estudo da HSS incorporam atividades de ondas *Chorus*, tanto em banda baixa quanto em banda alta. No intervalo T1, as amplitudes no painel (d) dessas ondas atingem valores elevados, chegando a quase $750(pT)$. Enquanto no intervalo T2, as amplitudes apresentam valores significativos, embora não tão elevados quanto em T1. Durante esse período, observa-se que os picos de amplitude estão associados a situações em que a componente B_z do IMF é negativa. Essa tendência é notável ao longo do estudo da HSS.

Figura 6.27 - Atividade de ondas *Chorus* no modo *Whistler* Versus IMF Bz: **CASO HSS**.



Amplitude e características das ondas *Chorus* no modo *Whistler*, **CASO YS**. De cima para baixo: (a) Espectrograma de campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS a bordo da sonda *Van Allen Probes A*, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz) , a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de $0,1f_{ce}$, a linha preta, $0,5 f_{ce}$, e a linha verde, $0,9 f_{ce}$; (b) Elipticidade; (c) Planaridade; (d) Amplitude do campo magnético na faixa de frequência das ondas *Chorus* é representada pela linha azul, em [pT], com dados da sonda Van Allen A e aplicando-se filtro de identificação segundo Ni et al. (2020). A linha vermelha apresenta os valores do Campo Magnético Interplanetário (IMF) no sistema de coordenadas GSM para a componente Bz, em [nT], obtido pelo satélite ACE.

Fonte: Produção autoral.

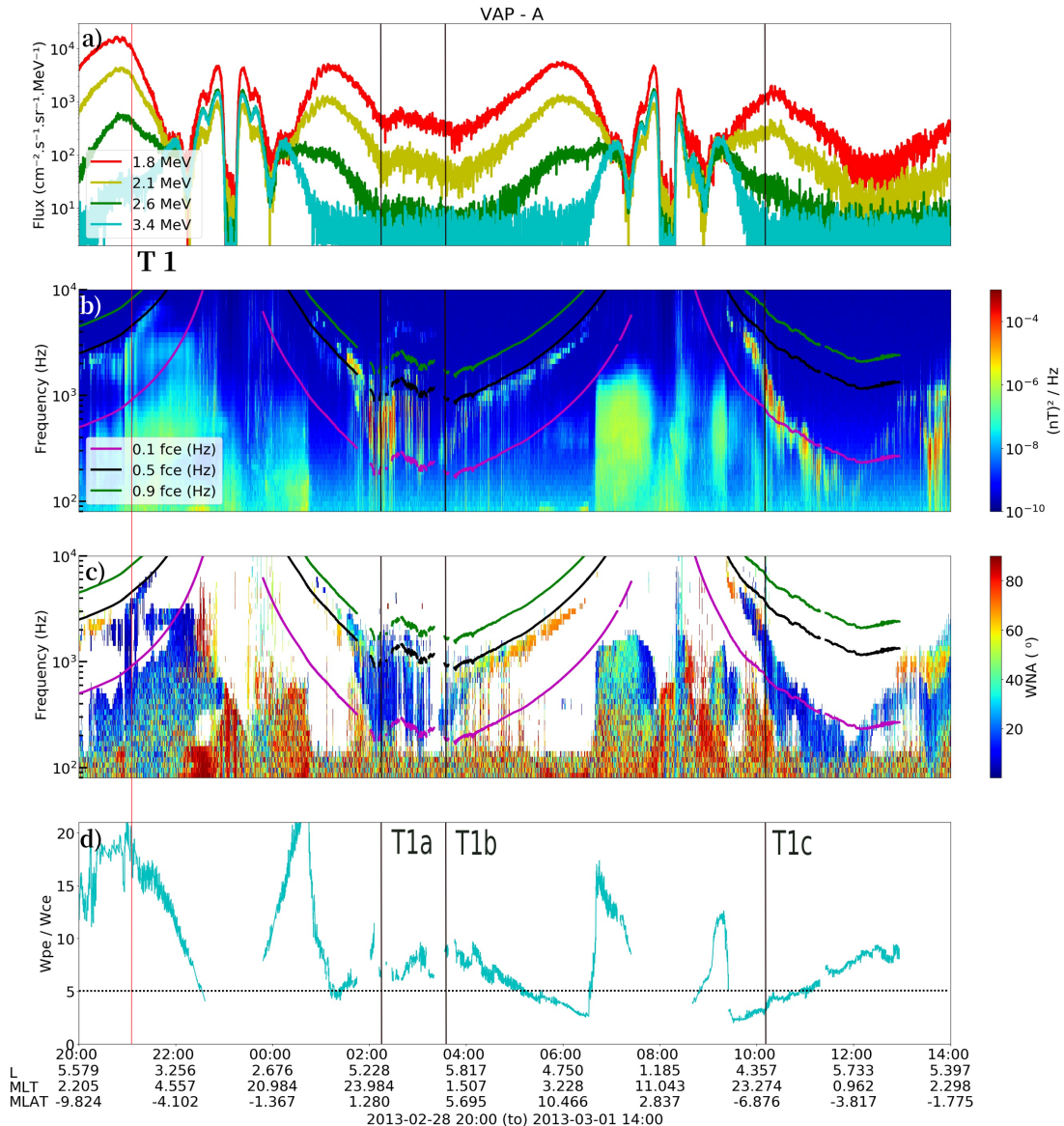
A primeira linha sólida vermelha na Figura 6.28 marca o início da região de estudo T1. Nesse instante, observa-se assinaturas discretas de ondas *Chorus* em banda baixa ($0,1 - 0,5 f_{ce}$), como indicado no painel (b). Essas ondas exibem WNA, com ângulos tanto oblíquos quanto paralelos e esse intervalo apresenta valores elevados para a relação (W_{pe}/W_{ce}) .

A órbita da Sonda Van Allen A, que compreende o período entre 00:00 UT e 08:00 UT do dia 01 de março de 2013, demonstra uma alta intensidade das atividades de ondas *Chorus*. Isso é visível pela densidade espectral acentuada do campo mag-

nético, conforme mostrado no painel (b). Nesse período o WNA apresenta valores baixos ($0^\circ - 30^\circ$) e altos ($30^\circ - 80^\circ$), como predominância em ângulos paralelos. Atividades em ambas as bandas, tanto baixa ($0,1 - 0,5fce$) quanto alta ($0,5 - 0,9fce$), são identificadas. No entanto, durante a fase *Inbound* dessa órbita, a densidade espectral mostra que a atividade de ondas *Chorus* é menos intensa que na primeira metade da órbita e se restringe principalmente à faixa de frequência de banda baixa ($0,1 - 0,5fce$). Nesse período, as ondas apresentam predominantemente características oblíquas ($30^\circ - 80^\circ$). A razão (Wpe/Wce) são próximos de 5. Essa órbita exhibe indícios de aceleração local devido às flutuações acentuadas observadas no fluxo de elétrons relativísticos no painel (a).

As ondas *Chorus* nesse período apresentam-se tanto em configurações paralelas e oblíquas ao campo magnético local, como visto no painel (c). Além disso, a relação (Wpe/Wce) apresenta valores predominantemente baixos durante o intervalo, com um aumento à medida em que a predominância de atividades de ondas oblíquas intensifica-se após o instante T1c. Neste caso, observou-se uma alta incidência de atividades de *Bursts*.

Figura 6.28 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO HSS - T1.



Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO HSS - T1. De cima para baixo: (a) O fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen A; (b) Espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1fce (Hz), a linha preta, 0,5 fce (Hz), e a linha verde, 0,9 fce (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^{\circ}$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (Wpe/Wce).

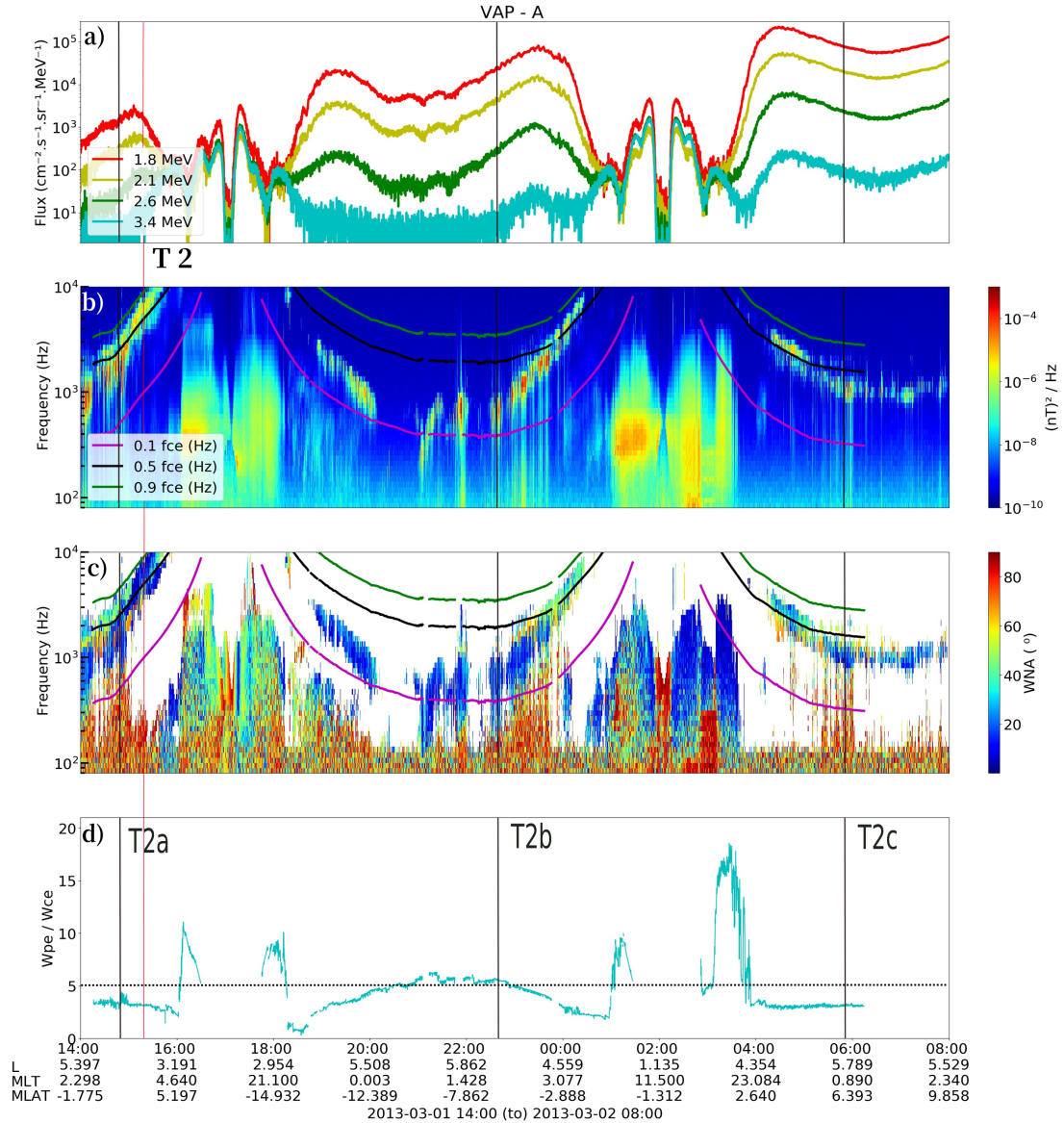
Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.29 representa o intervalo T2 para o caso HSS. Durante esse período, observa-se uma tendência de recuperação no fluxo de elétrons relativísticos ao longo de todo o intervalo, como evidenciado no painel (a). Nota-se também a presença de atividade das ondas *Chorus* em ambas as bandas, tanto na banda baixa quanto na banda alta, em todas as órbitas.

Ao analisar a relação (W_{pe}/W_{ce}), conforme mostrado no painel (d), observam-se valores baixos durante os intervalos de atividade das ondas *Chorus*. A atividade de ondas *Chorus* predominante para o período é em banda baixa ($0,1 - 0,5f_{ce}$). Observa-se ainda a concomitância entre as flutuações locais no fluxo de elétrons relativísticos, conforme mostrado no painel (a), e o aumento na intensidade do espectro de potência do campo magnético como evidenciado no painel (b). Essas flutuações estão predominantemente associadas à atividade de ondas *Chorus* de banda baixa, em que, os períodos de maior intensidade coincidem com as assinaturas das ondas paralelas ao campo magnético local, conforme indicado através dos baixos valores de WNA no painel (c).

Embora haja predominância de atividade em banda baixa, é interessante observar que também há uma competição entre ondas paralelas e oblíquas durante a maior parte do período analisado. Este intervalo T2 investigado foi rico em atividades de *Bursts*, facilitando a caracterização desses eventos. Escolheram-se os intervalos T2a, T2b e T2c, em três órbitas diferentes, para um estudo mais detalhado dessas atividades de *Bursts*.

Figura 6.29 - Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia versus Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler*: CASO HSS - T2.



Atividade de onda *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO HSS - T2. De cima para baixo: (a) fluxo de elétrons relativísticos no cinturão de radiação, para quatro níveis de energia diferentes (1,8 MeV; 2,1 MeV; 2,6 MeV; 3,4 MeV), usando dados do instrumento REPT a bordo da sonda Van Allen A; (b) espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo. A linha rosa representa os valores de 0,1fce (Hz), a linha preta, 0,5 fce (Hz), e a linha verde, 0,9 fce (Hz); (c) Wave Normal Angle - WNA, em graus ($^\circ$); (d) relação de frequência de oscilação de plasma e giro frequência de elétrons (Wpe/Wce).

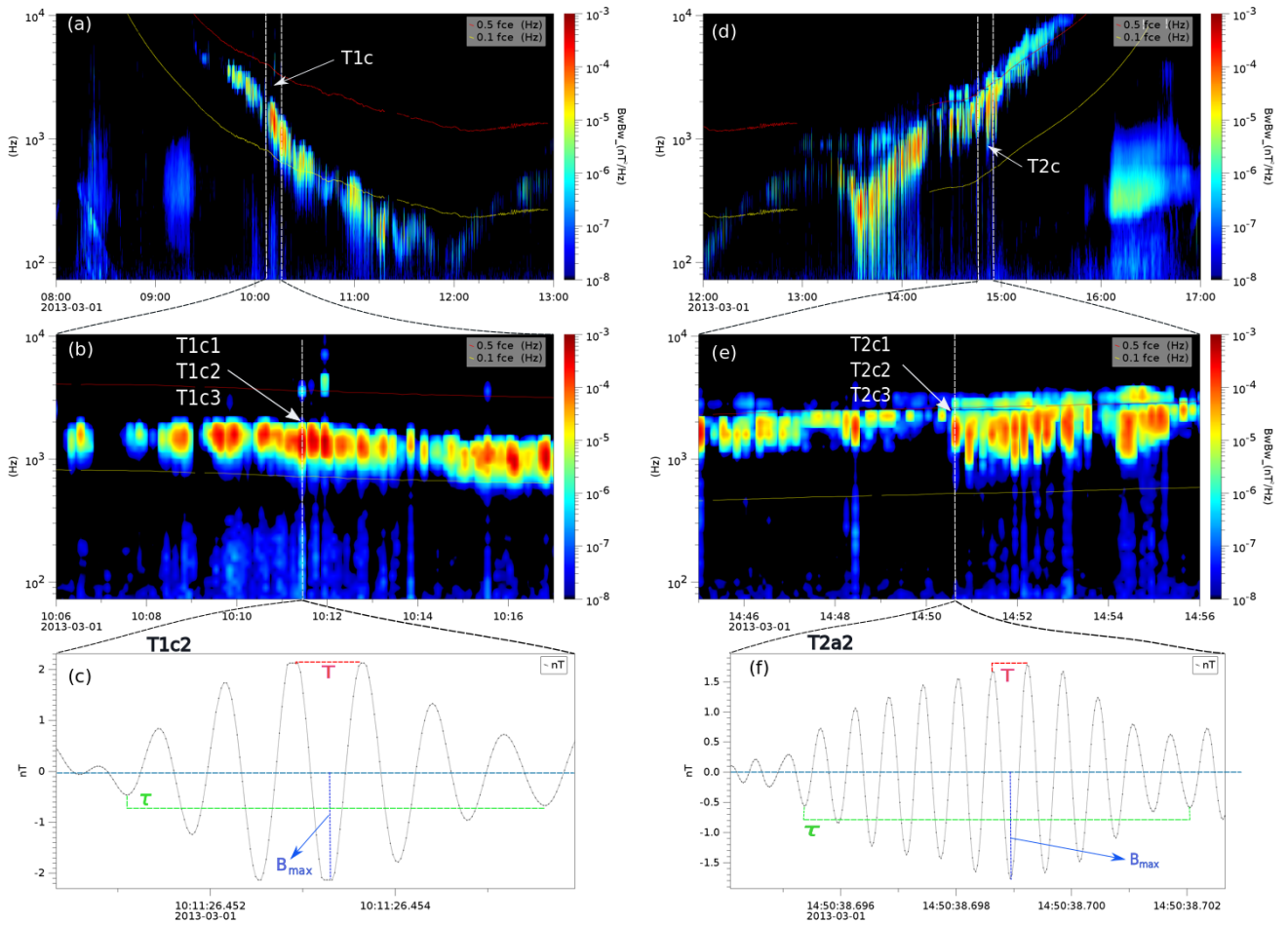
Fonte: Produção autoral.

A Figura 6.30 apresenta o espectro de potência do campo magnético, os subelementos e os pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* para o CASO HSS - T1 e T2. Os painéis seguem a mesma disposição previamente descrita na Figura 6.6. Nos painéis (a) e (d), é possível observar uma alta atividade de ondas *Chorus* a partir do alta potencial observada no espectro de potência do campo magnético, o qual atinge picos na ordem de 10^{-3} (nT^2/Hz). A atividade das ondas *Chorus* em ambas as bandas também foi observada em T1 e T2, tanto na banda baixa ($0,1 - 0,5fce$) para o intervalo T1, quanto em banda alta ($0,5 - 0,1fce$), conforme mostrado no painel (d) e painel (e), respectivamente. As atividades de banda baixa apresentam as maiores intensidades para o espectro de potência do campo magnético atividades das ondas *Chorus*.

Nos painéis (b) e (e), as densidades do espectro de potência do campo magnético exibem picos pontuais e espaçados, características distintivas da atividade de *Bursts* nessas regiões. Vários subelementos de ondas *Chorus* foram detectados para ambos intervalos, em que a atividade de *Bursts* é alta e permanece ativa por um longo intervalo de tempo.

Os subelementos *Chorus* selecionados nos painéis (c) e (f) apresentaram amplitude máxima do campo magnético da onda central ($B_{max} \sim 2,15nT$) e ($B_{max} \sim 1,74nT$), respectivamente, durante os intervalos T1c2 e T2a2. As regiões analisadas para HSS mostraram-se com uma alta concentração de *Bursts* ao longo de todo o período e os parâmetros que caracterizam tais *Bursts* estão apresentados na Tabela 6.6.

Figura 6.30 - Subelementos e pacotes de ondas *Chorus* no modo *Whistler* CASO HSS - T1 e T2.



Subelementos e pacotes de ondas *Whistler* para o CASO HSS. De cima para baixo: (a) e (d) representando espectrograma de campo magnético, onde o mapa de cor representa a densidade por (nT^2/Hz) e o eixo y (Hz), a frequência, em função do tempo medida pelo instrumento EMFISIS-(MAG) a bordo da sonda *Van Allen Probes A*; as barras paralelas e horizontais indicam o zoom no tempo usado em (b) e (e) respectivamente para o mesmo parâmetro. As linhas pontilhada no gráfico (b) e (e) ilustram um novo *Zoom* no tempo para a região em que o instrumento EMFISIS-(EVW) capta a variação no campo magnético local em alta resolução, de alta resolução, expresso em [nT]. Os parâmetros das ondas: τ e T se referem aos períodos respectivos do envelope de onda e do ciclo de onda do subelemento central. B_{max} é o valor instantâneo máximo da amplitude da onda do subelemento central.

Fonte: Produção autoral.

A Tabela 6.6 apresenta os parâmetros coletados pela sonda Van Allen B nos inter-

valos de interesse T1 e T2, durante o estudo de caso HSS. Os instantes e parâmetros dos *Bursts* detectados em 1 e 2 de março de 2013 são apresentados na Tabela A Tabela 6.6. Embora as observações tenham ocorrido em intervalos de tempo próximos, houve diferenças notáveis na resposta do fluxo de elétrons no cinturão de radiação e na atividade das ondas *Chorus*, ao comparar os dois conjuntos de observações, T1 e T2.

As frequências de onda ω (Hz) mostram valores em torno de 456 Hz para os intervalos T1a e T1b, enquanto para o intervalo T1c, esses valores atingem até $\sim 1,4$ kHz. Isso ocorre durante um período em que a razão W_{pe}/W_{ce} está abaixo de 5 para o período T1c, sugerindo uma alta efetividade para curtos intervalos de interação entre ondas *Chorus* e elétrons relativísticos (HORNE et al., 2003; AGAPITOV et al., 2019; WANG, 2023). Durante a diminuição do fluxo de partículas no cinturão de radiação, são observados aproximadamente 6,0 a 8,0 ciclos de onda em todos os pacotes de ondas.

Considerando o tempo de interação entre os subelementos das ondas *Chorus* e os elétrons relativísticos, o ângulo $\Delta\alpha T$ atingiu o valor máximo de $26,76^\circ$ em T1a3, enquanto o $\Delta\alpha\tau$ atingiu valor máximo $85,01^\circ$ em T1c2. Isso sugere que as ondas *Chorus* e o pacote de ondas desempenham um papel relevante na diminuição observada no fluxo de elétrons relativísticos, sugerindo que a variabilidade tenha ocorrido devido ao fenômeno de espalhamento conhecido na literatura por *pitch-angle scattering*. Nesse contexto, os pacotes de ondas mostram-se mais eficientes do que um único ciclo de onda durante essas interações.

O intervalo T1a exibiu valores notavelmente baixos para o campo magnético de fundo B_o no período, registrando um valor de $74(nT)$. Apesar de os *Bursts* encontrados para este período não apresentarem valores tão elevados quanto em outros intervalos no estudo de caso, indicaram, mesmo assim, que mecanismos não lineares podem ter atuado nesses momentos uma vez que a razão B/B_o apresentou valores maior que 1% para os 3 *Bursts* em T1a.

O intervalo T2 corresponde ao período de aprimoramento no fluxo de elétrons no cinturão de radiação. O ângulo $\Delta\alpha T$ para esse período também atingiu valores elevados, mas de forma mais discreta, com o menor valor $5,43^\circ$ em T2c3 e o máximo valor de $15,75^\circ$ em T2b3. Os valores para $\Delta\alpha\tau$ variaram de $24,81^\circ$ em T2b2 e 90° em T2b1 e T2a2. Durante esse intervalo, os subelementos observados apresentaram, em média, aproximadamente 7,0 a 10,0 ciclos de onda em todo o pacote de ondas.

É importante destacar que a espaçonave estava orbitando em L^* com valores superiores a 4,5 RE para os *Bursts* selecionados em ambos os intervalos, o que indica que esses eventos ocorreram em regiões específicas do cinturão de radiação. Os períodos T1a e T1b apresentaram valores mais elevados para razão W_{pe}/W_{ce} , segundo Wang (2023). Esses valores mais elevados para períodos em que o Índice do Eletrojato Auroral AE - (*Auroral Electrojet Index*) foi maior que 500 (ver anexo C.1) são justificados, sem diminuir a potencialidade das onda *Chorus*.

Tabela 6.6 - Parâmetros e cálculo de ($\Delta\alpha$ e Δt), estudo de caso HSS.

DATA	T1-T2	τ (ms)	B (nT)	B_o (nT)	ω (Hz)	W_{pe}/W_{ce}	Δt_τ (ms)	$\Delta\alpha_\tau$ ($^\circ$)	$\Delta\alpha_T$ ($^\circ$)
01/03/13	T1a								
2:14:03.433	T1a1	14,2	1,1	74	420	6,85	61,44	90	26,51
2:14:03.722	T1a2	8,51	0,96	74	397	6,85	35,7	76,45	24,25
2:14:04.273	T1a3	17,5	1,1	74	397	6,84	73,49	90	26,76
01/03/13	T1b								
03:35:40.220	T1b1	11,3	0,56	65	456	8,9	54,3	67,76	13,19
03:35:40.677	T1b2	8,16	0,95	65,5	450	8,75	38,97	82,49	16,,58
03:35:40.875	T1b3	15	0,5	66,5	450	8,62	71,11	79,23	11,62
01/03/13	T1c								
10:11:26.428	T1c1	4,95	1,54	256	1430	3,56	21,24	72,87	11,72
10:11:26.451	T1c2	4,3	2,15	256	1330	3,56	17,74	85,01	15,77
10:11:26.466	T1c3	5,23	2,2	252	1270	3,56	21,04	90	15,77

01/03/13	T2a								
14:50:38.614	T2a1	9,5	1,17	187	1740	3,83	51,54	90	10,75
14:50:38.693	T2a2	6,7	1,74	187	1740	3,83	36,35	90	14,72
14:50:38.711	T2a3	3,82	1,3	187	1790	3,83	20,72	60,03	8,64
01/03/13	T2b								
22:37:14.770	T2b1	13,3	0,53	138	615	5,54	50,34	59,45	6,26
22:37:14.840	T2b2	10,2	0,56	138	615	5,54	38,61	48,17	7,08
22:37:14.912	T2b3	7,94	1,16	138	615	5,4	30,05	77,68	15,75
02/03/13	T1c								
05:54:08.747	T2c1	9,7	0,55	115	1010	3,17	51,4	62,9	6,82
05:54:08.759	T2c2	8,23	0,57	115	1010	3,17	43,61	55,39	6,93
05:54:08.837	T2c3	10,29	0,46	115	1010	3,17	54,52	55,89	5,43

Tabela apresentando os principais parâmetros para os cálculos de *pitch-angle* e tempo de interação através de *Bursts* gerados por ondas *Chorus* para o estudo de **CASO HSS**. Calculados por meio das equações 5.9 e 5.8, assumem aproximações de primeira ordem para o nível de energia de 1,8 MeV.

Fonte: Produção autoral.

7 DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados obtidos para os cinco estudos de caso selecionados no âmbito desta tese. As ondas *Chorus* podem fornecer um mecanismo eficaz de transferência de energia para elétrons relativísticos (HORNE; THORNE, 2003; THORNE et al., 2010), resultando em picos na Densidade de Espaço de Fase (*Phase Space Density* - PhSD), estes picos no PhSD podem ser observados na região do cinturão de radiação externo durante influências de diferentes estruturas do vento solar (SOUZA et al., 2017; ALVES et al., 2017a; DA SILVA et al., 2019; DA SILVA et al., 2020; DA SILVA et al., 2021b; ALVES et al., 2023; JAYNES et al., 2015), que muitas das vezes podem causar tempestades magnéticas (HORNE et al., 2005; THORNE, 2013). Portanto, a fim de discutir o papel das ondas *Chorus* na variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos, considerando as diferentes estruturas do vento solar, são utilizados o cálculo do $\Delta\alpha_\tau$ em diferentes níveis de energia (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV), assim como o PhSD com ênfase em intervalos de subelementos analisados nos capítulos anteriores.

É importante destacar que além de analisar a potencialidade dos *Bursts* em ressonar com as partículas no cinturão externo, serão também discutidos os seus comportamentos nos diferentes níveis de energia, principalmente considerando a influência das diferentes estruturas do vento solar. Assim, este capítulo visa fortalecer as conclusões que emergiram ao longo de cada estudo de caso, explicitando os resultados inéditos encontrados nesta tese e correlacionando-os com a literatura existente.

7.1 Caso NS

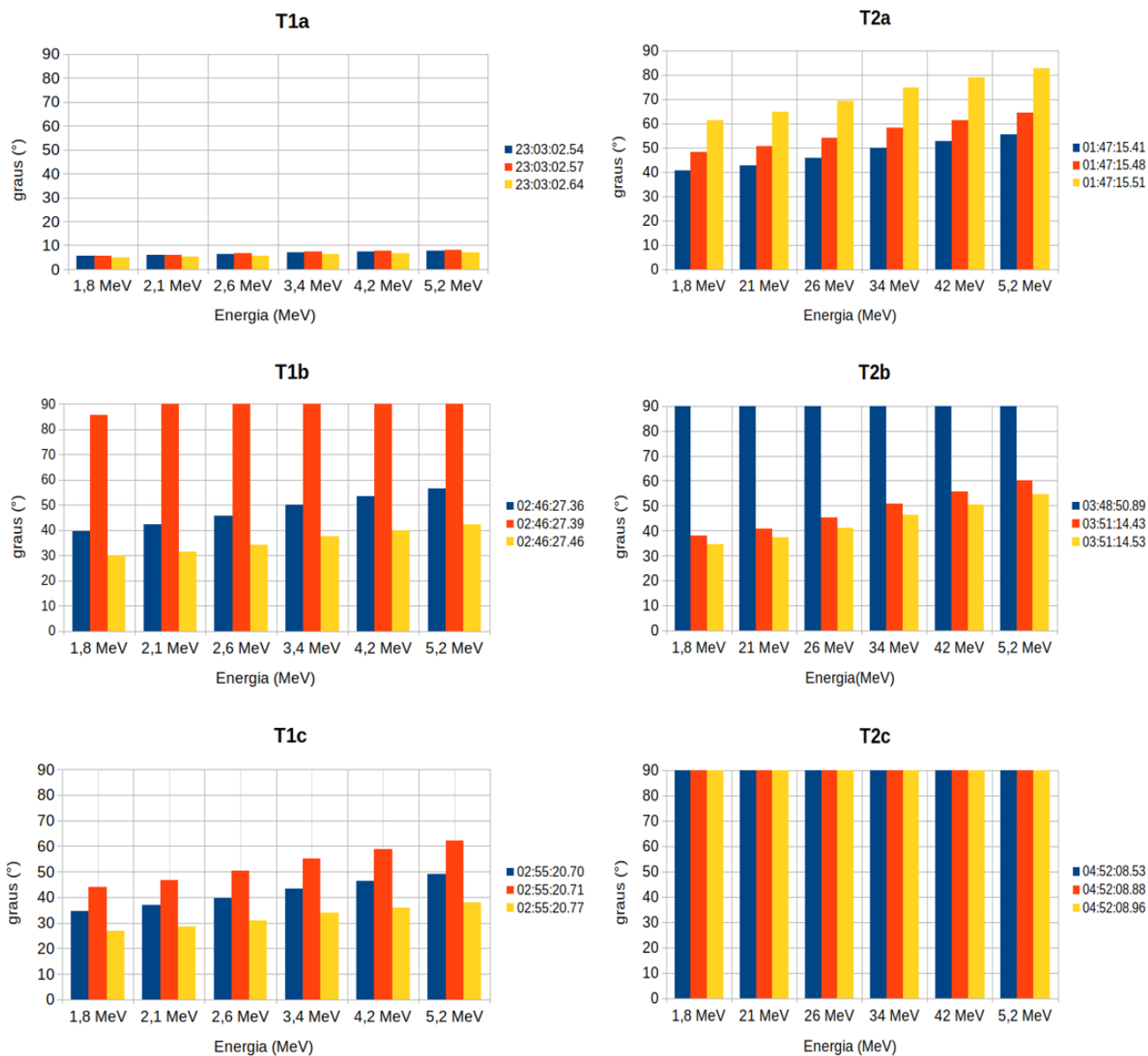
A Figura 7.1 apresenta todos os valores calculados para $\Delta\alpha_\tau$ referentes aos *Bursts* identificados no estudo de CASO NS, considerando-se a interação entre os pacotes de ondas *Chorus* e os elétrons relativísticos, para seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV).

Observa-se que as características de $\Delta\alpha_\tau$ dentro de cada intervalo são semelhantes, principalmente em relação a tendência de aumento com o aumento do nível de energia, a qual pode ser observada em todos os subelementos, exceto nos subelementos que apresentaram valores máximos em $\Delta\alpha_\tau$ desde 1,8 MeV até 5,2 MeV (T1b2, T2b1 e T2c1, T2c2, T2c3).

Por outro lado, os valores de $\Delta\alpha_\tau$ nos intervalos T1a e T2c diferem consideravel-

mente, sendo todos os $\Delta\alpha_\tau$ dos subelementos de T1a abaixo de 9° , enquanto dos subelementos de T2c apresentando o máximo valor (90°). Isto implica dizer que o cone de perda produzido pela ressonância entre *Chorus* e partículas em T1a está praticamente fechado, enquanto em T2c está totalmente aberto. Assim, vale destacar as condições do meio interplanetário para entender tais diferenças. O primeiro ponto refere-se a orientação da componente Bz do IMF, que apesar de ser majoritariamente negativa para os dois intervalos T1a e T2c, o último está compreendido dentro da MC, e o T1a ocorre ligeiramente após o choque interplanetário. Assim, sugere-se que os mecanismos geradores das ondas *Chorus* nestes dois distintos intervalos sejam diferentes, uma vez que a potência espectral e as amplitudes das ondas *Chorus* em T2c são consideravelmente altas (ARYAN et al., 2014), quando comparadas as potências e amplitudes das *Chorus* em T1a.

Figura 7.1 - Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO NS.



Os gráficos de barras representam quantitativamente os valores de $\Delta\alpha_\tau$ em relação à seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV) para cada um dos três *Bursts* em cada painel. A legenda indica o horário de ocorrência dos *Bursts* para cada intervalo de tempo. Os três painéis à esquerda correspondem aos *Bursts* no intervalo T1, enquanto os três painéis à direita correspondem ao intervalo T2.

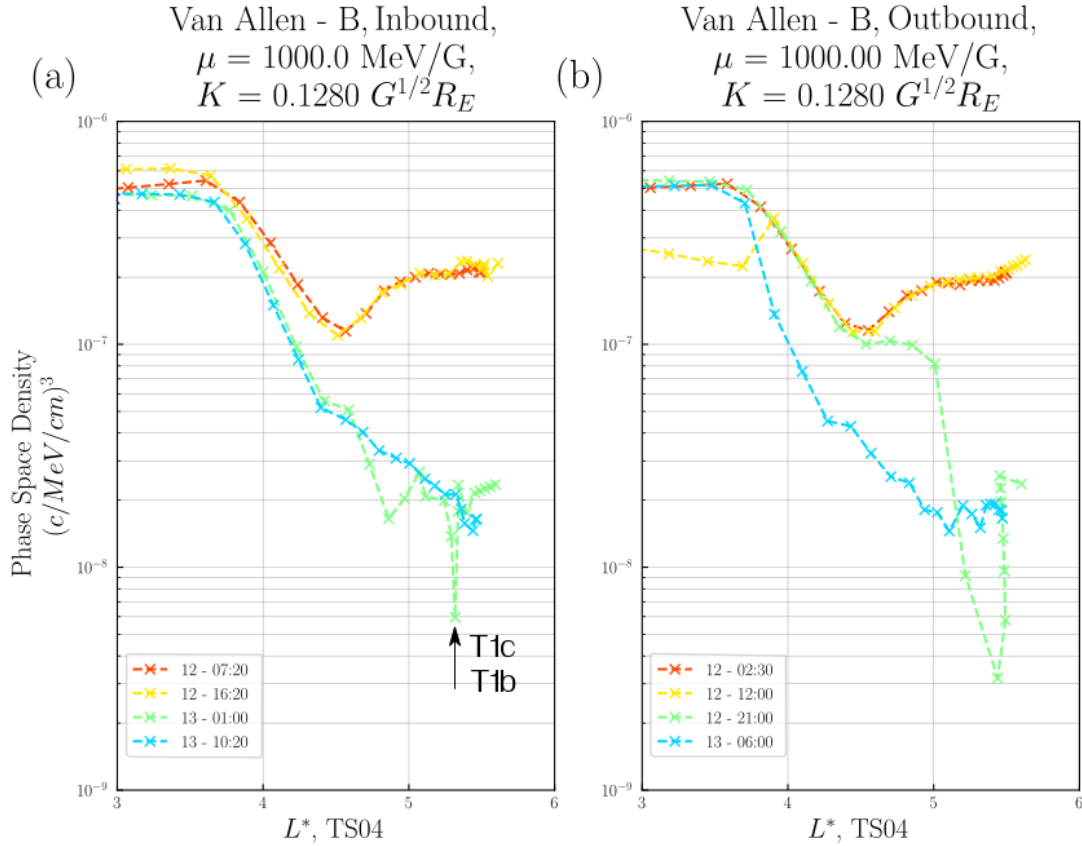
Fonte: Produção autoral.

As Figuras 7.2 e 7.3 exibem a variação ao longo do tempo dos perfis de Densidade de

Espaço de Fase (*Phase Space Density* - PhSD) em relação a L^* , para os intervalos T1 e T2 no CASO NS. No painel (a), são retratados os valores durante a fase *Inbound*, enquanto o painel (b) representa os valores durante a fase *Outbound*, ambos correspondendo às órbitas da Sonda Van Allen B. A apresentação do PhSD segue a metodologia descrita na sessão 5.8, em que o primeiro invariante adiabático foi mantido constante em ($\mu = 1000 \text{MeV}/G$) e o segundo invariante adiabático em ($K = 0,128 G^{1/2} RE$) (DA SILVA et al., 2019). A legenda indica o dia e a hora de início, no formato dd/hh:mm para ambos os painéis.

Na Figura 7.2, avaliando a evolução temporal dos perfis *Inbound* das duas primeiras órbitas (curva marrom e amarela), após a ocorrência da onda de choque causada pela MC, nota-se que a terceira órbita (curva verde clara), com início a 01:00 do dia 13, apresenta uma redução no gradiente da densidade no espaço de fase. Essa redução torna-se mais acentuada em L^* maiores que 4,2 RE. Adicionalmente pode ser observado um pico local na órbita verde clara, bem acentuado em $L^* \sim 5,3 RE$, indicando diminuição localizada. A seta preta aponta essa região no gráfico do painel (a), a qual corresponde aos intervalos escolhidos para a aquisição de *Bursts*, T1c e T1b, onde a sonda estava em *Inbound*, localizada em uma posição $MLT \sim 6(H)$ e com L^* de $\sim 5,4 RE$ e corresponde aos intervalos identificados com maiores amplitudes para a atividade de ondas *Chorus* na região de estudo T1. Isto confirma que as ondas *Chorus* contribuíram com a diminuição de fluxo de elétrons relativísticos através de interação ressonante através do mecanismo de *pitch angle scattering* (BAKER et al., 2016), especificamente em T1c e T1b. Enquanto no intervalo T1a, a sonda estava em *Outbound*, localizada na posição $MLT \sim 3,2(H)$, com L^* de $\sim 4,8 RE$. Como esperado, conforme mostrado nos baixos valores encontrados em $\Delta\alpha\tau$ deste subelemento T1a, não se observa perda localizada também com a técnica de PhSD.

Figura 7.2 - Phase Space Density radial profiles: CASO NS - T1.

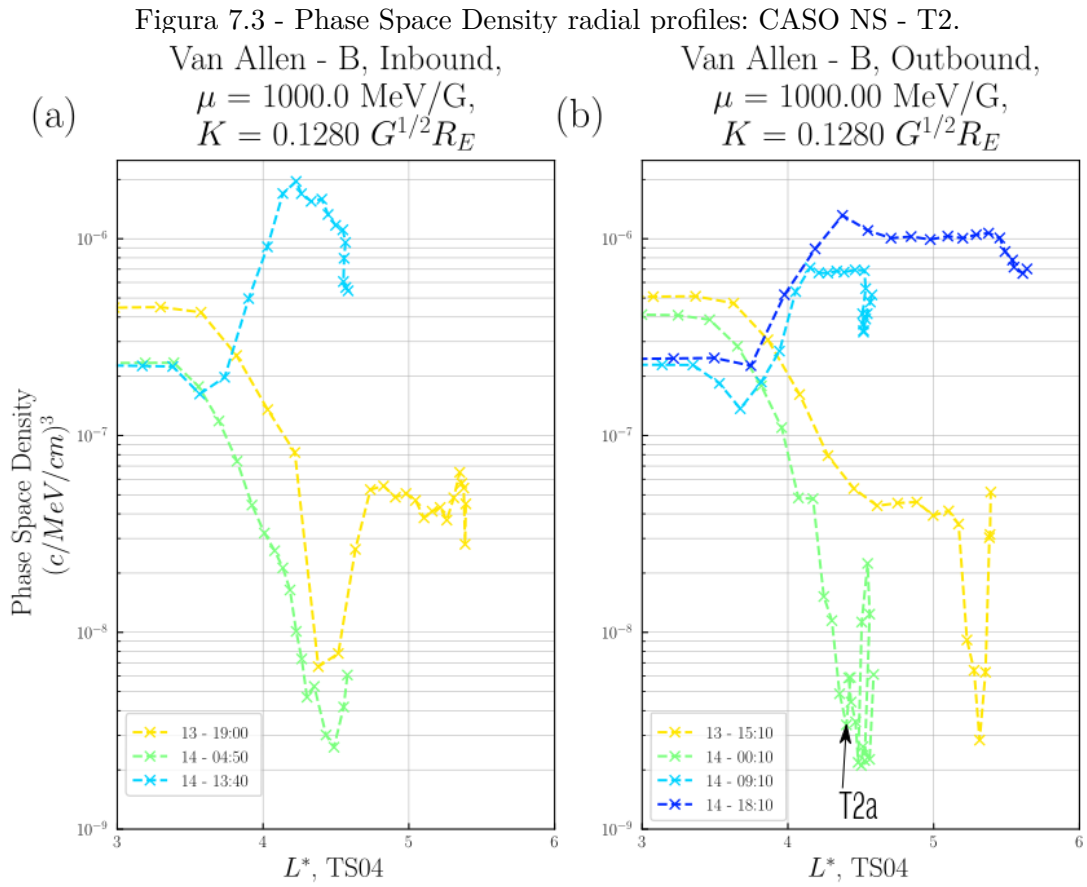


Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

A evolução temporal dos perfis radiais na Figura 7.3, apresenta o intervalo T2 para o estudo de caso NS. Observa-se para L^* mais externos (curva verde clara - 00:10 UT), no painel (b), quando a Sonda Van Allen B esta em *Outbound*, assinaturas de variabilidade no fluxo localizadas entre $L^* 4, 3$ e $4, 6 R_E$. Essas reduções contribuem para a órbita (curva verde clara - 00:10 UT) apresentar os menores valores para o PhSD em L^* , referentes a região do cinturão externo, quando comparados às órbitas anterior e subsequente. Nessa região, em que a diminuição localizada aparece de forma mais acentuada, foi identificada alta atividade de ondas *Chorus*. Isto sugere a ocorrência de espalhamento por *pitch angle* em T2a, o qual é identificado na painel (b) pela a seta preta. O intervalo onde T2a apresenta valores para a razão

W_{pe}/W_{ce} perto de 2, condição propícia à interação entre ondas e partículas na região (AGAPITOV et al., 2017; ARTEMYEV et al., 2016; AGAPITOV et al., 2020; WANG, 2023). Nos intervalos T2a e T2b, a sonda estava em *Outbound*, localizada nas posições $MLT \sim 3(H)$ e $MLT \sim 5(H)$ com L^* de $\sim 4,4RE$ e $\sim 5,6RE$, respectivamente. Enquanto no intervalo T2c, a sonda estava em *Inbound*, localizada na posição $MLT \sim 6(H)$, com L^* de $\sim 5,5RE$. É plausível inferir que os intervalos T2b e T2c não aparecem na curva verde clara, não sendo possível realizar as análises.



Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

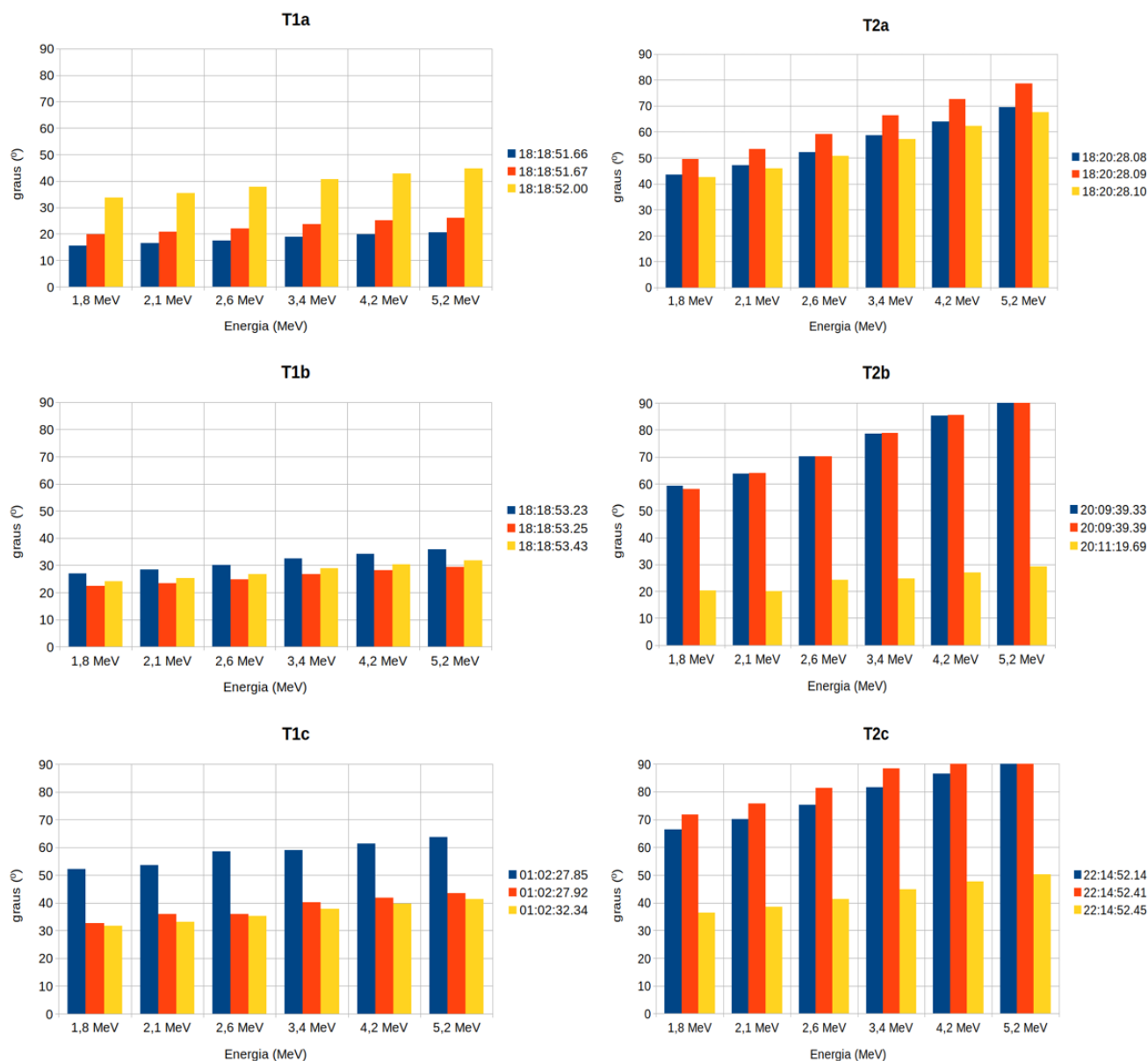
7.2 Caso SN

A Figura 7.4 exibe os valores calculados de $\Delta\alpha_\tau$ para seis níveis de energia relativística, que correspondem aos *Bursts* identificados no estudo do CASO SN para os intervalos T1 e T2.

É notável que os valores de $\Delta\alpha_\tau$ apresentam magnitudes mais expressivas durante o intervalo T2 quando comparados ao intervalo T1, especialmente ao analisar diferentes níveis de energia. Além disso, observa-se que a eficácia dos pacotes de ondas durante essas interações é mais significativa para energias mais elevadas, indicando um maior potencial desses pacotes durante tais interações. Isso é observado pela tendência de todos os gráficos.

É importante destacar que o intervalo T2 ocorre durante a passagem pela (MC), concomitante a um leve aumento de fluxo de elétrons, período em que se observam as maiores amplitudes registradas para a atividade das ondas *Chorus* e as maiores valores calculados para $\Delta\alpha_\tau$. Estas características ocorrem simultaneamente a predominância negativada componente Bz do IMF. Contudo, é importante salientar que valores de $\Delta\alpha_\tau$ altos estão associados ao cone de perda aberto, indicando possibilidade de ocorrência de perda localizada por ondas *Chorus*. Isto também pode ser inferido através da identificação da atividade de ondas *Chorus* em banda baixa, a qual também é mais propícia a perda localizada (AGAPITOV et al., 2017; AGAPITOV et al., 2020). Porém, o WNA mostrou-se quase paralelo, com ângulos menores que 30° para os períodos de maior intensificação de atividade de ondas *Chorus*, mostrando que no intervalo T2 as ondas *Chorus* podem ter contribuído com o aumento de fluxo de elétrons relativísticos localizado durante o *enhancement*. Assim, conclui-se que no intervalo T2 houve competição de mecanismos dirigidos por ondas *Chorus*. O intervalo T1 ocorre ligeiramente após o choque, sendo seguido por uma leve diminuição de fluxo de elétrons. Apesar da maioria dos valores de $\Delta\alpha_\tau$ apresentarem ângulos abaixo de 40° , considera-se a possibilidade de ocorrência de *pitch angle scattering* por ondas *Chorus* durante tal diminuição de fluxo. Por outro lado, o WNA também mostra-se paralelo, sugerindo a contribuição das ondas *Chorus* para aumento localizado.

Figura 7.4 - Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO SN.



Os gráficos de barras representam quantitativamente os valores de $\Delta\alpha_\tau$ em relação aos diversos níveis de energia, englobando seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV) para cada um dos três **Bursts** em cada painel. A legenda indica o horário de ocorrência dos **Bursts** para cada intervalo de tempo. Os três painéis à esquerda correspondem aos **Bursts** no intervalo T1, enquanto os três painéis à direita correspondem ao intervalo T2.

Fonte: Produção autoral.

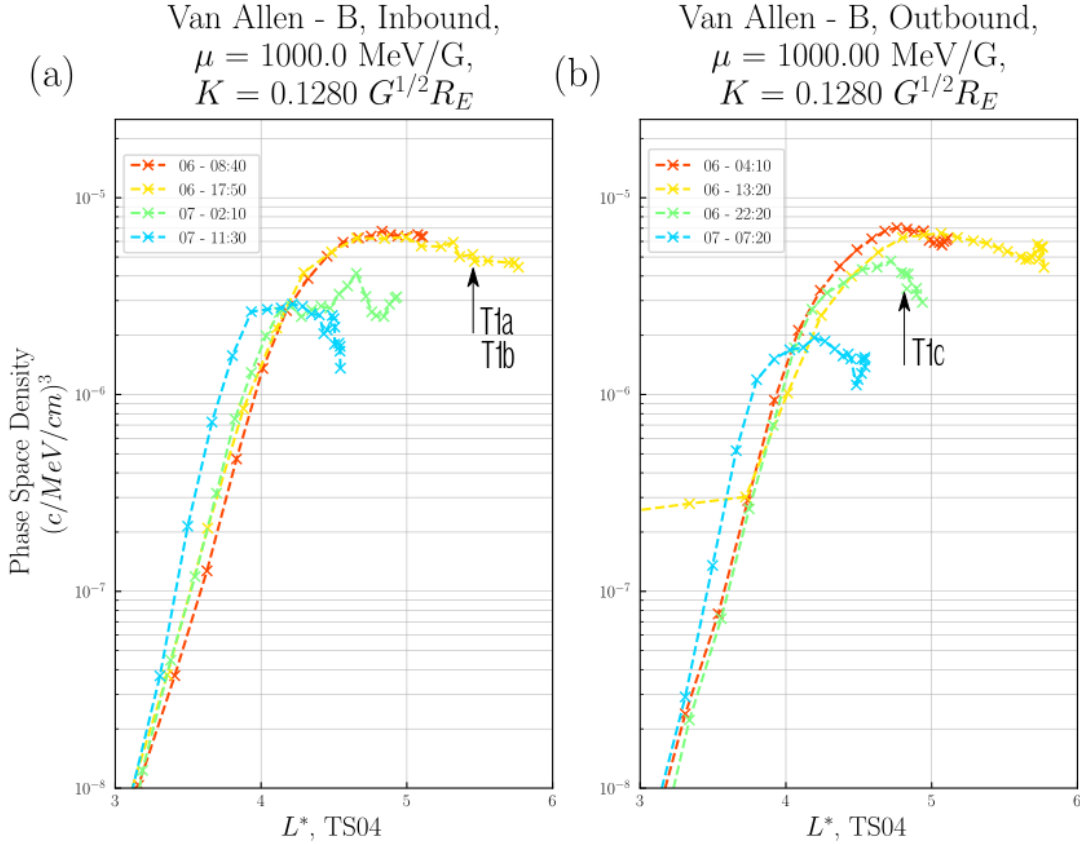
As Figuras 7.6 e 7.5 exibem a variação ao longo do tempo dos perfis PhSD em

relação a L^* , para os intervalos T1 e T2, no CASO SN. Os painéis apresentados nas Figuras 7.5 e 7.6 seguem o mesmo padrão relatado da Figura 7.2.

Na Figura 7.5, avaliando-se a evolução temporal dos perfis *Inbound* para o período T1 não foram encontradas características de variabilidade local acentuada. Os *Bursts* quantificados na bainha magnética da estrutura estavam em *Indound*, período identificado na painel (a) pela curva amarela clara (06 - 17:30), porém o gráfico apresenta uma pequena variabilidade localizada que sugere a participação das ondas *Chorus* nesse leve aumentos (veja a seta preta no painel (a) indicando a região no período em que a sonda Van Allen B encontrava-se em sua fase *Inbound*. A sonda estava localizada na magnetosfera com uma posição aproximada de $MLT \sim 13,8(H)$ e um valor de L^* em torno de 5,5 RE. A razão W_{pe}/W_{ce} apresenta valores perto de 5 nesse período, indicando alta eficiência em interação ressonante entre *Chorus* e elétrons (AGAPITOV et al., 2013; TANG et al., 2017; WANG, 2023).

A órbita representada pela curva verde clara, 06 - 22:20, no painel *Outbound*, corresponde ao intervalo da onda de choque causada pela MC. Durante este período ocorre uma leve redução no gradiente da densidade no espaço de fase para o intervalo a partir de $L^* 4,8$ RE. Esse período contempla o intervalo de identificação dos *Bursts* T1c, que ocorreu em 07 de novembro de 2015 às 01:02:27 UT, durante a fase ascendente da sonda *Outbound*, indicado pela seta preta no painel (b). Nesse momento, a sonda estava localizada na magnetosfera com um valor de L^* próximo a 4,9 RE e sua posição era aproximadamente $MLT \sim 12(H)$. Estes resultados confirmam que as diferentes técnicas convergiram para o mesmo resultado.

Figura 7.5 - Phase Space Density radial profiles: CASO SN - T1.



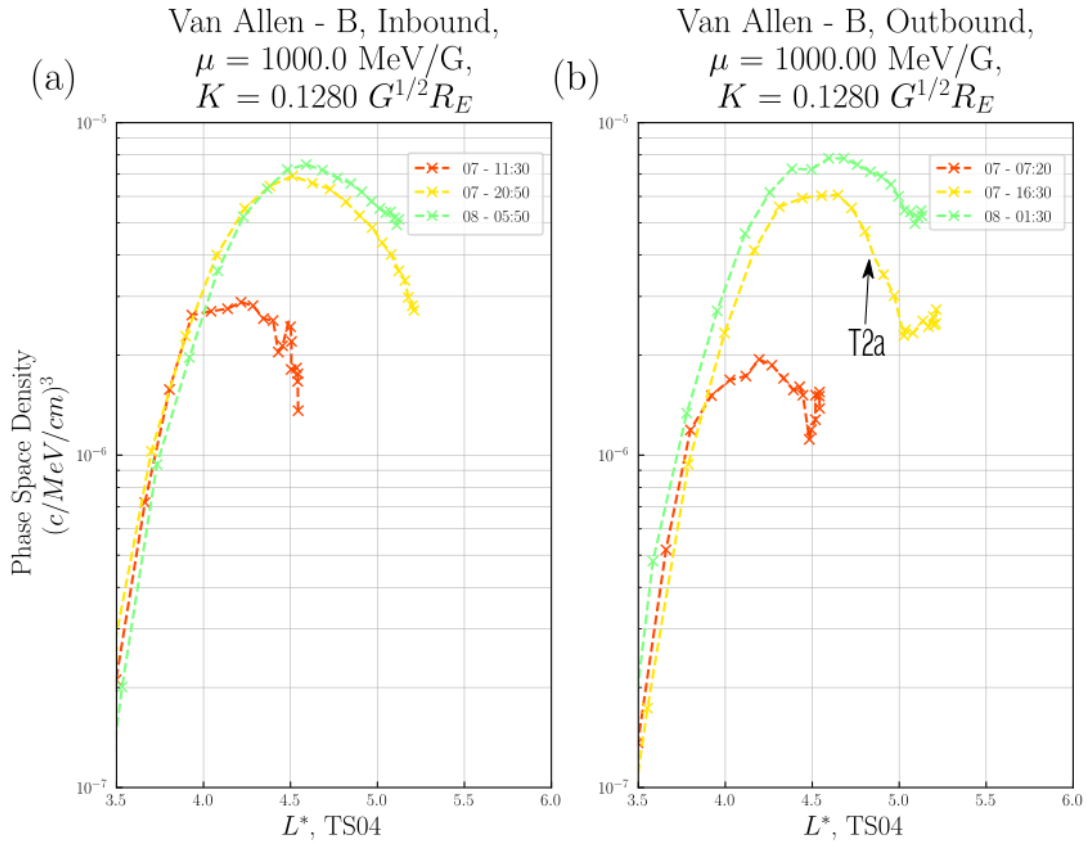
Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

Na Figura 7.5, ao avaliar-se a evolução temporal dos perfis durante o período T2, não foi possível identificar características que evidenciassem variações significativas no fluxo de elétrons em locais específicos. O gráfico não abrange as regiões identificadas no estudo como aquelas com maior atividade de ondas *Chorus* e presença intensa de *Bursts*. Os intervalos T2b e T2c ocorrem em regiões onde a sonda Van Allen B estava a uma distância de L^* superior a $5,2R_E$, intervalo que o PhSD não compreende para o referido período. No intervalo T2a e T2b a sonda estava em *Outbound*, localizada nas posições $MLT \sim 11,5(H)$ e $MLT \sim 12,5(H)$, com L^* de $\sim 4,8R_E$ e $\sim 5,5R_E$, respectivamente. Enquanto no intervalo T2c, a sonda estava em *Inbound*, situada na posição $MLT \sim 14(H)$, com L^* de $\sim 5,2R_E$. No entanto,

o intervalo que compreende a identificação T2a é representado, porém sem fortes assinaturas de variabilidade local, mas com um gradiente decrescente a partir de L^* 4,8 RE, que pode ter sido influenciada pela atividade de ondas *Chorus* no período. A região está identificada pela seta preta na curva amarela (07 -16:30), que representa a órbita em *Outbound* no painel (b). Vale ressaltar que o intervalo T2 abrange um período em que apenas atividades de ondas *Chorus* de banda baixa são detectados, compreendendo uma órbita completa da sonda Van Allen B, desde às 17:00 horas do dia 07 de novembro de 2015 até o final desse mesmo dia. A razão W_{pe}/W_{ce} apresentou valores perto de 5 nesse período sugerindo forte eficiência na interação entre *Chorus* e partículas (AGAPITOV et al., 2013; TANG et al., 2017; WANG, 2023).

Figura 7.6 - Phase Space Density radial profiles: CASO SN - T2.



Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

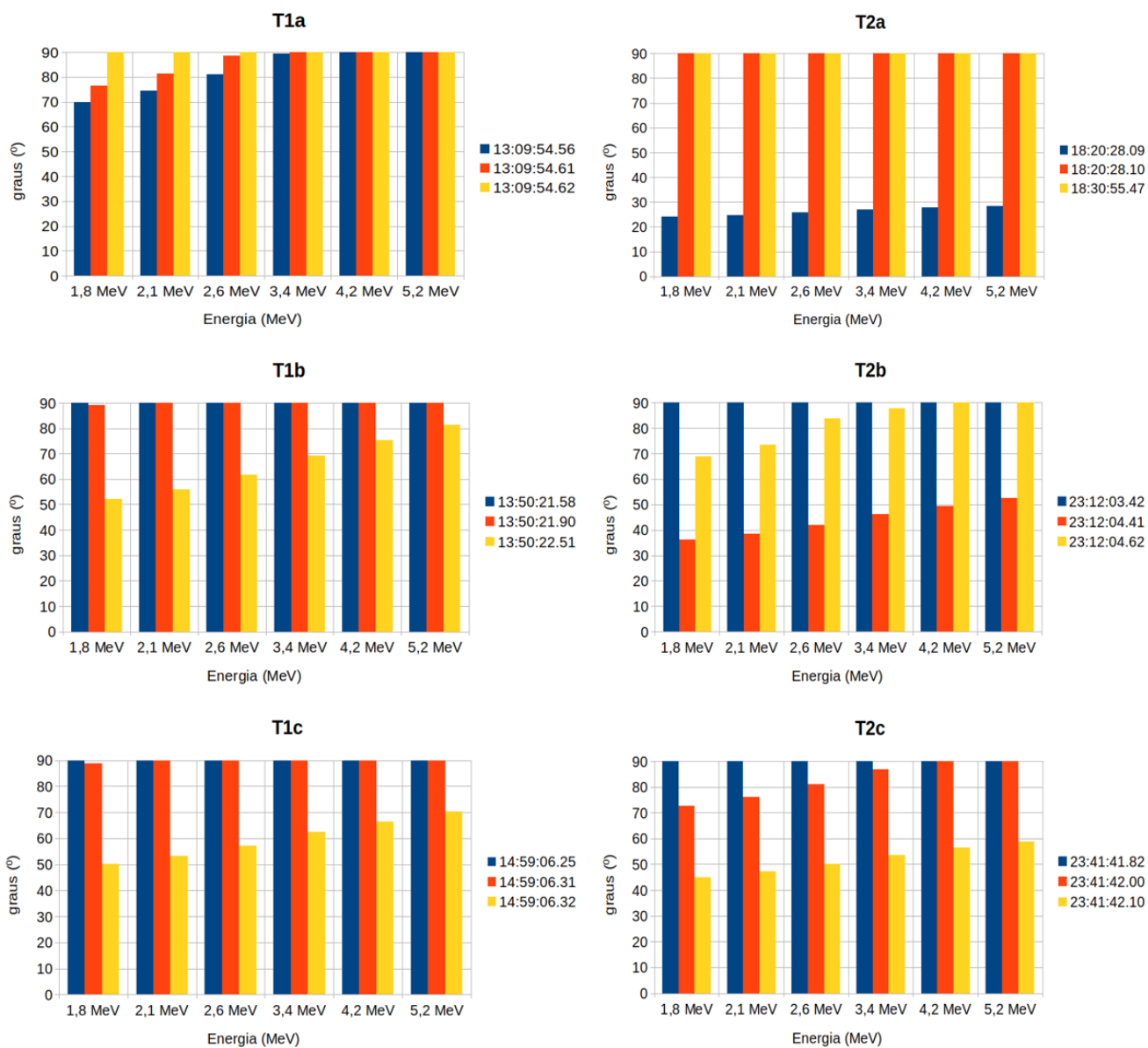
7.3 Caso YS

A Figura 7.7 apresenta os valores calculados para $\Delta\alpha_\tau$. Segue a mesma apresentação descrita na Figura 7.1, considerando a interação entre os pacotes de ondas *Chorus* e os elétrons relativísticos. Foram calculados esses valores para seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV) e eles estão relacionados com cada *Burst* identificado no caso YS.

É notável que os valores de $\Delta\alpha_\tau$ apresentam magnitudes expressivas. Essa característica pode ser explicada ao examinar-se mais detalhadamente a Tabela 6.4, onde se identificam altos valores de amplitudes nos intervalos selecionados, muitos deles sendo iguais ou superiores a 1 nT, com exceção de alguns *Bursts* que não alcançaram essa variação máxima. Mesmo nos intervalos de menor variabilidade $\Delta\alpha_\tau$ as intensidades encontradas para amplitudes desses elementos foram significativas, em torno de 0,6 nT.

O intervalo T1 e T2 para o caso YS contempla, para ambos, período de interação com a MC. Observam-se as maiores amplitudes registradas para os intervalos dentro da MC. A atividade das ondas *Chorus* se mostra com alta variabilidade calculada para $\Delta\alpha_\tau$, principalmente em períodos em que a componente Bz do IMF é predominantemente negativa. O intervalo T1 apresenta prioritariamente atividades de ondas *Chorus* em banda baixa.

Figura 7.7 - Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO YS.



Os gráficos de barras representam quantitativamente os valores de $\Delta\alpha_\tau$ em relação aos diversos níveis de energia, englobando seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV) para cada um dos três **Bursts** em cada painel. A legenda indica o horário de ocorrência dos **Bursts** para cada intervalo de tempo. Os três painéis à esquerda correspondem aos **Bursts** no intervalo T1, enquanto os três painéis à direita correspondem ao intervalo T2.

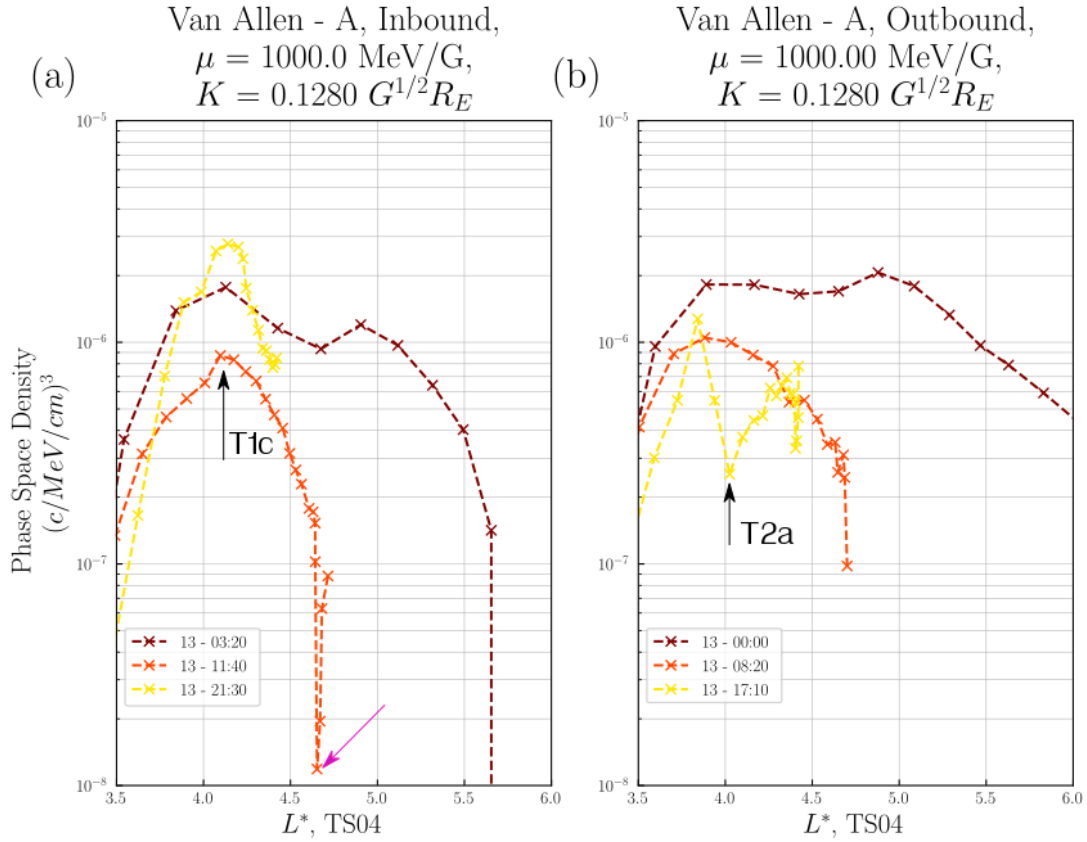
Fonte: Produção autoral.

As Figuras 7.9 e 7.8 exibem a variação ao longo do tempo dos perfis PhSD em

relação a L^* para os intervalos T1 e T2 no CASO YS. Os painéis apresentados nas Figuras 7.8 e 7.9 seguem o mesmo padrão relatado da Figura 7.2, porém para Sonda Van Allen A.

Na Figura 7.8, avaliando-se a evolução temporal dos perfis para o período T1, foram encontradas características de variabilidade local. A seta rosa indica essa região na curva laranja clara (13 - 11:40). Esse intervalo compreende o período da onda de choque causada pela MC, onde foi identificado um *Dropout*. O gradiente da densidade no espaço de fase em comparação com as outras órbitas também ilustra esse comportamento. O período que compreende o intervalo com alta atividade de ondas *Chorus* e região do *Burst* T1c está sinalizado pela seta preta no painel (a), em L^* 4,1 RE. A sonda Van Allen A estava em sua fase *Inbound*, e sua localização na magnetosfera para os intervalos de aquisição dos *Bursts* ocorreu em 13 de outubro de 2016, às 13:09:54.56 UT, 13:50:21.58 UT e 14:59:06.25 UT, aproximadamente entre $MLT \sim 2(H)$ e $MLT \sim 4(H)$. Os valores calculados para a razão W_{pe}/W_{ce} ficaram em torno de 3, o que é favorável para a interação entre as ondas *Chorus* e as partículas na região (AGAPITOV et al., 2013; TANG et al., 2017; WANG, 2023). No painel (b) pode-se identificar um vale na (curva amarela clara 13 - 17:10) onde a órbita da sonda Van Allen A estava em *Outbound*. Essa região também apresentava alta intensidade de ondas *Chorus*, porém o período de atividade ocorria dentro da MC. A seta preta sinaliza a identificação de atividade de *Burst*, identificado no estudo por T2a em L^* 4 RE.

Figura 7.8 - Phase Space Density radial profiles: CASO YS - T1.

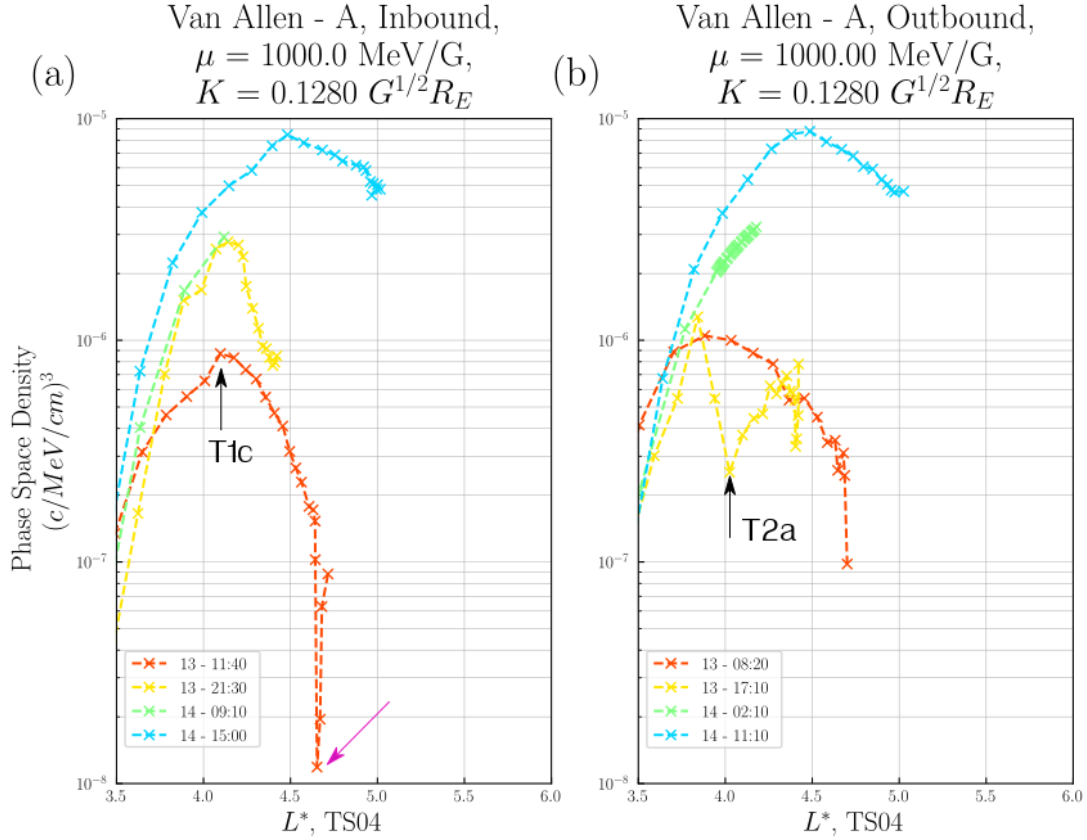


Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

A caracterização apresentada na Figuras 7.8 se repete para algumas órbitas na Figura 7.9. As regiões identificadas como aceleração local para o período que compreende o intervalo com alta atividade de ondas *Chorus* mostram que o PhSD apresentou um acréscimo em uma ordem de grandeza no seu gradiente para L^* externos. O intervalo T2 abrange um período mais espaçado no tempo, ainda dentro do dia 13 de outubro de 2016. No intervalo T2a, a sonda estava em *Outbound*, localizada na posição $MLT \sim 22(H)$ e com L^* de ~ 4 . Já nos intervalos T2b e T2c, a sonda estava em *Inbound*, localizada nas posições $MLT \sim 2(H)$ e $MLT \sim 3(H)$, com L^* de $\sim 4,5 R_E$ e $\sim 4,8 R_E$, respectivamente.

Figura 7.9 - Phase Space Density radial profiles: CASO YS - T2.



Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

7.4 Caso sem MC

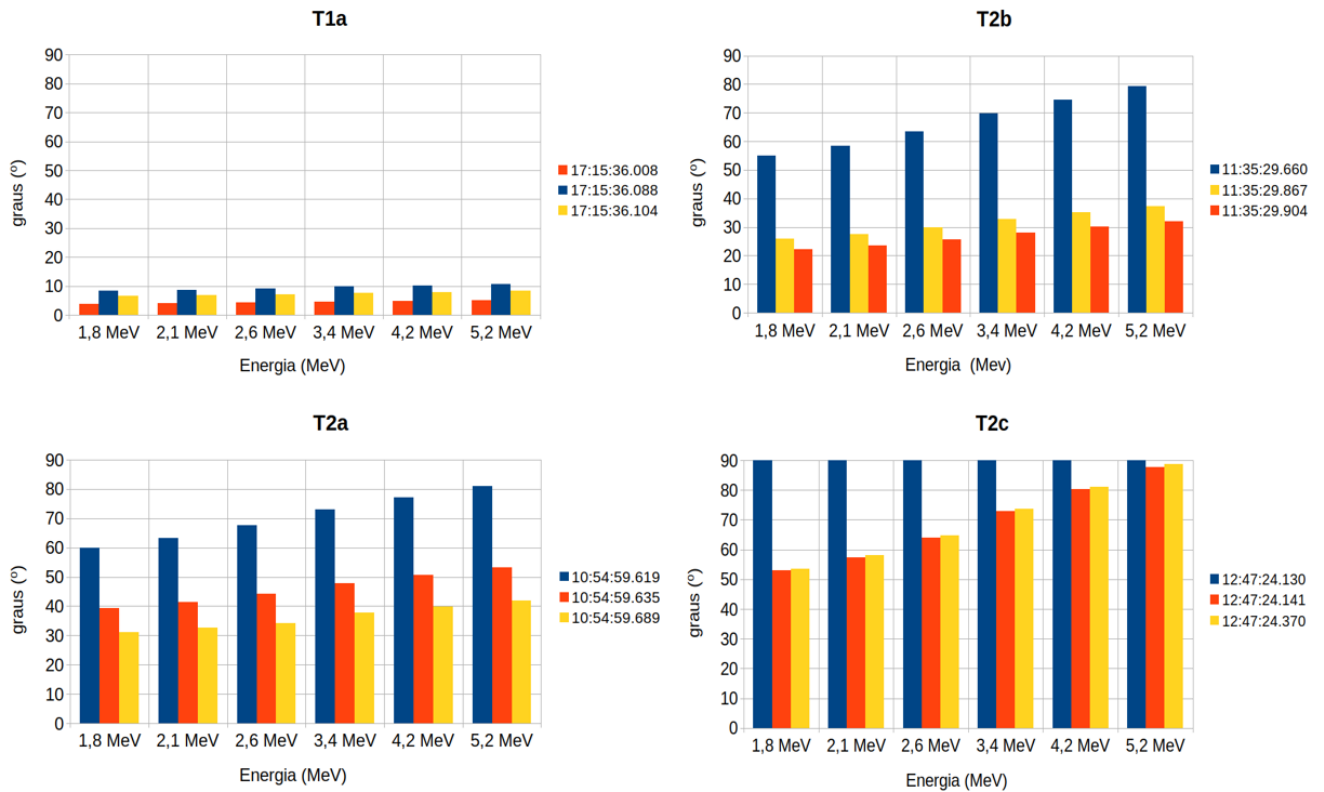
A Figura 7.10 apresenta os valores calculados para $\Delta\alpha_\tau$. Segue a mesma apresentação descrita na Figura 7.1, considerando a interação entre os pacotes de ondas *Chorus* e os elétrons relativísticos. Foram calculados esses valores para seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV) e eles estão relacionados com cada *Burst* identificado no caso sem MC.

Para T1 foi possível a aquisição de apenas um intervalo T1a com três *Bursts*, os quais apresentaram valores de $\Delta\alpha_\tau$, menos intensos quando comparados ao período T2. O instante T1a, quando a sonda estava em uma órbita com $L^* \sim 4,4$, em sua

fase ascendente (*Outbound*). Nesse momento, sua localização na magnetosfera era aproximadamente $MLT \sim 6(H)$. Os intervalos de aquisição dos *Bursts* ocorreram no dia 07 de junho de 2014, às 17:15:36.008 UT, 17:15:36.088 UT e 17:15:36.104 UT, respectivamente, e foram os únicos para o intervalo de aquisição possíveis para o intervalo T1. Também é notável que a eficiência dos pacotes durante essas interações é maior para energias mais altas, mas não ultrapassa 11° na melhor das situações. O *Burst* com maior intensidade atingiu os valores limites. As amplitudes são as mais altas para o período T2c. Entretanto, outros pacotes dentro do mesmo intervalo não alcançaram essa variação máxima, como observado nos *Bursts*, T2c2 e T2c3.

É importante destacar que o intervalo T2 é notavelmente o intervalo em que observa-se as maiores amplitudes registradas para a atividade das ondas *Chorus*, bem como as maiores variabilidades calculadas para $\Delta\alpha_\tau$. Ambos intervalos apresentam atividades de ondas *Chorus* em banda alta e banda baixa, porém particularmente o intervalo T2 apresenta as maiores amplitudes de ondas *Chorus* em banda baixa.

Figura 7.10 - Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO sem MC.



Os gráficos de barras representam quantitativamente os valores de $\Delta\alpha_\tau$ em relação aos diversos níveis de energia, englobando seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV) para cada um dos três **Bursts** em cada painel. A legenda indica o horário de ocorrência dos **Bursts** para cada intervalo de tempo. Os dois painéis à esquerda correspondem aos **Bursts** no intervalos dois primeiros intervalos dos tempos T1 e T2 denominados T1a e T2a, enquanto os dois painéis à direita ainda fazem parte do intervalo T2 e correspondem ao intervalo T2b e T2c.

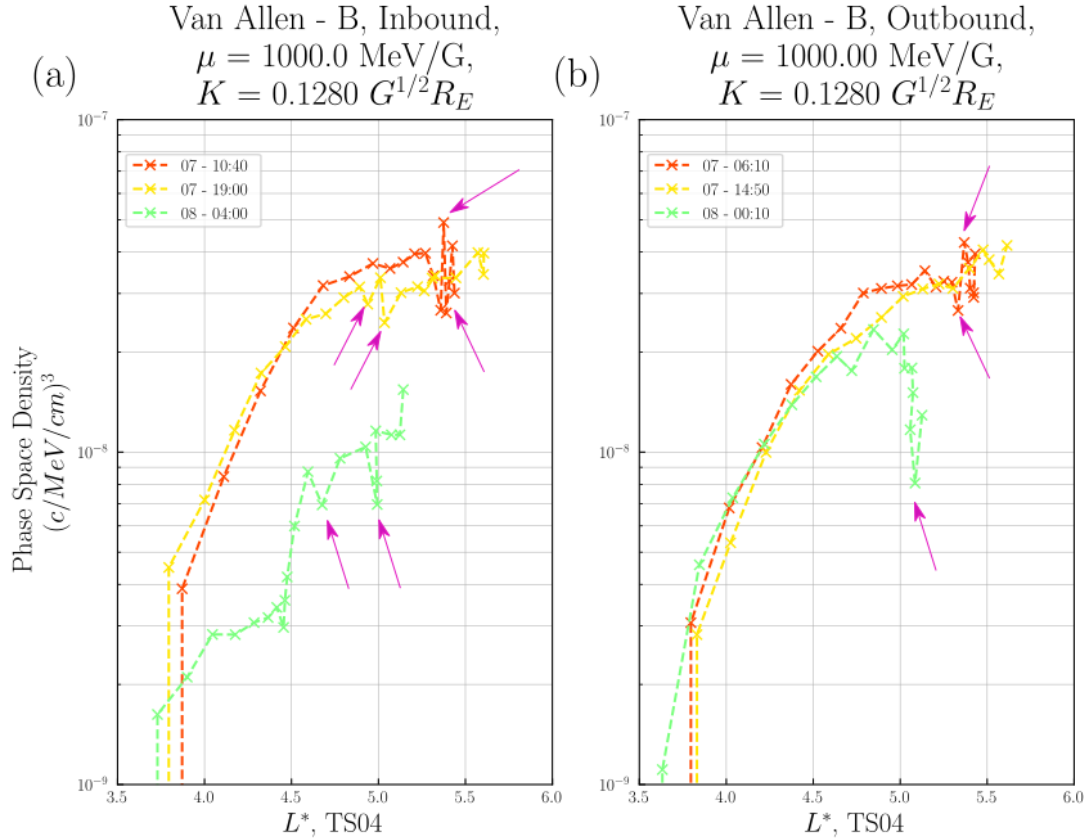
Fonte: Produção autoral.

As Figuras 7.12 e 7.11 exibem a variação ao longo do tempo dos perfis PhSD em relação a L^* para os intervalos T1 e T2, no CASO sem MC. Os painéis apresentados nas Figuras 7.12 e 7.11, seguem o mesmo padrão relatado da Figura 7.2.

Na Figura 7.11, avaliando-se a evolução temporal dos perfis para o período T1, foram encontradas características de variabilidade local. A seta rosa indica essas região. Esses intervalos compreendem os período com alta atividade de ondas *Chorus*. Essas variabilidades são observadas para L^* maiores que 4,4 RE. Essa depleções identificadas compreendem, em sua maioria, vales localizados com recuperações muito rápidas

no PhSD.

Figura 7.11 - Phase Space Density radial profiles: CASO sem MC - T1.

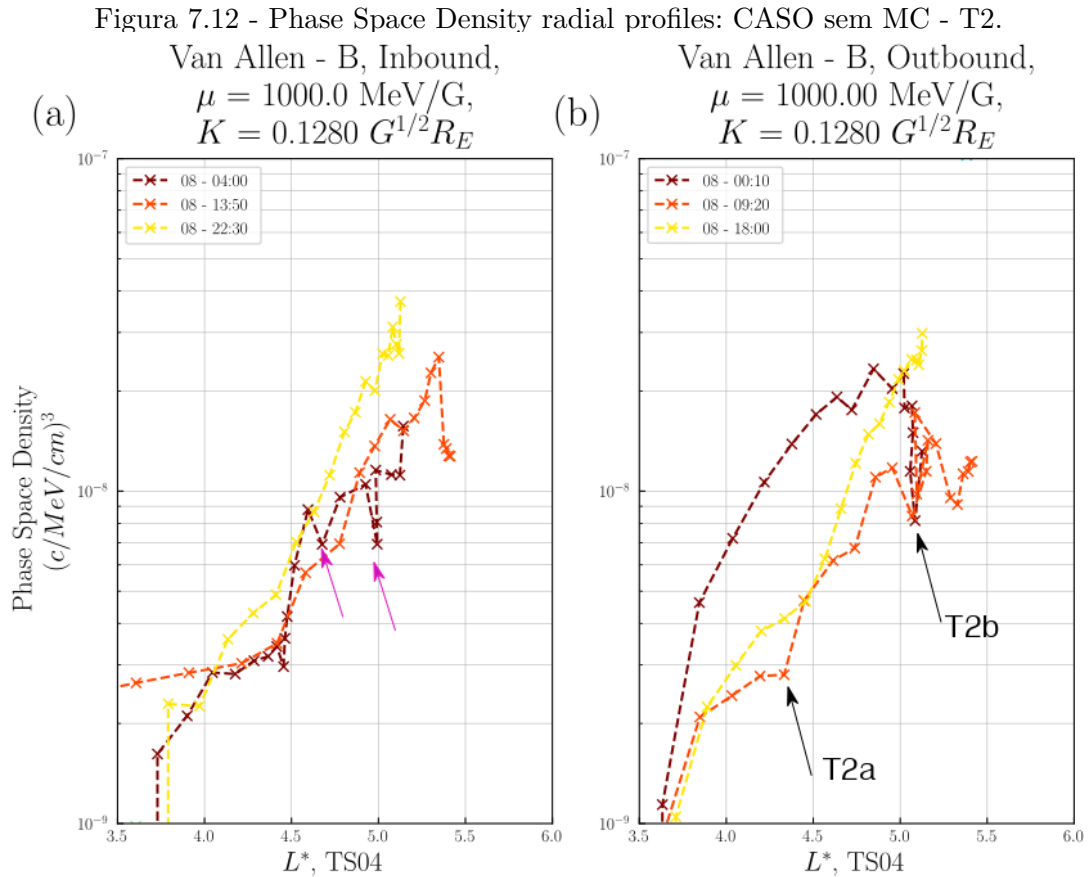


Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

Na Figura 7.12 a avaliação da evolução temporal dos perfis do PhSD para o período T2 remete a características de variabilidade local. As setas pretas indicam dois intervalos T2a e T2b para os períodos onde a atividade de *Burst* mostrava-se mais intensa, sobre a órbita (curva laranja clara - 08 - 9:20) no painel (b), período em que a Sonda Van Allen B estava em *Outbound*. As setas rosas também identificam regiões com alta atividade de ondas *Chorus*, onde observou-se variabilidade local no fluxo de elétrons relativísticos. Essas variabilidades são observadas para L^* situados no cinturão de radiação externo. Nos intervalos T2a, T2b e T2c, a sonda estava em

Outbound, localizada na posição $MLT \sim 6(H)$, $MLT \sim 7(H)$ e $MLT \sim 7,8(H)$ com L^* de $\sim 4,4 \sim 5,1$ e $\sim 5,6$ respectivamente. O intervalo T2c não é contemplado no gráfico.



Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

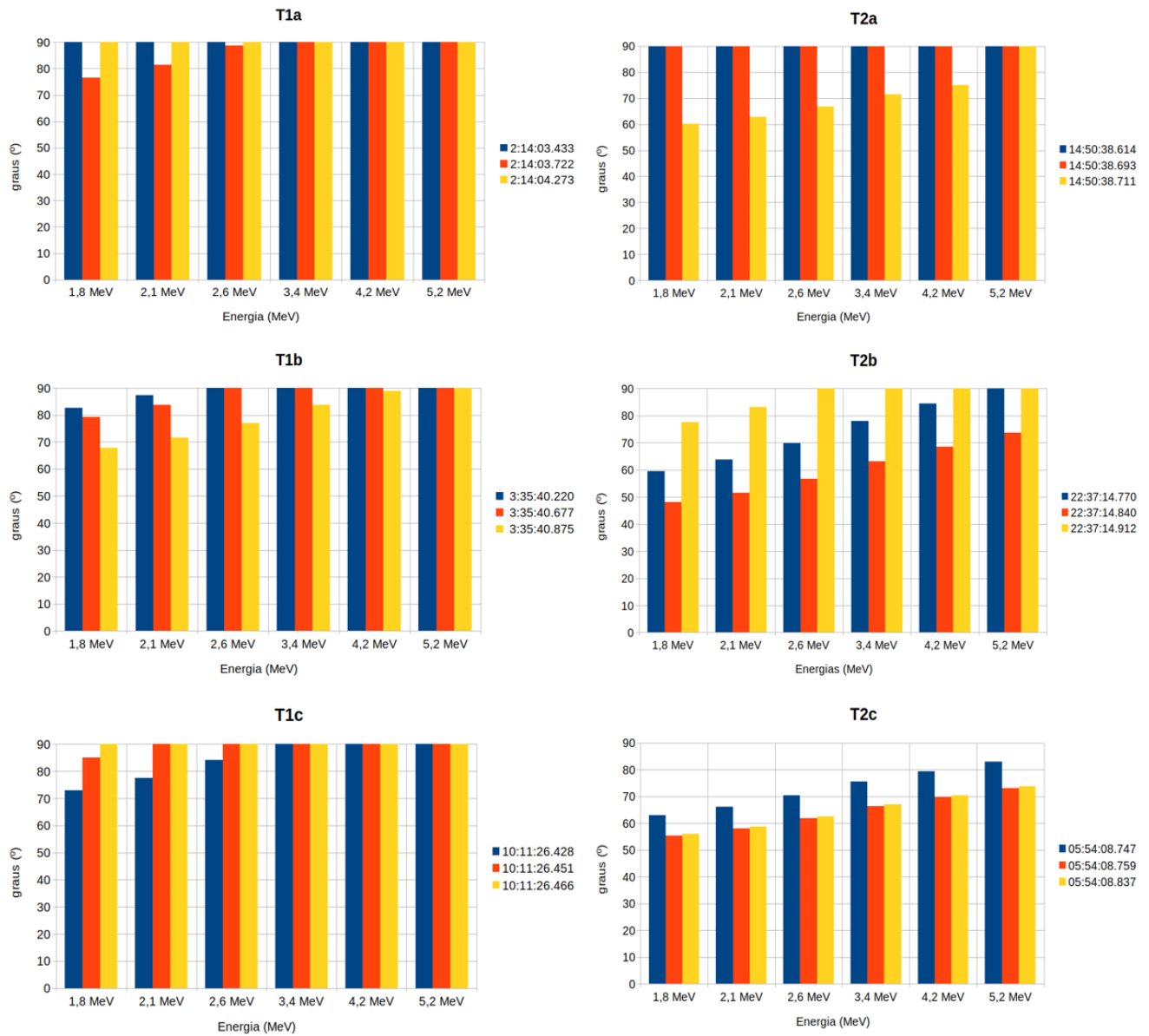
7.5 Caso HSS

A Figura 7.13 apresenta os valores calculados para $\Delta\alpha_r$. Segue a mesma apresentação descrita na Figura 7.1, considerando-se a interação entre os pacotes de ondas *Chorus* e os elétrons relativísticos. Foram calculados esses valores para seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV) e eles estão

relacionados com cada *Burst* identificado no caso HSS.

É notável que os valores de $\Delta\alpha_\tau$ apresentam magnitudes expressivas para todos intervalos de estudo dos *Bursts*. Os *Bursts* atingiram os valores limites, em quase a totalidade dos eventos, salvo o intervalo T2c, o qual apresenta valores de $\Delta\alpha_\tau$ menos intensos quando comparados ao período, mas significativamente altos. O perfil de aumento gradual dos valores de $\Delta\alpha_\tau$ ao longo do aumento da energia calculada também foi encontrado para esse caso.

Figura 7.13 - Valores de $\Delta\alpha_\tau$ por nível de energia relativístico: CASO HSS.



Os gráficos de barras representam quantitativamente os valores de $\Delta\alpha_\tau$ em relação à seis níveis de energia relativística (1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV) para cada um dos três *Bursts* em cada painel. A legenda indica o horário de ocorrência dos *Bursts* para cada intervalo de tempo. Os três painéis à esquerda correspondem aos *Bursts* no intervalo T1, enquanto os três painéis à direita correspondem ao intervalo T2.

Fonte: Produção autoral.

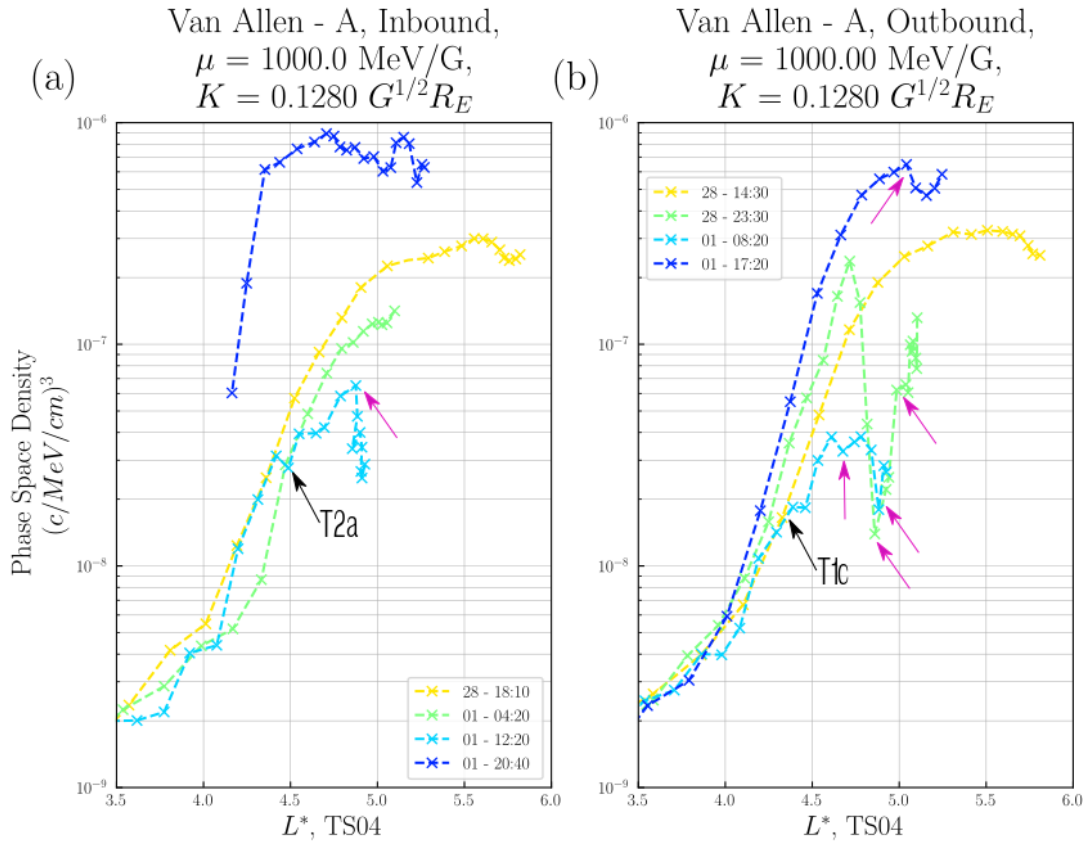
As Figuras 7.15 e 7.14 exibem a variação ao longo do tempo dos perfis PhSD em

relação a L^* para os intervalos T1 e T2 no CASO sem MC. Os painéis apresentados nas Figuras 7.15 e 7.14, seguem o mesmo padrão relatado da Figura 7.2, porém para a Sonda Van Allen A.

Na Figura 7.14 avaliando-se a evolução temporal dos perfis para o período T1 foram encontradas características de variabilidade local. A seta rosa indica essa região. Os intervalos identificais com *Burst* no estudo de caso compreendem L^* maiores que 5,2 RE e não estão representados na Figura 7.11. Nota-se, no intervalo inicial da HSS, órbita referente à curva verde clara (28 - 23:30), painel (b), em que a sonda Van Allen A estava em *Outbound*. Uma queda localizada pode ser observada em L^* 4,6 RE, período o qual compreende alta atividade de ondas *Chorus*. Essa queda é seguida por uma recuperação no PhSD rápida intervalo, sem vale em L^* 4,9 RE. Esse aumento se mantém até L^* perto de 5,1 RE.

No intervalo T1a e T1c, a sonda estava em *Outbound*, posicionada em $MLT \sim 0(H)$ e $MLT \sim 23(H)$ com L^* de aproximadamente 5.2 e 4.5. Apenas o *Burst* é identificado no painel (b) indicado pela seta preta, na órbita representada pela curva laranja clara (01 - 08:20), intervalo que apresenta uma aumento abrupto para o PhSD com característica de variabilidade local. Já no intervalo T2b, a sonda estava localizada em L^* de aproximadamente 5.7RE e sua posições $MLT \sim 1.2(H)$ em fase descendente *Inbound*. Da mesma forma que o intervalo T1a essa região não é representada no gráfico.

Figura 7.14 - Phase Space Density radial profiles: CASO HSS - T1.



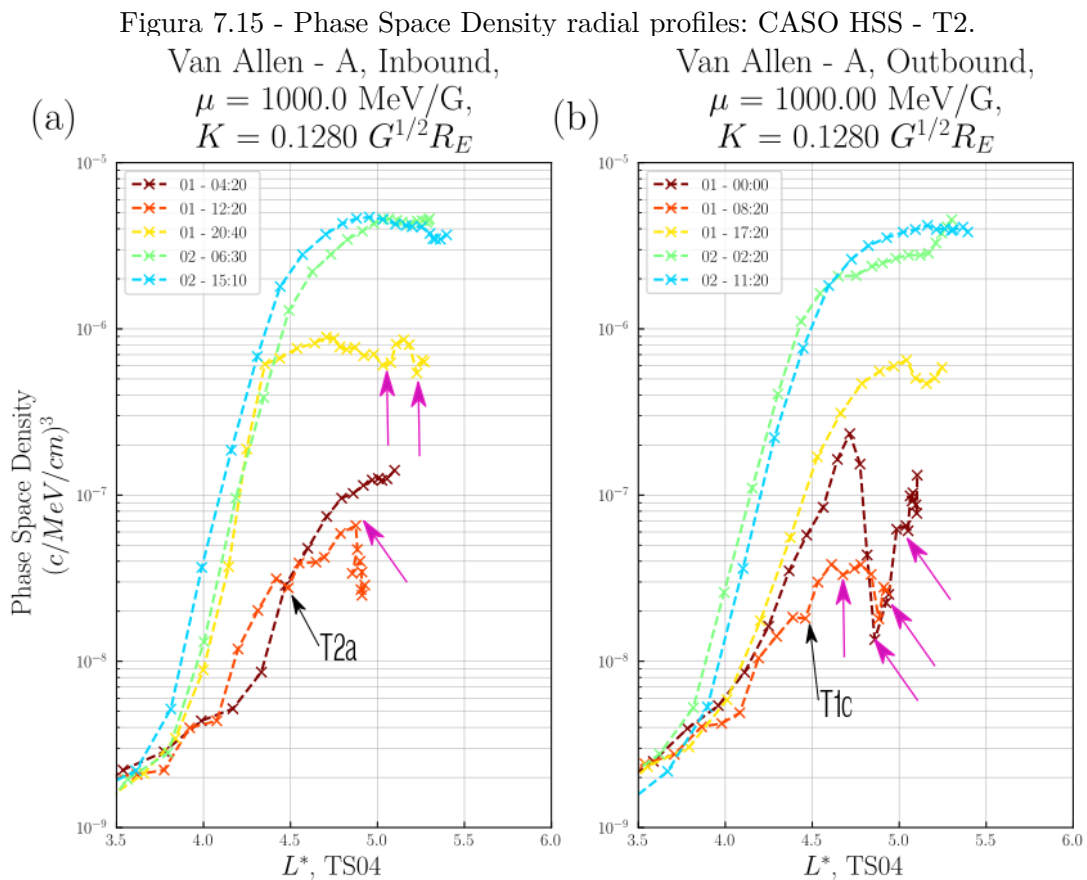
Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

Na Figura 7.12 é apresentada a avaliação do PhSD para o período T2 no estudo de caso HSS. Pode-se observar uma região semelhante àquela descrita na Figura 7.11, com um vale acentuado no painel (b), na órbita representada pela curva marrom escura (01- 00:00). Após a chegada da estrutura à magnetosfera, a atividade de ondas *Chorus* torna-se intensa por um longo período de tempo. Nota-se um aumento consideravelmente alto, em três ordens de grandeza, no PhSD, quando comparado com as duas primeiras órbitas (marrom clara e laranja), em relação às outras órbitas subsequentes.

No intervalo T2a, a sonda estava em *Inbound*, posicionada em $MLT \sim 3(H)$ e com

L^* de aproximadamente 4.5 na região identificada no painel (a) pela seta preta, com a órbita representada pela curva azul clara(01 - 12:20), e apresenta uma depleção leve com característica de variabilidade local. As outras setas na cor rosa também identificam intervalos com essas assinaturas. Isso sugere a influência do mecanismo de *pitch-angle scattering*, por interação de ondas *Chorus*, uma vez que todo período da HSS apresentou alta atividade de ondas *Chorus*. Nos intervalos T2b e T2c, a sonda estava localizada em L^* de aproximadamente 5.4RE e 5.5RE, nas posições $MLT \sim 1.4(H)$ e $MLT \sim 1(H)$, em *Outbound* e *Inbound*, respectivamente.



Evolução temporal dos perfis radiais de densidade do espaço de fase em primeiro ($\mu = 1000 \text{ MeV/G}$) e segundo ($K = 0.128 \text{ G}^{1/2} R_E$) invariantes adiabáticos fixos para ambas as partes: (a) de entrada e (b) de saída da órbita RBSP-B. As inserções nas figuras (a) e (b) mostram o dia e a hora de início (no formato dd/hh:mm) das partes de entrada ou saída do RBSP-B.

Fonte: Produção autoral.

8 CONCLUSÃO

Os resultados desta pesquisa ressaltam que diferentes estruturas interplanetárias têm a capacidade de desencadear atividades de ondas *Chorus*, as quais, por sua vez, demonstram o potencial de acelerar e induzir perdas localizadas em elétrons com níveis de energia relativísticos (SUMMERS; THORNE, 2003; THORNE, 2010; AGAPITOV et al., 2019; DA SILVA et al., 2020; DA SILVA et al., 2021a). Observou-se que as ondas *Chorus*, operando por meio do mecanismo (*pitch-angle scattering*), desencadearam transferência de energia para elétrons relativísticos (ALVES et al., 2017b; DA SILVA et al., 2020; DA SILVA et al., 2021b). Esses efeitos foram particularmente evidenciados na Densidade de Espaço de Fase (PhSD), especialmente em regiões onde a atividade das ondas *Chorus* era intensa, predominantemente no cinturão de radiação externo com potencialidade de interação com elétrons relativísticos (AGAPITOV et al., 2013; ARTEMYEV et al., 2016; BAKER et al., 2016; TANG et al., 2017).

Uma observação relevante foi a alta variabilidade no fluxo de elétrons no cinturão de radiação de Van Allen, que estava notadamente associada a intervalos em que a componente Bz do IMF era negativa (ARYAN et al., 2014). Além disso, durante esses intervalos, foi possível identificar um aumento na amplitude da atividade das ondas *Chorus*, com características que favorecem interações ressonantes por meio do mecanismo de *pitch-angle scattering* (THORNE et al., 2010; AGAPITOV et al., 2019; ARTEMYEV et al., 2016).

Para os casos classificados como ICMEs, notou-se maiores amplitudes de atividade das ondas *Chorus* e valores mais significativos para $\Delta\alpha$, que é um indicador da interação ressonante por ondas *Chorus*. No caso das estruturas MC, as maiores amplitudes, particularmente aquelas maiores que 200 pT, foram observadas dentro da MC, sobretudo quando a componente Bz do IMF era negativa. O caso sem MC também revelou características semelhantes no intervalo T2. A amplificação da atividade das ondas *Chorus* durante esses eventos pode ser atribuída a condições da MC ou ao tempo de interação e resposta da magnetosfera à energia depositada pela estrutura, indicando que a amplificação ocorreu em aproximadamente três órbitas das sondas Van Allen.

Em relação ao evento de HSS, observou-se que as maiores amplitudes estavam concentradas no intervalo T1, com os maiores valores de $\Delta\alpha$ ocorrendo imediatamente após a interação da estrutura com a magnetosfera, corroborando os resultados encontrados por Li et al. (2012). O evento de HSS apresentou maior atividade de

Bursts em comparação com os casos estudados, os quais não foram considerados lineares. Todos os casos mostraram que as maiores amplitudes estavam associadas a variabilidades localizadas no fluxo de elétrons.

Nos eventos de ICMEs analisados, a maior variabilidade do fluxo de elétrons causado pela interação de ondas *Chorus* com os elétrons relativísticos do cinturão de radiação ocorreu quando a região da nuvem magnética estava interagindo com a magnetosfera terrestre, e no caso de HSS, essa interação foi maior na região de interação entre os ventos solares lento e rápido.

Adicionalmente, identificou-se que a competição entre ondas *Chorus* paralelas ($0^\circ - 30^\circ$) e quase oblíquas ($30^\circ - 80^\circ$) desempenhou um papel crucial na variabilidade do fluxo de elétrons no cinturão de radiação (AGAPITOV et al., 2017; ARTEMYEV et al., 2016), com destaque para os casos NS e caso YS. Períodos de competição entre ondas *Chorus* paralelas e quase oblíquas, bem como ondas oblíquas, tiveram um impacto significativo na variabilidade do fluxo, particularmente no cinturão de radiação externo (AGAPITOV et al., 2017; ARTEMYEV et al., 2016), notavelmente observado no caso NS.

A investigação dos parâmetros do meio interplanetário destacou semelhanças nas atividades de ondas *Chorus* em situações de B_z negativo e durante períodos de MC, onde as maiores amplitudes de atividades de ondas *Chorus* foram observadas em todos os casos. Além disso, a identificação de regiões relacionadas ao choque das estruturas com a magnetosfera evidenciou atividades das ondas *Chorus* em todos os casos. O caso sem MC nos mostra que o intervalo T2 também apresenta essa característica. Essa atividade amplificada na atividade das ondas *Chorus*, pode estar relacionada às características morfológicas das MCs, principalmente no que se refere à polaridade da componente B_z , ou ao tempo de interação e resposta de depósito de energia na magnetosfera devido à estrutura como um todo, uma vez que o tempo médio para a amplificação foi de aproximadamente três órbitas das sonda Van Allen. Todos os *Bursts* analisados para estruturas com ICMEs apresentam valores para razão W_{pe}/W_{ce} menores que 5, um dos ingredientes fundamentais para desencadear o mecanismo de *pitch-angle scattering* (AGAPITOV et al., 2013; TANG et al., 2017; WANG, 2023). A tabela apresenta de forma simplificada as principais características para a análise das ondas meio interplanetário e cinturão de radiação, separados em cada um dos intervalos estudados para cada estudo de caso.

A tabela 8 sumariza de maneira concisa as características predominantes do meio interplanetário, incluindo a atividade das ondas *Chorus* e a variabilidade do fluxo de

elétrons no cinturão de radiação. A análise é conduzida nos intervalos T1 e T2 para cada caso estudado, proporcionando uma visão resumida dos aspectos relevantes em cada situação. As informações estão organizadas nas colunas correspondentes ao Meio interplanetário, Ondas Chorus e PhSD.

Tabela 8.1 - Síntese Sumarizada: Resultados dos Estudos de Caso.

	Meio interplanetário		Ondas Chorus		PhSD	
	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>
N-S	-Alta Flutuabilidade na componente Bz do IMF.	-Bz negativo. - MC	-Alta atividade de Bursts. -Banda baixa (0,1 0,5) fce com ondas abaixo de 0,1 fce. -Ondas Oblíquas e Paralelas . - $W_{pe}/W_{ce} < 5$	-Alta atividade de Bursts. -Amplitudes elevadas. -Banda baixa (0,1 0,5) fce com ondas abaixo de 0,1 fce. -Ondas Oblíquas e Paralelas. -Bursts não lineares. - $W_{pe}/W_{ce} < 5$	-Diminuição do Fluxo de elétrons para $L^* > 5$. - Perda localizada. - (pitch-angle scattering).	- Perda localizada. - (pitch-angle scattering).
S-N	-Alta Flutuabilidade na componente Bz do IMF. -Bz negativo.	-Bz positivo. - MC.	-Alta atividade de Bursts. -Banda baixa (0,1 0,5)fce e Banda alta (0,5 0,9)fce. -Competição entre atividade de ondas Oblíquas e Paralelas. - $W_{pe}/W_{ce} < 5$.	-Alta atividade de Bursts. -Amplitudes elevadas. -Banda baixa (0,1 0,5)fce. -Competição entre atividade de ondas Oblíquas e Paralelas. - $W_{pe}/W_{ce} < 5$.	-não abrange as regiões identificadas no estudo com maior atividade de ondas Chorus.	-não abrange as regiões identificadas no estudo com maior atividade de ondas Chorus.
Y-S	-Alta Flutuabilidade na componente Bz do IMF. -Bz negativo.	-Bz negativo. - MC.	-Alta atividade de Bursts. -Banda baixa (0,1 0,5)fce e Banda alta (0,5 0,9)fce com ondas abaixo de 0,1 fce. -Competição entre atividade de ondas Oblíquas e Paralelas. -Bursts não lineares. - $W_{pe}/W_{ce} < 5$	-Alta atividade de Bursts. -Amplitudes elevadas. -Banda baixa (0,1 0,5)fce e Banda alta (0,5 0,9)fce com ondas abaixo de 0,1 fce. -Competição entre atividade de ondas Oblíquas e Paralelas. - $W_{pe}/W_{ce} < 5$	-Dropout. -Perda localizada - (pitch-angle scattering)	- Perda localizada. - (pitch-angle scattering).

Tabela 8.1 - Conclusão.

	Meio interplanetário		Ondas Chorus		PhSD	
	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>
Sem MC	-Alta Flutuabilidade na componente Bz do IMF. -Bz negativo.	-Alta Flutuabilidade na componente Bz do IMF. -Bz negativo.	-Baixa atividade Bursts. -Banda baixa (0,1 0,5)fce e Banda alta (0,5 0,9)fce. - Oblíquas e Paralelas. - $W_{pe}/W_{ce} < 5$	-Alta atividade de Bursts. -Amplitudes elevadas. -Banda baixa (0,1 0,5)fce e Banda alta (0,5 0,9)fce. -Competição entre atividade de ondas Oblíquas e Paralelas. - $W_{pe}/W_{ce} < 5$	-Perda localizada. - (pitch-angle scattering).	-Perda localizada. - (pitch-angle scattering).
HSS	-Alta Flutuabilidade na componente Bz do IMF. -Bz negativo.	-Alta Flutuabilidade na componente Bz do IMF. -Bz negativo.	-Alta atividade de Bursts. -Amplitudes elevadas. -Banda baixa (0,1 0,5)fce e Banda alta (0,5 0,9)fce. -Bursts não lineares. -Competição entre atividade de ondas Oblíquas e Paralelas. - $W_{pe}/W_{ce} < 5$	-Alta atividade de Bursts. -Amplitudes elevadas. -Banda baixa (0,1 0,5)fce e Banda alta (0,5 0,9)fce. -Bursts não lineares. -Competição entre atividade de ondas Oblíquas e Paralelas. - $W_{pe}/W_{ce} < 5$	-Diminuição do Fluxo de elétrons para $L^* > 5$. -Perda localizada. - (pitch-angle scattering).	-Enhancement. -Variabilidade localizada. -(pitch-angle scattering).

Aspectos-chave do meio interplanetário, ondas *Chorus* e variabilidade de elétrons no cinturão de radiação, segmentados nos intervalos T1 e T2 para cada estudo de caso analisado.

Fonte: Produção autoral.

Conclui-se que, em todos os períodos analisados, a partir da chegada da estrutura, as ondas *Chorus*, em especial as oblíquas, desempenham um papel fundamental na perda de elétrons relativísticos do cinturão de radiação externo, por meio do *pitch angle scattering*, concordando com os resultados obtidos por (AGAPITOV et al., 2017; ARTEMYEV et al., 2016).

A análise das características das ondas *Chorus* por meio de diferentes técnicas ajudou a identificar os principais mecanismos dinâmicos responsáveis pela variabilidade do fluxo de elétrons no cinturão de radiação externo durante a influência das diferentes estruturas do vento solar. Os principais observações dessa pesquisa são:

- 1) O PhSD mostra variabilidade localizada, sugerindo a influência do mecanismo *pitch-angle scattering*, o qual é impulsionado pelas ondas *Chorus*.
- 2) Há mudanças concomitantes à atividade de *Bursts* no fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação e nos perfis radiais do PhSD.
- 3) A interação entre ondas *Chorus* e elétrons relativísticos é maior para energias mais altas.
- 4) As maiores amplitudes de ondas *Chorus* foram encontradas para o caso HSS.
- 5) Atividades de ondas *Chorus* em geral mostraram-se mais intensas em banda baixa.
- 6) A razão W_{pe}/W_{ce} mostrou ser um ingrediente assertivo na indicação de condição favorável para a interação ressonante entre elétrons relativísticos nos casos estudados.
- 7) Estruturas do vento solar, como ICMEs e HSSs, têm o potencial de perturbar a dinâmica da magnetosfera externa.
- 8) As ondas *Chorus* podem interagir e ressonar com elétrons no cinturão de radiação, causando perda ou aceleração localizada.
- 10) A atividade de ondas *Chorus* na magnetosfera interna foi significativamente amplificada, especialmente durante períodos em que a componente B_z do IMF estava em situações preferencialmente negativas.
- 11) Houve variações no fluxo de elétrons de alta energia, com perdas associadas a ondas *Chorus* oblíquas e ganhos relacionados a ondas *Chorus* paralelas.

Assimilando-se as visões teóricas e experimentais de autores como (LAKHINA et al., 2010; TSURUTANI et al., 2009; JAYNES et al., 2015; ALVES et al., 2017a; DA SILVA et al., 2020; ALVES et al., 2023) pode-se concluir, que os estudos de casos que apresentam alta atividade de ondas *Chorus* têm uma alta relevância nos processos dinâmicos do cinturão de radiação externo. Porém avaliações mais detalhadas frente a outras atividades de ondas podem ser feitas para conclusões mais assertivas referentes à variabilidade do fluxo de elétrons no cinturão de radiação de Van Allen, bem como um número maior de sub-elementos e *Bursts* pode ser levado em conta, além de estudos estatísticos abrangendo um número maior de estruturas interplanetárias que influenciaram a região, mas tudo indica uma fidedigna relevância das ondas no processo de ganho de energia narrado nos estudo de caso. Muitas portas estão abertas e novas teorias e explicações estão sendo desenvolvidas sobre a região da magnetosfera e as ondas *Whistlers* do modo *Chorus* têm um papel visivelmente notável nisso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGAPITOV, O.; ARTEMYEV, A.; KRASNOSELSKIKH, V.; KHOTYAINTSEV, Y. V.; MOURENAS, D.; BREUILLARD, H.; BALIKHIN, M.; ROLLAND, G. Statistics of whistler mode waves in the outer radiation belt: cluster staff-sa measurements. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, n. 6, p. 3407–3420, 2013. [96](#), [133](#), [135](#), [138](#), [151](#), [152](#)

AGAPITOV, O.; ARTEMYEV, A.; MOURENAS, D.; MOZER, F.; KRASNOSELSKIKH, V. Empirical model of lower band chorus wave distribution in the outer radiation belt. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 12, p. 10–425, 2015. [61](#), [68](#)

AGAPITOV, O.; BLUM, L.; MOZER, F.; BONNELL, J.; WYGANT, J. Chorus whistler wave source scales as determined from multipoint van allen probe measurements. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 6, p. 2634–2642, 2017. [5](#), [76](#), [130](#), [131](#), [152](#), [156](#)

AGAPITOV, O.; MOURENAS, D.; ARTEMYEV, A.; HOSPODARSKY, G.; BONNELL, J. Time scales for electron quasi-linear diffusion by lower-band chorus waves: the effects of ω_{pe}/ω_{ce} dependence on geomagnetic activity. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 12, p. 6178–6187, 2019. [51](#), [67](#), [68](#), [76](#), [78](#), [82](#), [96](#), [121](#), [151](#)

AGAPITOV, O.; MOURENAS, D.; ARTEMYEV, A.; CLAUDEPIERRE, S.; HOSPODARSKY, G.; BONNELL, J. Lifetimes of relativistic electrons as determined from plasmaspheric hiss scattering rates statistics: effects of ω_{pe}/ω_{ce} and wave frequency dependence on geomagnetic activity. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 13, p. e2020GL088052, 2020. [61](#), [130](#), [131](#)

AKASOFU, S.-I.; CHAPMAN, S. Solar-terrestrial physics. 1972. [11](#)

ALLEN, J. A. V.; FRANK, L. A. Radiation around the earth to a radial distance of 107,400 km. **Nature**, v. 183, 1959. [14](#)

ALVES, L.; SILVA, L. D.; SOUZA, V.; SIBECK, D.; JAUER, P.; VIEIRA, L.; WALSH, B.; SILVEIRA, M.; MARCHEZI, J.; ROCKENBACH, M. Outer radiation belt dropout dynamics following the arrival of two interplanetary coronal mass ejections. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 3, p. 978–987, 2016. [2](#), [5](#), [17](#), [40](#), [47](#), [49](#), [50](#)

ALVES, L.; SOUZA, V.; JAUER, P.; SILVA, L. D.; MEDEIROS, C.; BRAGA, C.; ALVES, M.; KOGA, D.; MARCHEZI, J.; MENDONÇA, R. de. The role of solar wind structures in the generation of ulf waves in the inner magnetosphere. **Solar Physics**, v. 292, n. 7, p. 92, 2017b. [2](#), [151](#)

ALVES, L. R.; ALVES, M.; DA SILVA, L. A.; DEGGERONI, V.; JAUER, P. R.; SIBECK, D. G. Relativistic kinematic effects in the interaction time of whistler-mode chorus waves and electrons in the outer radiation belt. **Annales Geophysicae**, v. 41, n. 429–447, 2023. [17](#), [28](#), [48](#), [125](#), [157](#)

ALVES, L. R.; JAUER, P. R.; SOUZA, V.; SILVA, L. D.; MARCHEZI, J.; MEDEIROS, C.; ROCKENBACH, M.; KANEKAL, S.; BAKER, D.; WYGANT, J. Ambient magnetic field weakness during chorus event and their implication on the outer radiation belt dynamic. **AGUFM**, v. 2017, p. SM51B–2453, 2017a. 2, 49, 50, 125, 157

ARTEMYEV, A.; AGAPITOV, O.; MOURENAS, D.; KRASNOSELSKIKH, V.; SHASTUN, V.; MOZER, F. Oblique whistler-mode waves in the earth's inner magnetosphere: energy distribution, origins, and role in radiation belt dynamics. **Space Science Reviews**, v. 200, n. 1-4, p. 261–355, 2016. 39, 41, 42, 51, 130, 151, 152, 156

ARTEMYEV, A. V.; NEISHTADT, A. I.; VASILIEV, A. A.; ZHANG, X.-J.; MOURENAS, D.; VAINCHTEIN, D. Long-term dynamics driven by resonant wave–particle interactions: from hamiltonian resonance theory to phase space mapping. **Journal of Plasma Physics**, v. 87, n. 2, p. 835870201, 2021. 68, 76

ARYAN, H.; YEARBY, K.; BALIKHIN, M.; AGAPITOV, O.; KRASNOSELSKIKH, V.; BOYNTON, R. Statistical study of chorus wave distributions in the inner magnetosphere using ae and solar wind parameters. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 119, n. 8, p. 6131–6144, 2014. 126, 151

ASEEV, N.; SHPRITS, Y.; DROZDOV, A.; KELLERMAN, A.; USANOVA, M.; WANG, D.; ZHELAVSKAYA, I. Signatures of ultrarelativistic electron loss in the heart of the outer radiation belt measured by van allen probes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 10, p. 10–102, 2017. 51

BAKER, D.; KANEKAL, S.; HOXIE, V.; BATISTE, S.; BOLTON, M.; LI, X.; ELKINGTON, S.; MONK, S.; REUKAUF, R.; STEG, S. The relativistic electron-proton telescope (rept) instrument on board the radiation belt storm probes (rbstp) spacecraft: characterization of earth's radiation belt high-energy particle populations. **Space Science Reviews**, v. 179, n. 1-4, p. 337–381, 2013. 1, 29, 30

BAKER, D. N. Satellite anomalies due to space storms. In: DAGLIS, I. A. (Ed.). **Space storms and space weather hazards**. [S.l.]: Springer, 2001. p. 285–311. 1

BAKER, D. N.; JAYNES, A.; KANEKAL, S.; FOSTER, J.; ERICKSON, P.; FENNELL, J.; BLAKE, J.; ZHAO, H.; LI, X.; ELKINGTON, S. Highly relativistic radiation belt electron acceleration, transport, and loss: Large solar storm events of march and june 2015. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 7, p. 6647–6660, 2016. 128, 151

BAKER, D. N.; PULKKINEN, T.; ANGELOPOULOS, V.; BAUMJOHANN, W.; MCPHERRON, R. Neutral line model of substorms: past results and present view. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 101, n. A6, p. 12975–13010, 1996. 33

BAUMJOHANN, W.; TREUMANN, R. **Basic space plasma physics**. [S.l.]: Imperial College, 1996. 1, 14, 24, 25

BAUMJOHANN, W.; TREUMANN, R. A. **Basic space plasma physics**. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, 2012. 1, 11, 12, 13

BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of plasma physics**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. 18

CHEN, F. **Introduction to plasma physics and controlled fusion**. [S.l.]: Plenum Press, 1984. 19

DA SILVA, L.; SHI, J.; ALVES, L.; SIBECK, D.; SOUZA, V.; MARCHEZI, J. P.; MEDEIROS, C.; VIEIRA, L.; AGAPITOV, O.; JAUER, P. R.; ALVES, M. E. S.; WANG, C.; LIU, Z.; A., D. L.; ALVES, M. V.; ROCKENBACH, M. S.; BAKER, D. N.; ZHANG, S. Y.; KANEKAL, S. G. Dynamic mechanisms associated with high-energy electron flux dropout in the earth's outer radiation belt under the influence of a coronal mass ejection sheath region. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, *Accept.*, 2020. 17, 28, 40, 47, 49, 50, 76, 125, 151, 157

DA SILVA, L.; SHI, J.; ALVES, L. R.; SIBECK, D.; SOUZA, V.; MARCHEZI, J.; MEDEIROS, C.; VIEIRA, L.; AGAPITOV, O.; JAUER, P. Dynamic mechanisms associated with high-energy electron flux dropout in the earth's outer radiation belt under the influence of a coronal mass ejection sheath region. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 126, n. 1, 2021. 51, 151

DA SILVA, L.; SHI, J.; ALVES, L. R.; SIBECK, D.; MARCHEZI, J. P.; MEDEIROS, C.; VIEIRA, L. E. A.; AGAPITOV, O.; CARDOSO, F.; SOUZA, V. High-energy electron flux enhancement pattern in the outer radiation belt in response to the alfvénic fluctuations within high-speed solar wind stream: a statistical analysis. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 126, n. 8, p. e2021JA029363, 2021. 17, 125, 151

DA SILVA, L.; SIBECK, D.; ALVES, L. R.; SOUZA, V.; JAUER, P. R.; CLAUDEPIERRE, S. G.; MARCHEZI, J.; AGAPITOV, O.; MEDEIROS, C.; VIEIRA, L. 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. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, n. 3, p. 1660–1678, 2019. 2, 17, 125, 128

DALLAQUA, R. S. **Notas de aula Plasma II**. GEO - Geofísica Espacial, 7 2019. São José dos Campos - SP: INPE. 21

DEGGERONI, V. **estudo do decréscimo no fluxo de elétrons do cinturão de radiação de Van Allen sob influência de ICMEs**. (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.13.16.08-TDI). Dissertação (Mestrado em (Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2019. Disponível em: <<http://www.inpe.br/posgraduacao/ges/arquivos/dissertacoes/dissertacao_vinicius_deggeroni_2019.pdf>>. Acesso em: 2019. 33

ECHER, E. Planetary magnetospheres. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 2, p. 1–7, 2010. 9, 10, 11, 33, 34

ELKINGTON, S. R.; HUDSON, M. K.; CHAN, A. A. Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode pc-5 ulf oscillations. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 21, p. 3273–3276, 1999. 2

ENGBRETSON, M. J.; POSCH, J. L.; BRAUN, D. J.; LI, W.; MA, Q.; KELLERMAN, A.; HUANG, C.-L.; KANEKAL, S. G.; KLETZING, C. A.; WYGANT, J. R. Emic wave events during the four gem qarbm challenge intervals. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 123, n. 8, p. 6394–6423, 2018. 17

FORMISANO, V.; AMATA, E. Solar wind interaction with the earth's magnetic field, 4. preshock perturbation of the solar wind. **Journal of Geophysical Research**, v. 81, n. 22, p. 3907–3912, 1976. 9

FUNG, A.; MOORE, R. Effects of structure size on moon and earth radar returns at various angles. **Journal of Geophysical Research**, v. 69, n. 6, p. 1075–1081, 1964. 5

GARY, G. A. Plasma beta above a solar active region: rethinking the paradigm. **Solar Physics**, v. 203, n. 1, p. 71–86, 2001. 32

GENDRIN, R. Waves and wave-particle interactions in the magnetosphere: a review. **Space Science Reviews**, Springer, v. 18, n. 2, p. 145–200, 1975. 40

GOMBOSI, T. I. **Physics of the space environment**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1998. 13, 14

GONZALEZ, W.; GONZALEZ, A. C.; TSURUTANI, B. Dual-peak solar cycle distribution of intense geomagnetic storms. **Planetary and Space Science**, v. 38, n. 2, p. 181–187, 1990. 34

GONZALEZ, W.; JOSELYN, J.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B.; VASYLIUNAS, V. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 99, n. A4, p. 5771–5792, 1994. 5

GURNETT, D.; O'BRIEN, B. High-latitude geophysical studies with satellite injun 3: 5. very-low-frequency electromagnetic radiation. **Journal of Geophysical Research**, v. 69, n. 1, p. 65–89, 1964. 2, 5

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. 14

HARTLEY, D.; DENTON, M. Solving the radiation belt riddle. **Astronomy & Geophysics**, v. 55, n. 6, p. 6–17, 2014. 52

HORNE, R.; GLAUERT, S.; THORNE, R. Resonant diffusion of radiation belt electrons by whistler-mode chorus. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 9, 2003. 40, 51, 68, 76, 78, 82, 96, 121

HORNE, R.; THORNE, R. Relativistic electron acceleration and precipitation during resonant interactions with whistler-mode chorus. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 10, 2003. 125

HORNE, R. B.; THORNE, R. M.; SHPRITS, Y. Y.; MEREDITH, N. P.; GLAUERT, S. A.; SMITH, A. J.; KANEKAL, S. G.; BAKER, D. N.; ENGBRETSON, M. J.; POSCH, J. L. Wave acceleration of electrons in the van allen radiation belts. **Nature**, v. 437, n. 7056, p. 227–230, 2005. 125

JAYNES, A. N.; BAKER, D. N.; SINGER, H. J.; RODRIGUEZ, J. V.; LOTO'ANIU, T.; ALI, A.; ELKINGTON, S. R.; LI, X.; KANEKAL, S. G.; CLAUDEPIERRE, S. G. Source and seed populations for relativistic electrons: Their roles in radiation belt changes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 9, p. 7240–7254, 2015. 5, 125, 157

KAMIDE, Y.; CHIAN, A. C.-L. **Handbook of the solar-terrestrial environment**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. 1, 5, 11, 18, 21

KATAOKA, R.; MIYOSHI, Y. Flux enhancement of radiation belt electrons during geomagnetic storms driven by coronal mass ejections and corotating interaction regions. **Space Weather**, v. 4, n. 9, 2006. 30, 31, 34

KENNEL, C. F.; PETSCHKE, H. Limit on stably trapped particle fluxes. **Journal of Geophysical Research**, v. 71, n. 1, p. 1–28, 1966. 5

KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. **Introduction to space physics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1995. 1, 2, 9

KIVELSON, M. G.; SOUTHWOOD, D. J. Resonant ulf waves: a new interpretation. **Geophysical Research Letters**, v. 12, n. 1, p. 49–52, 1985. 2

KLEIN, L. W. B. L. F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU. **Journal of Geophysics**, v. 87, n. 12, p. 613–624, 1982. 32

KLETZING, C. et al. The electric and magnetic field instrument suite and integrated science (emfisis) on rbsp. **Space Science Reviews**, v. 179, n. 1-4, p. 127–181, 2013. 29, 44

LAGO, A. D. **Estudo de nuvens magnéticas geofetivas no meio interplanetário**. Dissertação, São José dos Campos, 1999. 32

LAKHINA, G.; TSURUTANI, B.; VERKHOGLYADOVA, O.; PICKETT, J. Pitch angle transport of electrons due to cyclotron interactions with the coherent chorus subelements. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A8, 2010. 1, 3, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 27, 47, 157

LI, W.; THORNE, R.; ANGELOPOULOS, V.; BORTNIK, J.; CULLY, C. M.; NI, B.; LECONTEL, O.; ROUX, A.; AUSTER, U.; MAGNES, W. Global distribution of whistler-mode chorus waves observed on the themis spacecraft. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 9, 2009. 23, 33, 50

LI, W.; THORNE, R.; BORTNIK, J.; MCPHERRON, R.; NISHIMURA, Y.; ANGELOPOULOS, V.; RICHARDSON, I. G. Evolution of chorus waves and their source electrons during storms driven by corotating interaction regions. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 117, n. A8, 2012. 151

LI, X.; SELESNICK, R.; BAKER, D.; JAYNES, A.; KANEKAL, S.; SCHILLER, Q.; BLUM, L.; FENNELL, J.; BLAKE, J. Upper limit on the inner radiation belt mev electron intensity. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, n. 2, p. 1215–1228, 2015. 5, 11, 44

MARCHEZI, J. P.; DAI, L.; ALVES, L. R.; SILVA, L. A. D.; SIBECK, D. G.; LAGO, A. D.; SOUZA, V.; JAUER, P.; VEIRA, L.; CARDOSO, F. Electron flux variability and ultra-low frequency wave activity in the outer radiation belt under the influence of interplanetary coronal mass ejections and high-speed solar wind streams: a statistical analysis from the van allen probes era. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 127, n. 8, p. e2021JA029887, 2022. 17

MEREDITH, M. P.; WATKINS, J. L.; MURPHY, E. J.; CUNNINGHAM, N. J.; WOOD, A. G.; KORB, R.; WHITEHOUSE, M. J.; THORPE, S. E.; VIVIER, F. An anticyclonic circulation above the northwest georgia rise, southern ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 20, 2003. 50

MEREDITH, N. P.; HORNE, R. B.; BORTNIK, J.; THORNE, R. M.; CHEN, L.; LI, W.; SICARD-PIET, A. Global statistical evidence for chorus as the embryonic source of plasmaspheric hiss. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 12, p. 2891–2896, 2013. 16

MEREDITH, N. P.; HORNE, R. B.; THORNE, R. M.; ANDERSON, R. R. Favored regions for chorus-driven electron acceleration to relativistic energies in the earth's outer radiation belt. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 16, 2003. 5

MURPHY, K. R.; WATT, C.; MANN, I. R.; RAE, I. J.; SIBECK, D. G.; BOYD, A.; FORSYTH, C.; TURNER, D.; CLAUDEPIERRE, S.; BAKER, D. The global statistical response of the outer radiation belt during geomagnetic storms. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 9, p. 3783–3792, 2018. 51

NI, B.; YAN, L.; FU, S.; GU, X.; CAO, X.; XIANG, Z.; ZHANG, Y. Distinct formation and evolution characteristics of outer radiation belt electron butterfly pitch angle distributions observed by van allen probes. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 4, p. e2019GL086487, 2020. ix, 44, 46, 59, 60, 75, 89, 101, 114

PIZZELLA, G.; LAUGHLIN, C.; O'BRIEN, B. J. Note on the electron energy spectrum in the inner van allen belt. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, n. 9, p. 3281–3287, 1962. 1, 12

- REEVES, G. et al. Electron acceleration in the heart of the van allen radiation belts. **American Association for the Advancement of Science**, v. 341, n. 6149, p. 991–994, 2013. 16
- RICHARDSON, I.; CANE, H. Near-earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): catalog and summary of properties. **Solar Physics**, v. 264, n. 1, p. 189–237, 2010. 33, 53
- ROBERTS, C. S. Pitch-angle diffusion of electrons in the magnetosphere. **Reviews of Geophysics**, v. 7, n. 1-2, p. 305–337, 1969. 14, 24
- ROEDERER, J. G.; ZHANG, H. **Dynamics of magnetically trapped particles**. [S.l.]: Springer, 2016. 1
- ROSTOKER, G. Geomagnetic indices. **Reviews of Geophysics**, Wiley Online Library, v. 10, n. 4, p. 935–950, 1972. 30
- SANTOLIK, O.; GURNETT, D.; PICKETT, J.; PARROT, M.; CORNILLEAU-WEHRLIN, N. Spatio-temporal structure of storm-time chorus. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 108, n. A7, 2003. 21, 22, 30, 41, 42, 43, 44, 179
- SANTOLÍK, O.; KLETZING, C.; KURTH, W.; HOSPODARSKY, G.; BOUNDS, S. Fine structure of large-amplitude chorus wave packets. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 2, p. 293–299, 2014. 43, 44
- SANTOLÍK, O.; MACÚŠOVÁ, E.; KOLMAŠOVÁ, I.; CORNILLEAU-WEHRLIN, N.; CONCHY, Y. de. Propagation of lower-band whistler-mode waves in the outer van allen belt: systematic analysis of 11 years of multi-component data from the cluster spacecraft. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 8, p. 2729–2737, 2014. 23, 43, 44, 179
- SHPRITS, Y. Y.; SUBBOTIN, D.; NI, B. Evolution of electron fluxes in the outer radiation belt computed with the verb code. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 114, n. A11, 2009. 50
- SOUZA, V. M.; LOPEZ, R.; JAUER, P. R.; SIBECK, D.; PHAM, K.; SILVA, L. D.; MARCHEZI, J. P.; ALVES, L. R.; KOGA, D.; MEDEIROS, C. Acceleration of radiation belt electrons and the role of the average interplanetary magnetic field bz component in high-speed streams. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 10, p. 10–084, 2017. 17, 51, 125
- SPJELDVIK, W.; ROTHWELL, P. The radiation belts. In: AIR FORCE GEOPHYSICS LABORATORY (Ed.). **Handbook of Geophysics and the Space Environment**. Washington, DC: Air Force, 1985. p. 5–1. 12, 13
- STONE, E. C.; FRANSEN, A.; MEWALDT, R.; CHRISTIAN, E.; MARGOLIES, D.; ORMES, J.; SNOW, F. The advanced composition explorer. **Space Science Reviews**, v. 86, n. 1-4, p. 1–22, 1998. 29

- SUMMERS, D.; THORNE, R. M. Relativistic electron pitch-angle scattering by electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 108, n. A4, 2003. [25](#), [27](#), [50](#), [151](#)
- TANG, C.; WANG, Y.; NI, B.; SU, Z.; REEVES, G. D.; ZHANG, J.-C.; BAKER, D.; SPENCE, H.; FUNSTEN, H. O.; BLAKE, J. The effects of magnetospheric processes on relativistic electron dynamics in the earth's outer radiation belt. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 10, p. 9952–9968, 2017. [96](#), [133](#), [135](#), [138](#), [151](#), [152](#)
- TAUBENSCHUSS, U.; KHOTYAINTSEV, Y. V.; SANTOLÍK, O.; VAIVADS, A.; CULLY, C. M.; CONTEL, O. L.; ANGELOPOULOS, V. Wave normal angles of whistler mode chorus rising and falling tones. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 119, n. 12, p. 9567–9578, 2014. [41](#), [42](#), [43](#), [44](#), [179](#)
- THORNE, R. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus. **Nature**, v. 504, n. 7480, p. 411–414, 2013. [17](#), [40](#), [125](#)
- THORNE, R. M. Radiation belt dynamics: the importance of wave-particle interactions. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 22, 2010. [3](#), [10](#), [151](#)
- THORNE, R. M.; NI, B.; TAO, X.; HORNE, R. B.; MEREDITH, N. P. Scattering by chorus waves as the dominant cause of diffuse auroral precipitation. **Nature**, v. 467, n. 7318, p. 943–946, 2010. [3](#), [125](#), [151](#)
- TSURUTANI, B. T.; LAKHINA, G. S. Some basic concepts of wave-particle interactions in collisionless plasmas. **Reviews of Geophysics**, v. 35, n. 4, p. 491–501, 1997. [23](#), [25](#), [26](#)
- TSURUTANI, B. T.; SMITH, E. J. Postmidnight chorus: a substorm phenomenon. **Journal of Geophysical Research**, v. 79, n. 1, p. 118–127, 1974. [1](#), [5](#), [21](#)
- _____. Two types of magnetospheric elf chorus and their substorm dependences. **Journal of Geophysical Research**, v. 82, n. 32, p. 5112–5128, 1977. [2](#), [11](#)
- TSURUTANI, B. T.; VERKHOGLYADOVA, O. P.; LAKHINA, G. S.; YAGITANI, S. Properties of dayside outer zone chorus during hildcaa events: loss of energetic electrons. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 114, n. A3, 2009. [28](#), [41](#), [42](#), [49](#), [157](#)
- TURNER, D. L.; LI, X.; REEVES, G. D.; SINGER, H. J. On phase space density radial gradients of earth's outer-belt electrons prior to sudden solar wind pressure enhancements: results from distinctive events and a superposed epoch analysis. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 115, n. A1, 2010. [50](#)
- VERKHOGLYADOVA, O.; TSURUTANI, B.; LAKHINA, G. Theoretical analysis of poynting flux and polarization for elf-vlf electromagnetic waves in the earth's magnetosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, n. 12, p. 7695–7702, 2013. [42](#)

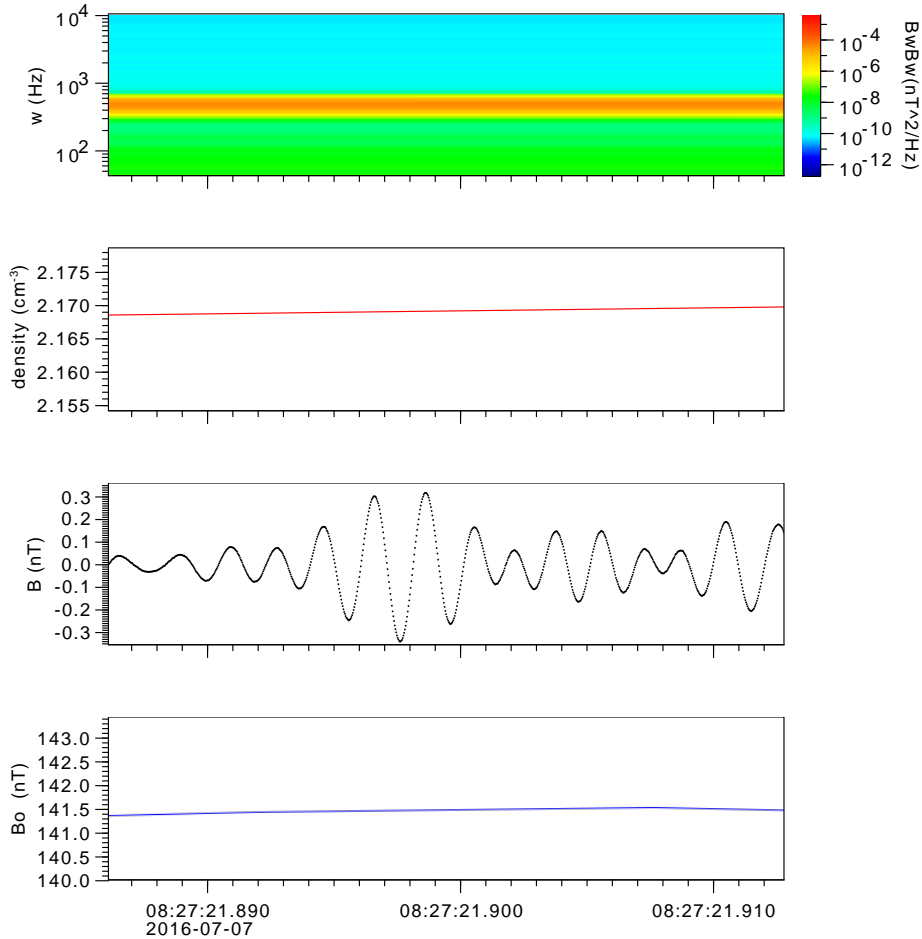
WANG, Y. The wave-particle interactions between chorus waves and electrons in the earth radiation belts. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2441, n. 1, p. 012036, 2023. 67, 68, 78, 82, 96, 121, 122, 130, 133, 135, 138, 152

WORLD DATA CENTER FOR GEOMAGNETISM, KYOTO. **The index AE,AL,AU,AO used in this paper/presentation was provided by the WDC for Geomagnetism, Kyoto**: World data center for geomagnetism, kyoto, m. nose, t. iyemori, m. sugiura, t. kamei (2015), geomagnetic ae index, doi:10.17593/15031-54800. 2020. Online; 14-maio-2020. Disponível em: <<<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>>>. 177

YUAN, Z.; YAO, F.; YU, X.; HUANG, S.; OUYANG, Z. An automatic detection algorithm applied to fast magnetosonic waves with observations of the van allen probes. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 124, n. 5, p. 3501–3511, 2019. 43

APÊNDICE A

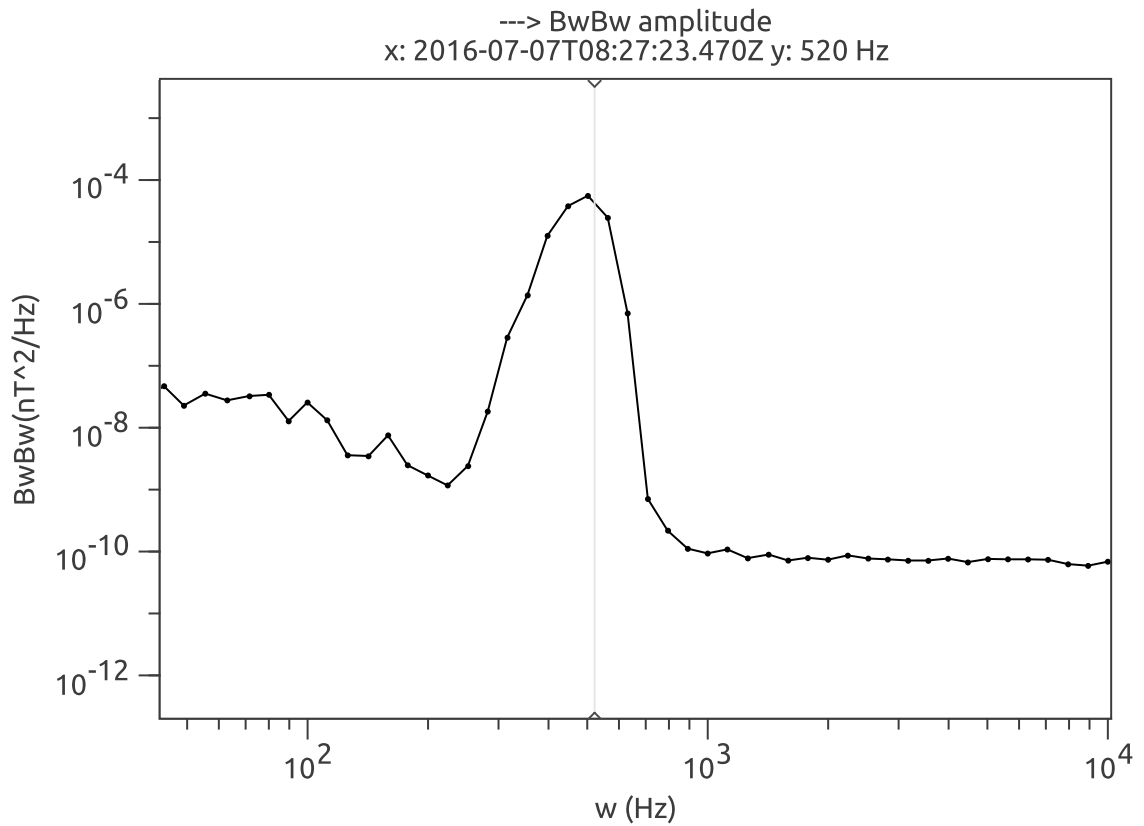
Figura A.1 - Parâmetros utilizados no cálculo de $\Delta\alpha$.



Parâmetros relevantes para construção das tabelas dos parâmetros dos *Bursts* no Capítulo 6. Todos os gráficos foram medidos pela sonda *Van Allen Probes B* para o intervalo de tempo de $37(ms)$, das 08:27:21.885 UT até 08:27:21.913 UT do dia 07 de julho de 2016. De cima para baixo é apresentado o espectrograma de campo magnético medido pelo instrumento EMFISIS-(MAG), no qual o mapa de cor representa a densidade por $BwBw(nT^2/Hz)$ e o eixo $f(Hz)$, a frequência. A relação $(BwBwXw)$ para esse instante está no Anexo 1: *density*, o qual refere-se à densidade de partículas na região em cm^3 , medida pelo instrumento EMFISIS-(ETC), praticamente constante para o intervalo de tempo; B trata-se da variação no campo magnético local em alta resolução, medido pelo instrumento EMFISIS-(EVW) ou B em (nT) , e, por último, o campo magnético B_o em (nT) , local praticamente constante medido pelo instrumento REPT para o intervalo de tempo.

Fonte: Produção autoral.

Figura A.2 - Densidade no campo magnético em relação a frequência.



UIOWA 20200426

Gráfico derivado da Figura 6.1, no qual o pico com maior densidade no campo magnético $BwBw(nT^2/Hz)$ foi utilizado para estimar o valor de $W(Hz)$, atribuindo-se assim $\omega(Hz)$, usada na Tabela 6.1.

Fonte: Produção autoral.

APÊNDICE B

As nuvens magnéticas estão classificadas de 3 formas: N-S (componente B_z rotacionando de norte para sul), S-N (B_z rotacionando do sul para o norte), Y-S (componente B_y rotacionando de leste a oeste ou oeste a leste, com o componente B_z na direção sul).

A região compreendida entre as linhas verticais verde e primeira linha rosa indica o local da lâmina entre a nuvem e a onda de choque, o qual é gerado pela expansão da própria nuvem e interação com o vento solar, notável pelo salto abrupto nos parâmetros do vento solar, bem como variações bruscas nas componentes do campo magnético interplanetário, ao final do dia 12 de novembro de 2012. A região interna da nuvem, delimitada pelas linhas verticais em rosa, está evidenciada nesse caso principalmente pela queda no parâmetro β , último painel. Esse intervalo, o qual sugere uma rotação na componente Z do campo magnético, observada em B_z , está grafado em vermelho. A rotação passa de valores $20nT$ para $-20nT$. O módulo de $|B|$ no intervalo é praticamente constante. Ocorre uma rotação em B_x , mas B_y varia praticamente junto com $|B|$ na nuvem, o que, pela definição proposta, classifica tal evento como Nuvem Magnética N-S.

Figura B.1 - Exemplo de dados para uma nuvem magnética, N-S (componente Bz girando de Norte a Sul).

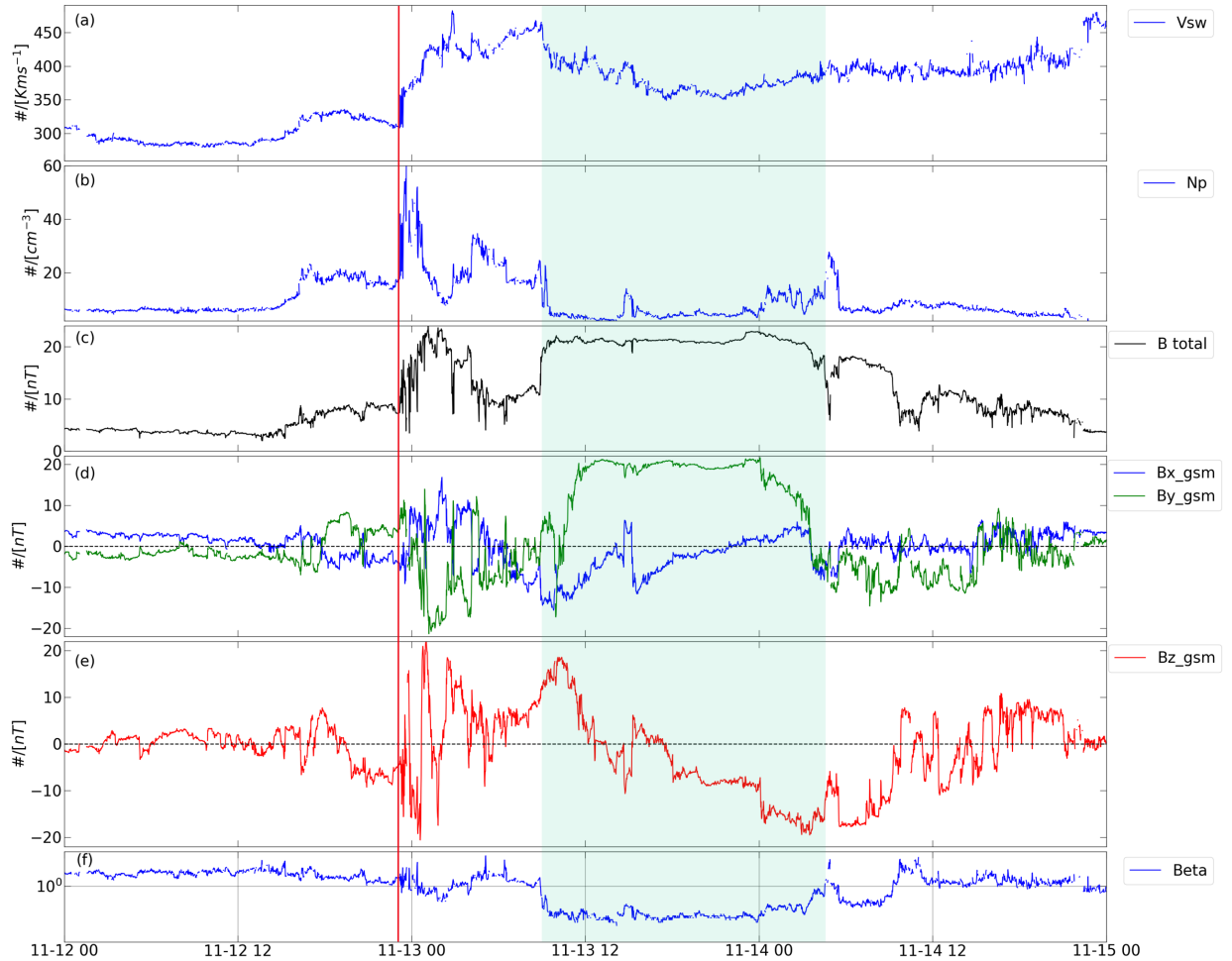


Gráfico temporal para um evento de CME no dia 12 de novembro de 2012. Na ordem de cima para baixo tem-se: representação da velocidade do vento solar V_{sw} em Km/s, densidade de partículas N_p em cm^{-3} , temperatura de íons T_p em K, seguida do campo magnético interplanetário total B em nT , componentes x e y do campo magnético interplanetário representados por B_x e B_y , respectivamente em preto e azul, em nT , componente z do campo magnético interplanetário B_z em nT e por último o parâmetro β .

Fonte: Produção autoral.

A região interna da nuvem, delimitada pelas linhas verticais em rosa, Figura B.2, está evidenciada nesse caso principalmente pela queda no parâmetro β , último painel, além da baixa temperatura, bem como a característica de $|B|$ e suas componentes. O intervalo sugere uma rotação na componente Z do campo magnético, observada em

B_z , rotação essa que passa de valores $-20nT$ para $20nT$. Para o $|B|$ no intervalo, é notável um pico no momento que B_z é nulo, o que sugere ser o centro da estrutura; B_x e B_y variam praticamente juntas, tendo valores máximos no centro da estrutura de aproximadamente $15nT$, classificando tal evento como Nuvem Magnética S-N.

Figura B.2 - Exemplo de dados para uma nuvem magnética, S-N (B_z componente que gira do Sul para o Norte).

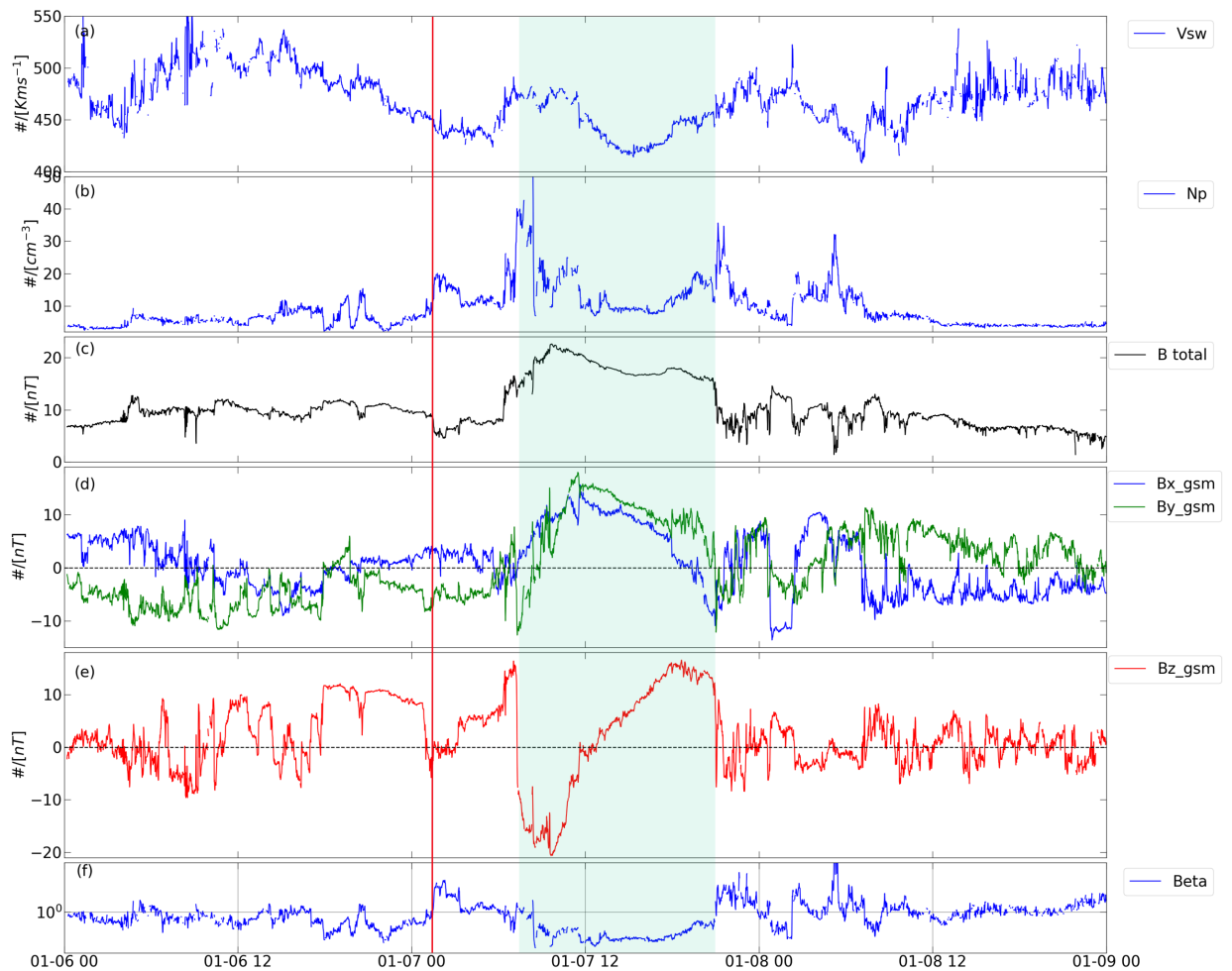


Gráfico temporal para um evento de ICME no dia 7 de janeiro de 2015. Na ordem de cima para baixo tem-se: representação da velocidade do vento solar V_{sw} em Km/s, densidade de partículas N_p em cm^{-3} , temperatura de íons T_p em K, seguida do campo magnético interplanetário total B em nT , componentes x e y do campo magnético interplanetário representados por B_x e B_y , respectivamente em preto e azul, em nT , componente z do campo magnético interplanetário B_z em nT e por último o parâmetro β .

Fonte: Produção autoral.

A onda de choque marcada pela linha vertical verde, com uma variação contínua e suave nos parâmetros do vento solar, revela-se uma estrutura bastante complexa, apresentando flutuações intensas nas componentes B_y e B_z logo após a onda de choque, suavizada na região interna da nuvem (observada entre as linhas rosas).

Na Figura B.3 o campo magnético apresenta rotações nas componentes B_y e B_x , podendo indicar que se trata de uma estrutura do tipo Nuvem Magnética, bastante inclinada em relação à Eclíptica. A temperatura manteve-se relativamente baixa, durante a passagem da estrutura. Observa-se diminuição gradativa da velocidade ao longo do evento, o que sugere uma estrutura em expansão, tornando o evento mais complexo ainda. A região interna da nuvem, delimitada pelas linhas verticais em rosa, sugere uma rotação na componente Y do campo magnético, observada em B_y , grafado em azul, rotação essa que passa de valores $-10nT$ para $+10nT$. O módulo de $|B|$ no intervalo é praticamente constante, com pequenas variações. Ocorre uma rotação concomitantemente em B_x , passando de valores positivos para negativos, B_z mantém-se praticamente constante e negativo, tendo seu pico perto de $-10nT$ aproximadamente no centro da nuvem. Basicamente tem-se na nuvem a inversão dos componentes X e Y, com o componente Z na direção sul, assim a classificação para tal evento se encaixa como Nuvem Magnética Y-S.

Figura B.3 - Exemplo de dados para uma nuvem magnética, Y-S (componente girando de Leste a Oeste ou Oeste a Leste, com o componente Bz na direção Sul).

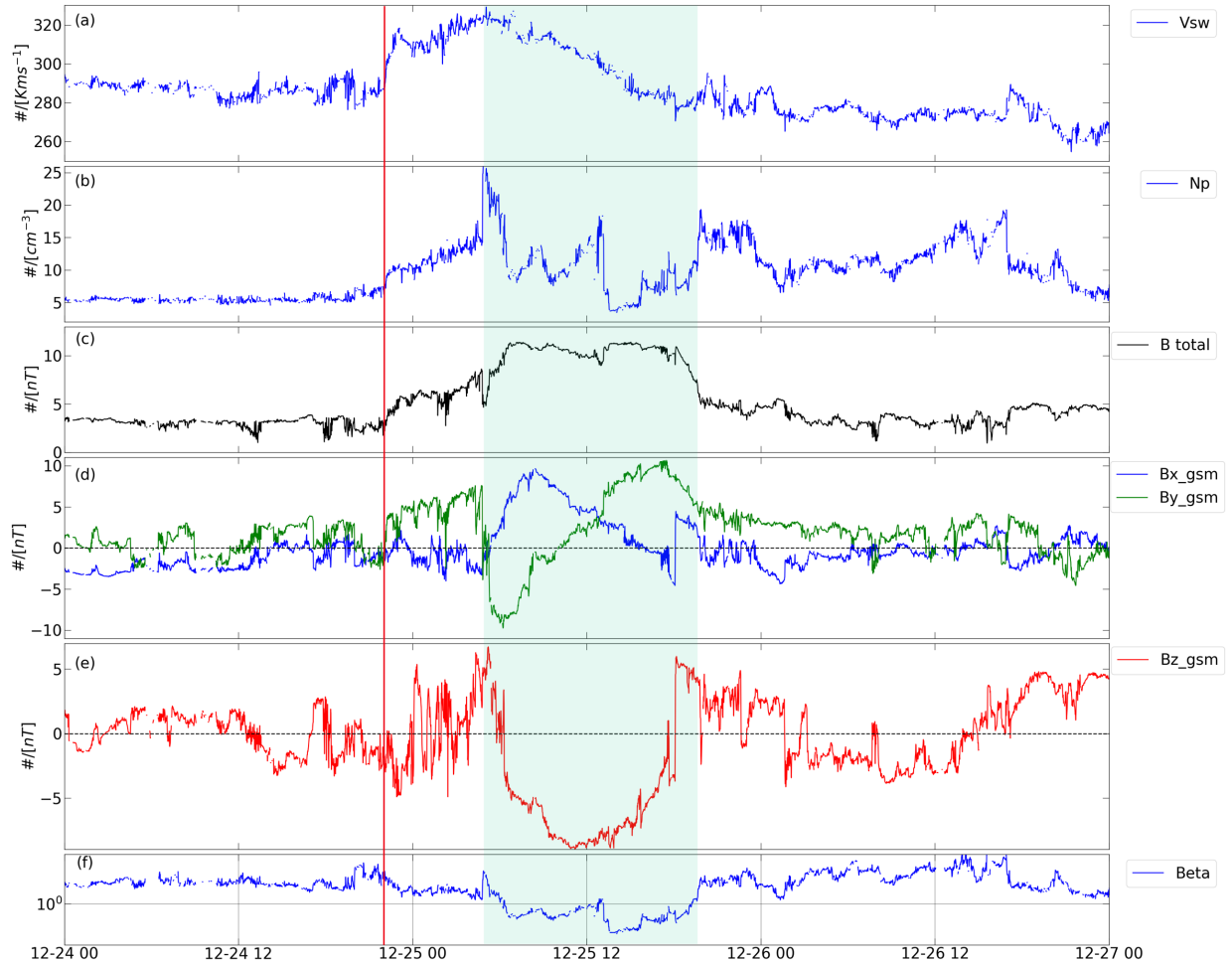


Gráfico temporal para um evento de CME no dia 25 de dezembro de 2013. Na ordem de cima para baixo tem-se, representação da velocidade do vento solar V_{sw} em Km/s, densidade de partículas N_p em cm^{-3} , temperatura de íons T_p em K, seguida do campo magnético interplanetário total B em nT , componentes x e y do campo magnético interplanetário representados por B_x e B_y , respectivamente em preto e azul, em nT , componente z do campo magnético interplanetário B_z em nT e por último o parâmetro β .

Fonte: Produção autoral.

A onda de choque, destacada pela linha vertical vermelha na Figura B.4, revela que os parâmetros do vento solar não manifestam as características típicas de uma nuvem magnética, como um campo magnético intensificado e uma rotação suave. Em vez disso, observam-se variações abruptas e turbulentas. Além disso, o parâmetro β

não apresenta variações significativas após o momento identificado como o ponto de choque.

Figura B.4 - Exemplo de dados para evento sem Nuvem Magnética.

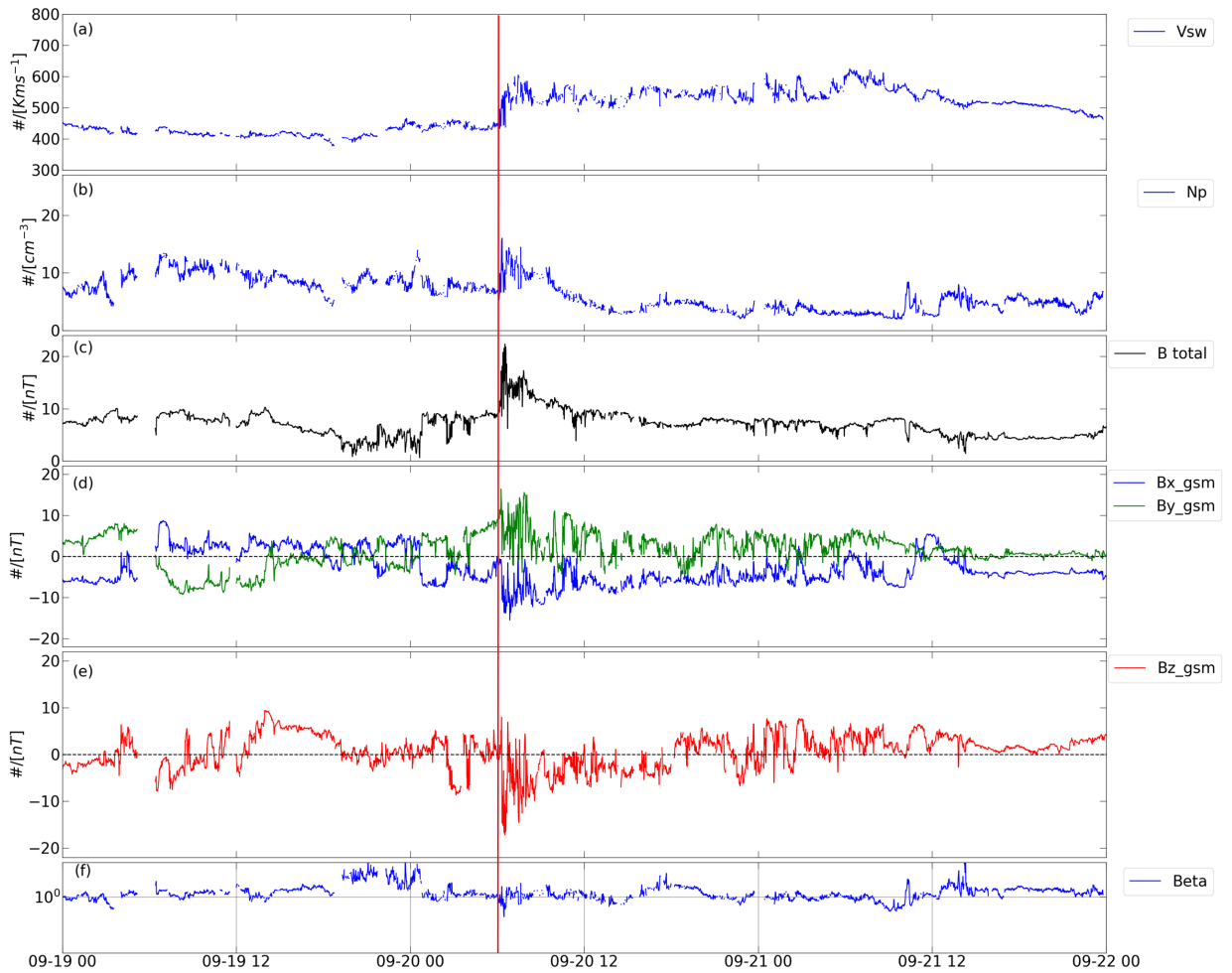
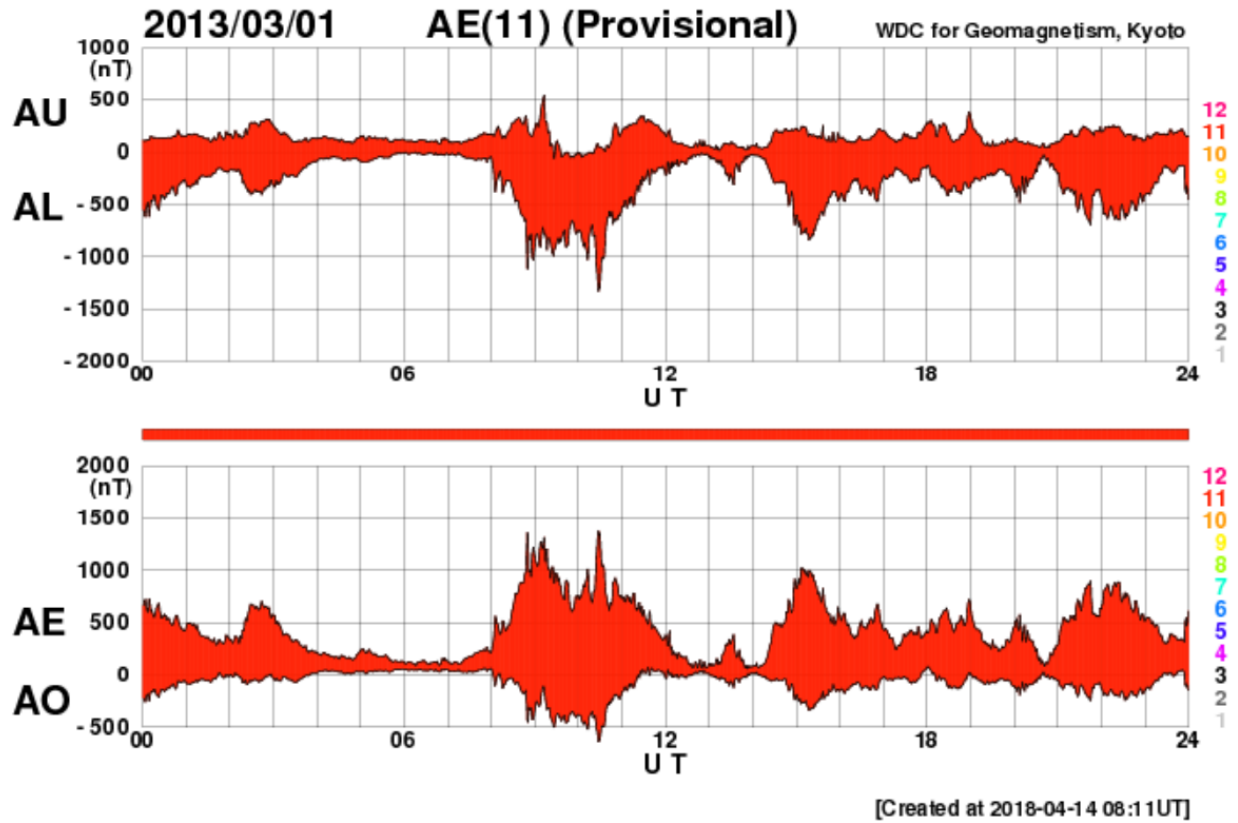


Gráfico temporal para evento classificado sem MC no dia 20 de setembro de 2015. Na ordem de cima para baixo tem-se, representação da velocidade do vento solar V_{sw} em Km/s , densidade de partículas N_p em cm^{-3} , temperatura de íons T_p em K , seguida do campo magnético interplanetário total B em nT , componentes x e y do campo magnético interplanetário representados por B_x e B_y , respectivamente em preto e azul, em nT , componente z do campo magnético interplanetário B_z em nT e por último o parâmetro β .

Fonte: Produção autoral.

APÊNDICE C

Figura C.1 - Índice do Eletrojato Auroral AE - (*Auroral Electrojet Index*).



Índices aurorais para o período o estudo de caso HSS, em 1 de março de 2013 calculados para 11 observatórios. Índices divididos em dois painéis, onde no primeiro estão AU e AL, com AU marcando o envelope superior e AL o envelope inferior, e, por último, AE e AO com AE marcando o envelope superior com valores positivos e AO o envelope inferior. Todos os índices estão em (nT).

Fonte: World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (2020).

APÊNDICE D

D.1 O vetor de Poynting \vec{S} e a ambiguidade nas direções dos ângulos normais das ondas

A ambiguidade nas direções normais das ondas θ , definida pelo ângulo formado entre \vec{K} e \vec{B}_0 , é removida pelo cálculo do vetor de Poynting, uma vez que K (para ondas *Whistler*) sempre tem um componente ao longo da direção de S ($S \cdot \vec{K} > 0$) (SANTOLÍK et al., 2003; TAUBENSCHUSS et al., 2014). O vetor de Poynting \vec{S} fornece informações sobre a direção da propagação da energia da onda e será calculado a partir do mesmo conjunto de dados usados para o calcular a elipticidade Υ e planaridade F , pelas correlações cruzadas entre $\vec{B} = (B_u, B_v, B_y)$ e $\vec{E} = (E_u, E_v, E_y)$ obtidos pela EMFISIS. Este pode ser calculado por:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_o} \begin{bmatrix} \Re\{B_z E_y^*\} - \Re\{B_y E_z^*\} \\ \Re\{B_x E_z^*\} - \Re\{B_z E_y^*\} \\ \Re\{B_y E_x^*\} - \Re\{B_x E_y^*\} \end{bmatrix} \quad (\text{D.1})$$

em que μ_o é a permeabilidade no meio, as componentes de \vec{B} e \vec{E} devem ser convertidas para (B_x, B_y, B_z) e (E_x, E_y, E_z) respectivamente, adotando-se o eixo z ao longo da direção local do campo magnético do ambiente \vec{B}_0 , e y perpendicular ao plano medido por \vec{B}_0 , em que o vetor r da espaçonave é dado por $\vec{y} = \vec{r} \times \vec{B}_0$ e $\Re\{\}$ indica a parte real de uma quantidade complexa (SANTOLÍK et al., 2014b; TAUBENSCHUSS et al., 2014). O ângulo de \vec{S} é definido entre 0° e 180° , significando paralelo e antiparalelo a \vec{B}_0 , respectivamente (TAUBENSCHUSS et al., 2014).

D.2 Frequência ciclotrônica

A frequência ciclotrônica refere-se à frequência com que um elétron orbita em torno de uma linha de campo magnético. A Equação que descreve esse movimento é dada por:

$$f_{ce} = \frac{e \cdot B}{2\pi \cdot m_e} \quad (\text{D.2})$$

Onde:

f_{ce} é a frequência cíclotron (em Hertz, Hz).

e é a carga elementar (aproximadamente) $1.60217663 \times 10^{-19}$ Coulombs, C).

B é a intensidade do campo magnético (em Tesla, T).

m_e é a massa do elétron (aproximadamente) $9.10938356 \times 10^{-31}$ quilogramas, kg).

Dedução simplificada e apresentação das unidades para f_{ce} frequência cíclotron do elétron:

Partindo da Força de Lorenz aplicada a um elétron em movimento em um campo magnético:

$$F = q \cdot (v \times B) \quad (\text{D.3})$$

Onde:

F é a força magnética (em Newton, N).

q é a carga do elétron (em Coulombs, C).

v é a velocidade do elétron (em metros por segundo, m/s).

B é a intensidade do campo magnético (em Tesla, T).

Consideramos o movimento circular do elétron sob a influência dessa força magnética, em uma órbita circular, temos:

$$F = \frac{m_e \cdot v^2}{r} \quad (\text{D.4})$$

Onde:

m_e é a massa do elétron (em kg).

v é a velocidade do elétron (em m/s).

r é o raio da órbita circular (em metros, m).

Pelo equilíbrio de forças em uma órbita circular, igualando as equações D.3 e D.4 :

$$q \cdot (v \times B) = \frac{m_e \cdot v^2}{r} \quad (\text{D.5})$$

Isolamos r na Equação, que representa o raio da órbita do elétron:

$$r = \frac{m_e \cdot v}{|q| \cdot |B|} \quad (\text{D.6})$$

O período de órbita (T) é o tempo necessário para o elétron dar uma volta completa na órbita:

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v} \quad (\text{D.7})$$

Substituímos r da Equação D.6 na Equação D.7:

$$T = \frac{2\pi \cdot \frac{m_e \cdot v}{|q| \cdot |B|}}{v} = \frac{2\pi \cdot m_e}{|q| \cdot |B|} \quad (\text{D.8})$$

Finalmente, obtemos a frequência cíclotron (f_{ce}) como o inverso do período (T):

$$f_{ce} = \frac{1}{T} = \frac{1}{\frac{2\pi \cdot m_e}{|q| \cdot |B|}} = \frac{|q| \cdot |B|}{2\pi \cdot m_e} \quad (\text{D.9})$$

