



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**ESTUDO DE ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS UTILIZANDO  
OBSERVAÇÕES DE SATÉLITES E OBSERVAÇÕES DE  
RAIOS CÓSMICOS**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/INPE - CNPq/MCT)**

**PROCESSO: 102060/2009-6**

**José Fernando Thuorst – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT  
Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas  
LCEPTM/CRS/INPE – MCT  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais  
CRS/INPE – MCT  
E-mail: fisico@lacesm.ufsm.br**

**Dr. Alisson Dal Lago - Orientador  
Divisão de Geofísica Espacial  
DGE/CEA/INPE – MCT  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
INPE - MCT  
E-mail: dallago@dge.inpe.br**

**Santa Maria, Junho de 2009**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
DO PROGRAMA: PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

**PROJETO**

**ESTUDO DE ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS UTILIZANDO  
OBSERVAÇÕES DE SATÉLITES E OBSERVAÇÕES DE  
RAIOS CÓSMICOS**

**PROCESSO: 102060/2009-6**

**Relatório elaborado por:**

**José Fernando Thuorst - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

**E-mail: fisico@lacesm.ufsm.br**

**Dr. Alisson Dal Lago – Orientador**

**Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT**

**E-mail: dallago@dge.inpe.br**

**Dr. Nelson Jorge Schuch – Co-Orientador**

**Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT**

**E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br**

## **Dados de Identificação:**

### **Título do Projeto:**

**ESTUDO DE ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS UTILIZANDO  
OBSERVAÇÕES DE SATÉLITES E OBSERVAÇÕES DE RAIOS CÓSMICOS**

**Processo CNPq Nº: 102060/2009-6**

### **Bolsista:**

**José Fernando Thuorst**

Acadêmico de Física Bacharelado

Centro de Ciências Naturais e Exatas – CCNE/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

### **Orientador:**

**Dr. Alisson Dal Lago**

Divisão de Geofísica Espacial – DGE/CEA/INPE – MCT

### **Co-Orientador:**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE – MCT

### **Colaboradores:**

**Dr. Kazuoki Munakata**

Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto – Japan.

**Dr. Takao Kuwabara**

Bartol Research Institute, University of Delaware, Newark, Delaware – EUA

**Marlos Rockenbach da Silva**

Doutorando do Curso de Geofísica Espacial do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – Brasil.

**Carlos Roberto Braga**

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica da UFSM.

**Nikolas Kemmerich**

Acadêmico do Curso de Física Licenciatura Plena Noturno da UFSM.

**Marcos Vinicius Silveira**

Mestrando - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT

**Tardelli Ronan Coelho Stekel**

Acadêmico do curso de engenharia elétrica

**Lucas Ramos Vieira**

Acadêmico do curso de Física – Bacharelado

**Aline Seeger**

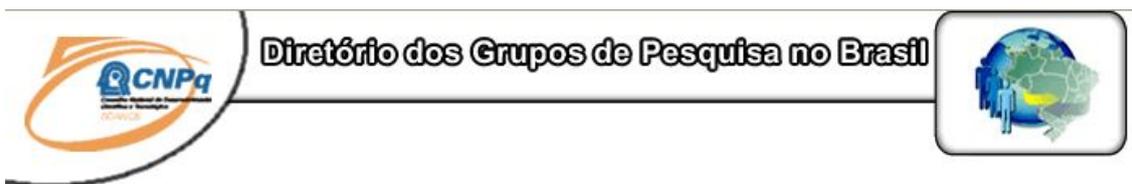
Acadêmica de curso de Física – Bacharelado

**Local de Trabalho/Execução do Projeto:**

Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas -  
LCEPTM/CRS/INPE – MCT, Santa Maria, RS.

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT (29.4°S, 53.8° W, 480 m  
acima do nível do mar), São Martinho da Serra, RS.

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do  
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT/UFSM.



**Estudante**  
**Jose Fernando Thuorst**



[Link para Currículo Lattes](#)

**Dados gerais**

**Indicadores de produção C, T & A**

**Dados gerais**

**Identificação do estudante**

**Nome:** Jose Fernando Thuorst

**Nível de treinamento:** Graduação

**Currículo Lattes:** 16/06/2009 15:06

**E-mail:** [josefernandothuorst@msn.com](mailto:josefernandothuorst@msn.com)

**Homepage:**

**Grupos de pesquisa que atua na instituição**

[Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br](#) - INPE

**Linhas de pesquisa que atua**

[Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR](#)

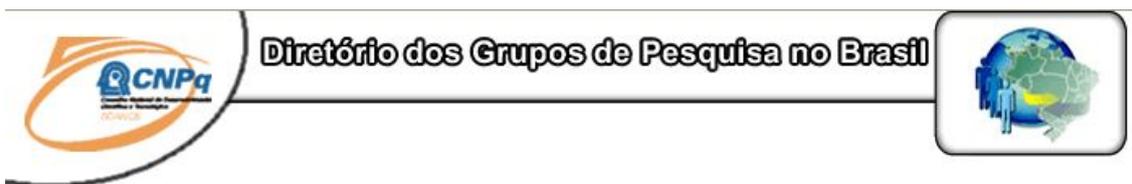
[MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL](#)

**Orientadores participantes de grupos de pesquisa na instituição**

[Alisson Dal Lago](#)

**Indicadores de produção C, T & A dos anos de 2006 a 2009**

Tipo de produção	2006	2007	2008	2009
Produção bibliográfica	0	0	3	0
Produção técnica	0	0	0	0
Orientação concluída	0	0	0	0
Produção artística/cultural e demais trabalhos	0	0	0	0



**Grupo de Pesquisa**  
**Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo:**  
**Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br**



Identificação	Recursos Humanos	Linhas de Pesquisa	Indicadores do Grupo
---------------	------------------	--------------------	----------------------

**Identificação**

**Dados básicos**

**Nome do grupo:** Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br

**Status do grupo:** **certificado pela instituição**

**Ano de formação:** 1996

**Data da última atualização:** 04/06/2009 15:01

**Líder(es) do grupo:** Nelson Jorge Schuch - [nelson.schuch@pq.cnpq.br](mailto:nelson.schuch@pq.cnpq.br)

Natanael Rodrigues Gomes - [natanael.gomes@lacesm.ufsm.br](mailto:natanael.gomes@lacesm.ufsm.br)

**Área predominante:** Ciências Exatas e da Terra; Geociências

**Instituição:** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

**Órgão:** Coordenação de Gestão Científica - CIE

**Unidade:** Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

**Endereço**

**Logradouro:** Caixa Postal 5021

**Bairro:** Camobi

**CEP:** 97110970

**Cidade:** Santa Maria

**UF:** RS

**Telefone:** 33012026

**Fax:** 33012030

**E-mail:** [njschuch@lacesm.ufsm.br](mailto:njschuch@lacesm.ufsm.br)

**Home page:** <http://>

**Repercussões dos trabalhos do grupo**

O Grupo - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS, GEOMAGNETISMO:INTERAÇÃO TERRA-SOL do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE - MCT, Lat. 29°26'24"S, Long. 53°48'38"W, Alt. 488m, em São Martinho da Serra, RS, criado por Nelson Jorge Schuch em 1996, colabora com pesquisadores da: UFSM (CT-LACESM), INPE, CRAAM-Universidade P. Mackenzie, IAG/USP, OV/ON, DPD/UNIVAP e SEFET/GO, no Brasil e internacionais do: Japão (Universidades: Shinshu, Nagoya, Kyushu, Takushoku e National Institute of Polar Research), EUA ((Bartol Research Institute/University of Delaware e NASA (Jet Propulsion Laboratory e Goddard Space Flight Center)), Alemanha (University of Greifswald e Max Planck Institute for Solar System Research), Austrália (Australian Government Antarctic Division e University of Tasmania), Armênia (Alikhanyan Physics Institute) e Kuwait (Kuwait University). Linhas de Pesquisas: MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL, MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO, AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA, NANOSATC-BR. Áreas de interesse: Heliosfera, Física Solar, Meio Interplanetário, Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo, Aeronomia, Ionosferas, Aeroluminescência, Raios Cósmicos, Muons, Pequenos Satélites Científicos. Objetivos: Pesquisar o acoplamento energético na Heliosfera, mecanismos de geração de energia no Sol, Vento Solar, sua propagação no Meio Interplanetário, acoplamento com as magnetosferas planetárias, no Geoespaço com a Ionosfera e a Atmosfera Superior, previsão de ocorrência de tempestades magnéticas e das intensas correntes induzidas na superfície da Terra, Eletricidade Atmosférica e seus Eventos Luminosos Transientes (TLEs). As Pesquisas base de dados de sondas no Espaço Interplanetário e dentro de magnetosferas planetárias, e de modelos computacionais físicos e estatísticos. Vice-Líderes: Alisson Dal Lago, Nalin Babulau Trivedi, Otávio Santos Cupertino Durão, Natanael Rodrigues Gomes.

<b>Recursos humanos</b>	
<b>Pesquisadores</b>	<b>Total: 41</b>
<a href="#">Ademar Michels</a> <a href="#">Alan Prestes</a> <a href="#">Alicia Luisa Clúa de Gonzalez</a> <a href="#">Alisson Dal Lago</a> <a href="#">Antonio Claret Palerosi</a> <a href="#">Barclay Robert Clemesha</a> <a href="#">Caitano Luiz da Silva</a> <a href="#">Carlos Roberto Braga</a> <a href="#">Clezio Marcos De Nardin</a> <a href="#">Cristiano Max Wrasse</a> <a href="#">Delano Gobbi</a> <a href="#">Eurico Rodrigues de Paula</a> <a href="#">Ezequiel Echer</a> <a href="#">Fabiano Luis de Sousa</a> <a href="#">Fábio Augusto Vargas dos Santos</a> <a href="#">Fernanda de São Sabbas Tavares</a> <a href="#">Fernando Luís Guarnieri</a> <a href="#">Gelson Lauro Dal' Forno</a> <a href="#">Hisao Takahashi</a> <a href="#">Ijar Milagre da Fonseca</a> <a href="#">Jean Carlo Santos</a>	<a href="#">Jean Pierre Raulin</a> <a href="#">Joao Paulo Minussi</a> <a href="#">Jose Humberto Andrade Sobral</a> <a href="#">Juliano Moro</a> <a href="#">Mangalathayil Ali Abdu</a> <a href="#">Marcelo Barcellos da Rosa</a> <a href="#">Marcos Vinicius Dias Silveira</a> <a href="#">Nalin Babulal Trivedi</a> <a href="#">Natanael Rodrigues Gomes</a> <a href="#">Nelson Jorge Schuch</a> <a href="#">Nivaor Rodolfo Rigozo</a> <a href="#">Odim Mendes Junior</a> <a href="#">Osmar Pinto Junior</a> <a href="#">Otavio Santos Cupertino Durão</a> <a href="#">Pawel Rozenfeld</a> <a href="#">Petrônio Noronha de Souza</a> <a href="#">Polinaya Muralikrishna</a> <a href="#">Rajaram Purushottam Kane</a> <a href="#">Severino Luiz Guimaraes Dutra</a> <a href="#">Walter Demetrio Gonzalez Alarcon</a>
<b>Estudantes</b>	<b>Total: 30</b>
<a href="#">Aline Seeger Santos</a> <a href="#">Bernardo Henz</a> <a href="#">Carlos Pinto da Silva Neto</a> <a href="#">Cassio Espindola Antunes</a> <a href="#">Celito Muck Felipetto</a> <a href="#">Claudio Machado Paulo</a> <a href="#">Cristiano Sarzi Machado</a> <a href="#">Eduardo Escobar Bürger</a> <a href="#">Eduardo Weide Luiz</a> <a href="#">Fernando de Souza Savian</a> <a href="#">Guilherme Aluizio Steffens Lorensen</a> <a href="#">Guilherme Grams</a> <a href="#">Guilherme Simon da Rosa</a> <a href="#">Igor Freitas Fagundes</a> <a href="#">Jose Fernando Thuorst</a>	<a href="#">Josemar de Siqueira</a> <a href="#">Lilian Piecha Moor</a> <a href="#">Lucas Antunes Tambara</a> <a href="#">Lucas Lopes Costa</a> <a href="#">Lucas Ramos Vieira</a> <a href="#">Luis Fernando Nicolini</a> <a href="#">Nikolas Kemmerich</a> <a href="#">Rafael Lopes Costa</a> <a href="#">Ricardo Cartier dos Santos</a> <a href="#">Rodrigo da Rosa Azambuja</a> <a href="#">Rubens Zolar Gehlen Bohrer</a> <a href="#">Tardelli Ronan Coelho Stekel</a> <a href="#">Thalis José Girardi</a> <a href="#">Tiago Jaskulski</a> <a href="#">Willian Rigon Silva</a>
<b>Técnicos</b>	<b>Total: 2</b>
Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação Vinicius Ceregati Costa - Graduação - \Outra Função	

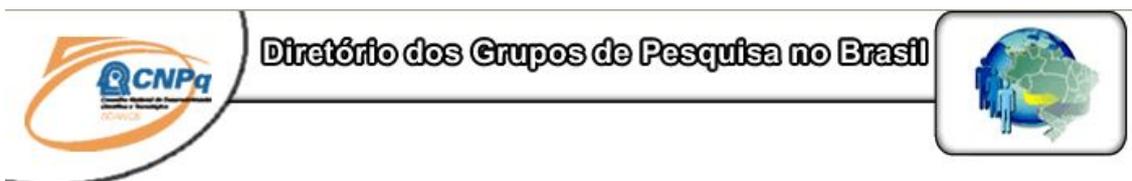
<b>Linhas de pesquisa</b>	<b>Total: 4</b>
---------------------------	-----------------

- [AERONOMIA - IONOSFERAS x AEROLUMINESCÊNCIA](#)
  - [Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR](#)
  - [MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO](#)
  - [MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL](#)
- 

<b>Relações com o setor produtivo</b>	<b>Total: 0</b>
---------------------------------------	-----------------

<b>Indicadores de recursos humanos do grupo</b>	
---	--

	<b>Integrantes do grupo</b>	<b>Total</b>
Pesquisador(es)		41
Estudante(s)		30
Técnico(s)		2



**Linha de Pesquisa**  
**MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL**

**Linha de pesquisa**

**MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL**

**Nome do grupo:** [Clima Espacial](#), [Magnetosferas](#), [Geomagnetismo](#); [Interações Terra - Sol](#), [NanoSatC-Br](#)

**Palavras-chave:** Campo Magnético Interplanetário; Muons; Raios Cósmicos; Tempestade Geomagnética;

**Pesquisadores:**

[Alan Prestes](#)  
[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez](#)  
[Alisson Dal Lago](#)  
[Carlos Roberto Braga](#)  
[Ezequiel Echer](#)  
[Fernando Luís Guarnieri](#)  
[Jean Pierre Raulin](#)  
[Juliano Moro](#)  
[Marcos Vinicius Dias Silveira](#)  
[Nelson Jorge Schuch](#)  
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)  
[Rajaram Purushottam Kane](#)  
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)  
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

**Estudantes:**

[Aline Seeger Santos](#)  
[Claudio Machado Paulo](#)  
[Eduardo Escobar Bürger](#)  
[Guilherme Grams](#)  
[Jose Fernando Thuorst](#)  
[Josemar de Siqueira](#)  
[Lucas Antunes Tambara](#)  
[Lucas Ramos Vieira](#)  
[Luis Fernando Nicolini](#)  
[Nikolas Kemmerich](#)  
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)

**Árvore do conhecimento:**

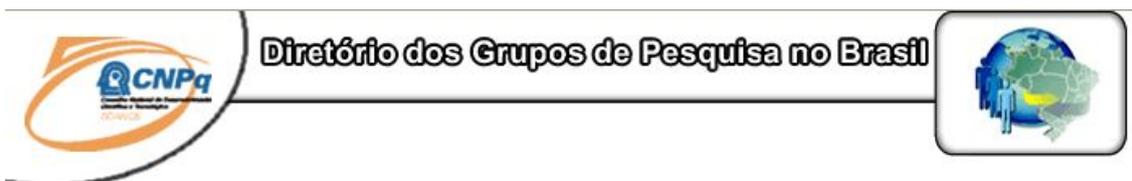
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Geofísica Espacial;  
Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;  
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;

**Setores de aplicação:**

Aeronáutica e espaço

**Objetivo:**

Pesquisar e prover em tempo real com o Telescópio Multidirecional de Raios Cósmicos-Muons, 2x(4mx7m), >50GeV, no Observatório Espacial do Sul, o monitoramento de muons e fenômenos das interações Sol-Terra, a previsão no Geoespaço de eventos solares e distúrbios geofísicos, graves efeitos das tempestades e subtempestades geomagnéticas sobre dispositivos e sistemas tecnológicos afetando equipes de trabalho e equipamentos na superfície da Terra e no Espaço. Vice-Líder: Alisson Dal Lago.



**Linha de Pesquisa**  
**Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR**

**Linha de pesquisa**

**Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR**

**Nome do grupo:** [Clima Espacial, Magnetosferas, Geomagnetismo: Interações Terra - Sol, NanoSatC-Br](#)

**Palavras-chave:** CubeSats; Desenvolvimento de Engenharias - Tecnologias; Miniaturização; Nanosatélites; Nanotecnologia; Pesquisa do Geoespaço;

**Pesquisadores:**

[Ademar Michels](#)  
[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez](#)  
[Alisson Dal Lago](#)  
[Antonio Claret Palerosi](#)  
[Clezio Marcos De Nardin](#)  
[Ezequiel Echer](#)  
[Fabiano Luis de Sousa](#)  
[Fernando Luís Guarnieri](#)  
[Ijar Milagre da Fonseca](#)  
[Jean Pierre Raulin](#)  
[Jose Humberto Andrade Sobral](#)  
[Nalín Babulal Trivedi](#)  
[Natanael Rodrigues Gomes](#)  
[Nelson Jorge Schuch](#)  
[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)  
[Odim Mendes Junior](#)  
[Otavio Santos Cupertino Durão](#)  
[Pawel Rozenfeld](#)  
[Petrônio Noronha de Souza](#)  
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)  
[Walter Demetrio Gonzalez Alarcon](#)

**Estudantes:**

[Bernardo Henz](#)  
[Cassio Espindola Antunes](#)  
[Celito Muck Felipetto](#)  
[Eduardo Escobar Bürger](#)  
[Fernando de Souza Savian](#)  
[Guilherme Grams](#)  
[Guilherme Simon da Rosa](#)  
[Igor Freitas Fagundes](#)  
[Jose Fernando Thuorst](#)  
[Josemar de Siqueira](#)  
[Lucas Antunes Tambara](#)  
[Lucas Lopes Costa](#)  
[Lucas Ramos Vieira](#)  
[Luis Fernando Nicolini](#)  
[Nikolas Kemmerich](#)  
[Rafael Lopes Costa](#)  
[Ricardo Cartier dos Santos](#)  
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)  
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)  
[Tiago Jaskulski](#)  
[Willian Rigon Silva](#)

**Árvore do conhecimento:**

Ciências Exatas e da Terra; Astronomia; Astrofísica do Sistema Solar;  
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Instrumentação Científica;  
Engenharias; Engenharia Aeroespacial; Engenharia Aeroespacial - Pequenos Satélites;

**Setores de aplicação:**

Aeronáutica e espaço

**Objetivo:**

Pesquisas: Geoespaço e em Engenharias/Tecnologias: eletrônica, comunicações, mecânica, lançamento de pequenos satélites científico universitário - iniciação científica: CubeSat (100g-1Kg, 10x10x10cm), Nanosatélite (1Kg-10Kg); Carga útil: magnetômetro e detector de partículas; Desenvolvimentos: estrutura mecânica, computador-bordo, programas, estação terrena, testes/integração, sub-sistemas: potencia, propulsão, telemetria, controle: atitude, térmico, Vice-Líder: Otávio Santos Cupertino Durão

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a minha família; meus pais, Miguel Thuorst e Carmelinda Correia Thuorst e minhas irmãs, Janaina Thuorst e Ana Maria Thuorst, por terem me propiciado a vida que eu tive, e o apoio necessário para estar aqui.

Ao meu Orientador Dr. Alisson Dal Lago, por se dispor a me orientar e auxiliar nas minhas atividades de iniciação científica. E ao meu Co-orientador Dr. Nelson Jorge Schuch por ter me dado a oportunidade de conhecer as pessoas que conheci aqui e por tudo isso ter me permitido questionar, refletir sobre diversos assuntos.

Meus sinceros agradecimentos: (i) aos funcionários, servidores do CRS/INPE – MCT e do LACESM/CT – UFSM, pelo apoio e pela infra-estrutura disponibilizada; (ii) ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa, que me permitiu dar os primeiros passos na iniciação científica e tecnológica, propiciando grande crescimento profissional; (iii) ao Coordenador Dr. José Carlos Becceneri e a Secretária do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, Sra. Egidia Inácio da Rosa, pelo constante apoio, alertas e sua incansável preocupação com toda a burocracia e datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/INPE - MCT.

A CEU-II Casa do Estudante Universitário, minha moradia em Santa Maria, por me proporcionar a chance de conhecer as pessoas que hoje são meus colegas, vizinhos e amigos, e a minha companheira Eliana Regina Fritzen.

## **Preâmbulo**

O Projeto teve o bolsista Marcos Vinicius Dias Silveira, ex-aluno do Curso de Física Licenciatura Plena da UFSM, substituído no mês de fevereiro do ano de 2009 pelo acadêmico José Fernando Thuorst, aluno do Curso de Física Bacharelado da UFSM, que passou a realizar os trabalhos referentes ao Projeto a partir do mês de março de 2009. O novo bolsista concluiu a etapa 6 onde deveria elaborar trabalhos para serem apresentados no evento SICINPE do INPE e está realizando as etapas 1, e 2 referentes aos Planos de Trabalho do Projeto. O relatório final foi redigido com a ajuda do antigo bolsista, que redigiu as análises dos dados e as conclusões. O Relatório Parcial de atividades do bolsista substituído está em anexo ao Relatório.

## Resumo

Com o objetivo geral de estudar as interações Sol-Terra, o Projeto dá ênfase à análise de eventos na magnetosfera terrestre, à contagem de raios cósmicos - Muons, e às observações do Sol, visando o estudo e identificação de estruturas interplanetárias provenientes do Sol, tais como as CMEs (*Coronal Mass Ejections*), entre outras. As CMEs são estruturas de plasma liberadas pelo Sol observadas na Coroa Solar, que possuem campo magnético. Dentre aquelas que atingem a Terra, algumas podem interagir fortemente com a magnetosfera terrestre ocasionando abruptas flutuações no seu campo magnético, denominadas tempestades geomagnéticas. Sua principal característica é um decréscimo na componente H (horizontal) do campo geomagnético durante cerca de algumas dezenas de horas. Em decorrência de seu campo magnético, as estruturas bloqueiam a passagem de partículas carregadas, como algumas espécies de raios cósmicos primários, causando geralmente um decréscimo na contagem das partículas. Os Muons, decorrentes do decaimento de partículas formadas pelas colisões inelásticas de raios cósmicos primários com os constituintes da atmosfera terrestre, atingem a Terra de forma isotrópica, e tem sua contagem direcional diminuída na presença de CMEs. Portanto, o estudo se concentra em: (i) analisar dados de parâmetros de plasma obtidos através do satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*), localizado no ponto lagrangeano L1 (ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e Terra), com vista principalmente no cálculo das pressões cinética e magnética das estruturas a fim de se obter o parâmetro beta, que é a razão entre as pressões cinética e magnética; (ii) utilizar imagens do Sol obtidas pelo satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) para calcular a velocidade das CMEs; e (iii) através dos dados da contagem direcional de Muons fornecidos pelo DMM (Detector Multi-Direcional de Muons) em operação no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT, (29.4°S, 53.8° W, 480 m a.n.m.), em São Martinho da Serra, RS, identificar os possíveis decréscimos nas respectivas contagens para aqueles períodos analisados com dados do ACE.

## SÚMARIO

<b>1</b>	<b>CAPÍTULO: INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
1.1	INTRODUÇÃO.....	19
1.2	OBJETIVOS.....	19
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO: O MEIO INTERPLANETÁRIO E AS INTERAÇÕES SOL-TERRA .....</b>	<b>20</b>
2.1	O SOL.....	20
2.1.1	<i>O INTERIOR SOLAR</i> .....	21
2.1.2	<i>ATMOSFERA SOLAR</i> .....	21
2.1.2.1	<i>FOTOSFERA SOLAR</i> .....	21
2.1.2.2	<i>CROMOSFERA SOLAR</i> .....	22
2.1.2.3	<i>A COROA SOLAR</i> .....	23
2.2	O VENTO SOLAR .....	24
2.3	O CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO .....	26
2.4	CICLO SOLAR DE 11 ANOS .....	27
2.5	ESTRUTURAS MAGNÉTICAS NO MEIO INTERPLANETÁRIO.....	29
2.5.1	<i>REGIÃO DE INTERAÇÃO CO-ROTANTE</i> .....	29
2.5.2	<i>EXPLOSÕES SOLARES</i> .....	31
2.5.3	<i>ONDAS DE CHOQUE</i> .....	32
2.5.4	<i>EJEÇÃO CORONAL DE MASSA</i> .....	33
2.5.5	<i>NUVENS MAGNÉTICAS</i> .....	36
2.6	RAIOS CÓSMICOS .....	37
2.7	TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS .....	41
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO: METODOLOGIA .....</b>	<b>44</b>
3.1	O SATÉLITE ACE.....	44
3.2	O SATÉLITE SOHO.....	48
3.3	DETECTOR MULTI-DIRECIONAL DE MUONS.....	51
<b>4</b>	<b>CAPÍTULO: ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
4.1	VARIAÇÃO NA CONTAGEM DE MUONS EM DEZEMBRO DE 2006.....	58
4.2	ANÁLISE DE DADOS DO MEIO INTERPLANETÁRIO.....	59
4.2.1	<i>EVENTO DE MAIO DE 1998</i> .....	59
4.2.2	<i>EVENTO DE SETEMBRO DE 1998</i> .....	62
4.2.3	<i>EVENTO DE ABRIL DE 2000</i> .....	65
4.2.4	<i>EVENTO DE JULHO DE 2000</i> .....	68
4.2.5	<i>EVENTO DE AGOSTO DE 2000</i> .....	71
4.2.6	<i>EVENTO DE SETEMBRO DE 2000</i> .....	74
4.2.7	<i>EVENTO DE MARÇO/ABRIL DE 2001</i> .....	77
4.2.8	<i>EVENTO DE ABRIL DE 2001</i> .....	80
4.3	CÁLCULO DA VELOCIDADE (CME DE OUTUBRO DE 1999).....	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>89</b>
7.1	ANEXO 1: ROTINA EM IDL PARA CÁLCULO DAS VELOCIDADES NO PLANO DO CÉU E DE EXPANSÃO .....	90
7.2	RELATÓRIO PARCIAL 2009 FEITO PELO EX-ALUNO BOLSISTA MARCOS VINICIUS DIAS SILVEIRA.....	92

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Estrutura do interior e atmosfera solar. ....	20
<b>Figura 2:</b> Imagem da fotosfera e dos grânulos solares.....	22
<b>Figura 3:</b> Fotografia da cromosfera solar. ....	23
<b>Figura 4:</b> Fotografia mostrando as proeminências solares.....	23
<b>Figura 5:</b> Exemplo de eclipse solar total. ....	24
<b>Figura 6:</b> A figura mostra a forma como o Vento Solar pressiona e define a forma da Magnetosfera Terrestre. ....	25
<b>Figura 7:</b> Aspecto do Campo Magnético Interplanetario.....	26
<b>Figura 8:</b> Lâmina de Corrente Heliosférica – LCH, próxima ao Sol.....	27
<b>Figura 9:</b> Gráfico do número de manchas solares em função dos anos caracterizando o ciclo solar de 11 anos.....	28
<b>Figura 10:</b> Gráficos mostrando o número de manchas solares a partir de 1749.....	29
<b>Figura 11:</b> Representação esquemática de uma CIR.....	30
<b>Figura 12:</b> Visão da estrutura de setor interplanetária e da lâmina de corrente.....	31
<b>Figura 13:</b> Imagem de uma explosão solar. ....	32
<b>Figura 14:</b> Seqüência de imagens mostrando a ocorrência de uma CME observada pelo coronógrafo LASCO C3 a bordo do satélite SOHO em junho de 1999. ....	34
<b>Figura 15:</b> Geometria de uma nuvem magnética. ....	37
<b>Figura 16:</b> Intensidade dos raios cósmicos em função da energia.....	38
<b>Figura 17:</b> Diagrama esquemático de um chuveiro de raios cósmicos.....	40
<b>Figura 18:</b> Ilustração do bloqueio de raios cósmicos por uma CME.....	40
<b>Figura 19:</b> Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982.....	41
<b>Figura 20:</b> Aurora formada após uma tempestade geomagnética. ....	42
<b>Figura 21:</b> Ilustração da interação entre uma nuvem magnética, oriunda de uma ICME, com a magnetosfera terrestre.....	43
<b>Figura 22:</b> Fenômenos que afetam o Clima Espacial, energias envolvidas, tempo de duração de eus efeitos e principais tipos de danos em sistemas tecnológicos.....	44
<b>Figura 23:</b> Ilustração representativa da órbita do satélite ACE, o ponto Lagrangeano L1, a distância do L1 em relação à Terra e ao Sol.....	45
<b>Figura 24:</b> Ilustração da disposição dos instrumentos a bordo do ACE. ....	46
<b>Figura 25:</b> Tabela de dados obtidos do Satélite ACE, dados baixados da internet pelo bolsista para confecção de gráficos.....	47
<b>Figura 26:</b> Esquema da órbita do Satélite SOHO. ....	48
<b>Figura 27:</b> O Sol dividido em quatro quadrantes, onde cada quadrante corresponde a um comprimento de onda distinto.....	50
<b>Figura 28:</b> Imagem do telescópio EIT.....	50
<b>Figura 29:</b> Diagrama mostrando a área de cobertura da rede dos DMMs, mostrando as visões assintóticas de cada detector. ....	52
<b>Figura 30:</b> Gráficos contendo dados do meio interplanetário e dados da intensidade de muons em relação aos ângulos de pitch. ....	53
<b>Figura 31:</b> Foto do protótipo do DMM instalado no OES em 2001. ....	54
<b>Figura 32:</b> Foto do DMM instalado no OES em dezembro de 2005. ....	54
<b>Figura 33:</b> Esquema do método de contagem do DMM.....	55
<b>Figura 34:</b> Contagem relativa de muons nas direções vertical (V), norte 30° (N), sul 30° (S), leste	

30° (E) e oeste 30° (W), mostrando o decréscimo de Fourbush relacionado a uma tempestade geomagnética. .... 58

**Figura 35:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de maio de 1998. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE. .... 60

**Figura 36:** Densidade (N), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. A linha azul indica a Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE. .... 61

**Figura 37:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de setembro de 1998. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 63

**Figura 38:** Densidade (N), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 64

**Figura 39:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de abril de 2000. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite. .... 66

**Figura 40:** Densidade (N), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE. .... 67

**Figura 41:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de julho de 2000. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 69

**Figura 42:** Densidade (N), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 70

**Figura 43:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de agosto de 2000. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 72

**Figura 44:** Densidade (N), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 73

**Figura 45:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de setembro de 2000. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a componente z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul

indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 75

**Figura 46:** Densidade (N), velocidade (Vp) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 76

**Figura 47:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de março/abril de 2001. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a componente z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da ICME. .... 78

**Figura 48:** Densidade (N), velocidade (Vp) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da ICME. .... 79

**Figura 49:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de abril de 2001. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a componente z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 81

**Figura 50:** Densidade (N), velocidade (Vp) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética. .... 82

**Figura 51:** CME halo de 5 de novembro de 1998, ilustração da velocidade de expansão  $V_{exp}$  e velocidade no plano do céu  $V_{ps}$ . Imagens obtidas pelo coronógrafo LASCO C3. .... 83

**Figura 52:** Imagens obtidas através da rotina desenvolvida em ambiente IDL para visualização da evolução temporal da CME. Evento ocorrido em 18/08/1999. .... 84

**Figura 53:** Gráficos para a obtenção dos módulos da velocidade  $V_{ps}$  (gráfico à esquerda) e da velocidade  $V_{exp}$  (gráfico à direita). .... 85

**Figura 54:** Ilustração das velocidades radial e de expansão da CME. .... 93

**Figura 55:** Imagens obtidas através da rotina desenvolvida em ambiente IDL para visualização da evolução temporal da CME. Evento ocorrido em 18/08/1999. .... 94

**Figura 56:** Gráficos para a obtenção dos módulos da velocidade radial e da velocidade de expansão. .... 94

## **1 CAPÍTULO: Introdução e Objetivos**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

O Sol é uma estrela extremamente ativa, responsável por um meio interplanetário riquíssimo em fenômenos físicos interessantes tanto do ponto de vista teórico quanto ponto de vista experimental e econômico. Possui um ciclo de atividade de 11 anos, entrando em intensa atividade em um período denominado Máximo Solar, apresentando regiões de instabilidades que podem liberar a altas velocidades, grandes quantidades de matéria na forma de Ejeções de Massa Coronal (CMEs). Sua atividade é a principal responsável pelos distúrbios geomagnéticos observados na superfície da Terra, interferindo de várias maneiras nos sistemas tecnológicos principalmente nos de telecomunicações e elétricos de potência. Os distúrbios são causados por diversas estruturas oriundas do Sol, cujas principais são as já citadas ejeções coronais de massa (CMEs), nuvens magnéticas, explosões solares, ondas de choque e regiões de interação co-rotante CIRs.

No trabalho descrito neste relatório foram estudadas estruturas interplanetárias do tipo CMEs, nuvens magnéticas e ondas de choque através de dados do meio interplanetário, fornecidos pelo satélite ACE, e a relação destas estruturas com a modulação de raios cósmicos de altas energias (muons) detectados pelo Detector Multi-Direcional de Muons instalado no OES em São Martinho da Serra.

### **1.2 OBJETIVOS**

Os objetivos deste projeto envolvem a familiarização do aluno, através de seu aprendizado com a física e as observações das estruturas observadas no meio interplanetário.

O estudo de eventos de diferentes estruturas interplanetárias através de dados obtidos pelo satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*) situado no ponto Lagrangeano L1, fora da magnetosfera terrestre, através de análises dos parâmetros de

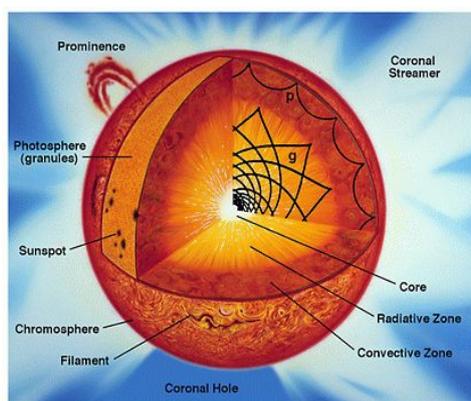
plasma das estruturas, tais como o cálculo do parâmetro beta que determina a relação entre a pressão cinética e a pressão magnética na estrutura.

Observação dos efeitos das estruturas nos raios cósmicos observados pelo Detector Multi-Direcional de muons instalado no OES/CRS/INPE em São Martinho da Serra (RS).

## 2 CAPÍTULO: O Meio Interplanetário e as Interações Sol-Terra

### 2.1 O SOL

Assim como toda estrela, o Sol é uma esfera gasosa que se encontra em equilíbrio hidrodinâmico entre as duas principais forças que agem em seu interior: para o seu exterior a pressão térmica, resultado das altas temperaturas internas, e para o interior a força gravitacional. A estrutura solar pode ser dividida em duas grandes regiões: o Interior e a Atmosfera. A parte interna é composta pelo núcleo, Zona Radiativa e Zona Convectiva e a Atmosfera é composta pela Fotosfera, Cromosfera e Coroa. O interior do Sol e sua atmosfera são representados na Figura 1.



**Figura 1:** Estrutura do interior e atmosfera solar.  
Fonte: <http://soi.stanford.edu>

### 2.1.1 O INTERIOR SOLAR

O interior solar possui um núcleo radiativo e um envelope convectivo que pode chegar até a superfície. O sol emite uma potencia de  $3,9 \times 10^{26}$  W. Essa energia se origina de reações nucleares que ocorrem no seu centro e demora  $10^7$  anos para ser transportada pela Zona Radiativa e em seguida pela Zona Convectiva até atingir a superfície, onde a temperatura é de aproximadamente 5800 K. O interior é formado pelas seguintes regiões: Núcleo se estende até 0,25 raios solares, onde a energia é gerada através de reação de fusão nuclear, apresentando uma temperatura, da ordem de  $1,5 \times 10^7$  K e densidade  $1,6 \times 10^5 \text{ m}^{-3}$ ; Zona Radiativa se estendendo no intervalo de 0,25 a 0,75 raios solares, onde a energia gerada no núcleo é dissipada através do processo de difusão radiativa, tendo uma temperatura da ordem de  $8 \times 10^6$  K e Zona de Convecção, estendendo-se no intervalo de 0,75 a 1 raio solar, com temperatura no intervalo de  $5 \times 10^5$  a 6600 K e onde a energia é dissipada sob a forma de convecção.

### 2.1.2 ATMOSFERA SOLAR

A atmosfera Solar é a camada mais externa, composta basicamente por três camadas: Fotosfera – visível a olho nu, Cromosfera acima da primeira, e Coroa Solar, a camada mais tênue.

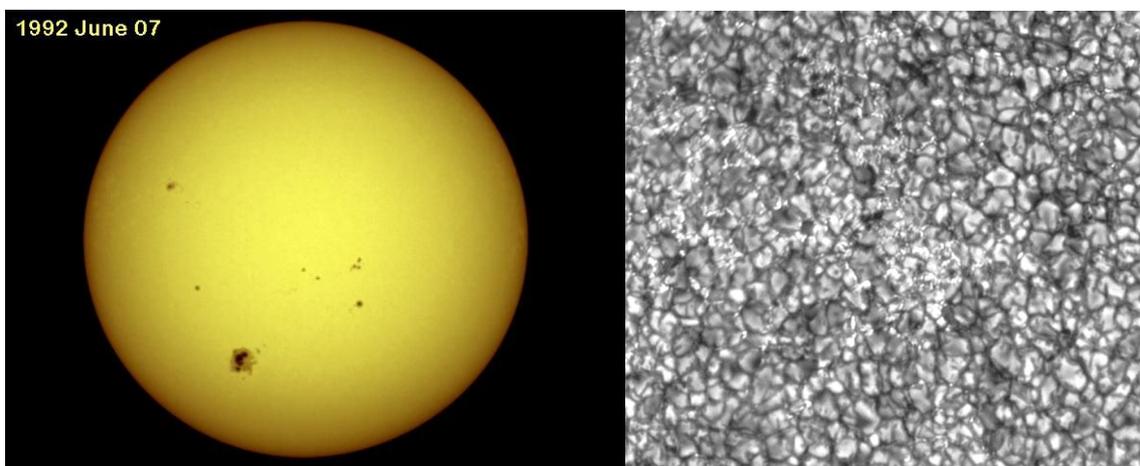
#### 2.1.2.1 FOTOSFERA SOLAR

Trata-se da camada visível do Sol. Possui uma espessura de cerca de 500 km, e é da onde vem a maior parte da luz visível. Entretanto, o gás desta camada não é totalmente transparente, e devido a sua opacidade o interior solar não pode ser visto, a densidade é de cerca de  $10^{13}$  a  $10^{15}$  partículas por centímetro cúbico.

A observação da Fotosfera revela duas estruturas marcantes, as Manchas Solares e as Granulações que podem ser vistas na Figura 2. Quando muito intensas, as Manchas

Solares podem ser vistas a olho nu como notáveis formações escuras, elas surgem e desaparecem por completo em períodos regulares de aproximadamente 11 anos.

A presença de Manchas Solares nos informa a respeito da existência de campos magnéticos intensos na atmosfera solar. Uma vez que o campo magnético inibe o processo convectivo, o transporte de energia nas manchas é bem menor, e conseqüentemente as manchas são mais frias emitindo bem menos radiação que o restante da superfície solar. Os campos magnéticos associados às Manchas Solares estão relacionados a energias eletromagnéticas constituindo regiões de estabilidades, quando instabilidades são originadas, esta energia é liberada na forma de Ejeções Coronais de Massa, Flares e Proeminências.



a)

b)

**Figura 2:** Imagem da fotosfera e dos grânulos solares.

a) Imagem da fotosfera solar, os pontos mais escuros são manchas solares.

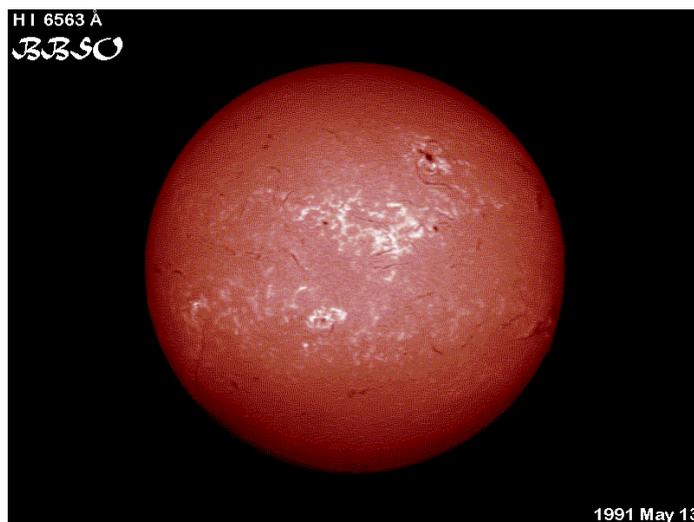
Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/w920607.jpg>

b) Grânulos solares. Fonte: Modificado de <http://solarscience.msfc.nasa.gov/feature1.shtml#Granules>

### 2.1.2.2 CROMOSFERA SOLAR

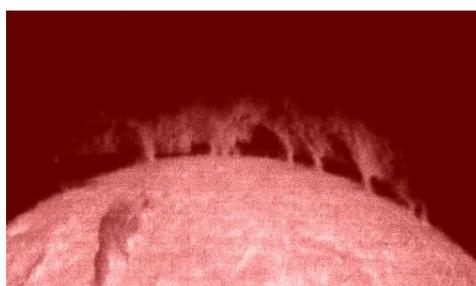
A Cromosfera que é mostrada na Figura 3 estende-se cerca de 10.000 km acima da Fotosfera, esta camada possui uma temperatura que varia no intervalo de 4.300 a  $10^6$  K que aumenta do interior para o exterior, ao contrario da Fotosfera. Apresenta densidade na ordem de  $10^{-11} \text{ m}^{-3}$ , cai de 1-2 ordens de grandeza relativamente a Fotosfera. Pode ser vista observando-se o Sol com um filtro solar conhecido como H-alfa. Assim podemos distinguir as varias estruturas cromosféricas, como as

proeminências que apresentam uma coloração alaranjada que só pode ser observada quando ocorre um obscurecimento do disco solar, por exemplo, durante eclipses totais do Sol e são mostradas na Figura 4. Nessas ocasiões, a Cromosfera torna-se um arco brilhante e colorido, dos quais partem raios de grande luminosidade e que indicam a presença de Cálcio, Helio e Hidrogênio em sua composição, esta camada é na realidade uma faixa de transição entre a Cromosfera fria e a Coroa quente.



**Figura 3:** Fotografia da cromosfera solar.

Fonte: [http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/HI6563\\_fulldisk.jpg](http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/HI6563_fulldisk.jpg)



**Figura 4:** Fotografia mostrando as proeminências solares.

Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/prominence.jpg>

### 2.1.2.3 A COROA SOLAR

A Coroa Solar é parte mais externa da Atmosfera Solar e estende-se por milhões de quilômetros a partir do Sol. A Coroa Solar que é melhor observada durante os eclipses totais do Sol - Figura 5, caracteriza-se por variações de forma e largura que

costumam acompanhar o Ciclo das Manchas Solares. Sua densidade é de 2-3 ordens de grandeza mais baixa do que aquela da Cromosfera, e sua temperatura é de 1 a 2 milhões de graus. Como a temperatura é extremamente alta, a Coroa emite grande quantidade de raios-X. Além disso, a esta temperatura o gás encontra-se na forma de plasma – gás ionizado – produzindo assim os elétrons e íons que podem formar o chamado Vento Solar. Este vento se propaga por todo o Sistema Solar e eventualmente atinge a Terra.

Nesta camada são observadas as chamadas regiões ativas, local onde temperatura e densidade são elevadas além de possuírem campos magnéticos intensos distribuídos em formato de arcos com as pontas – pólos magnéticos – situadas na Fotosfera.



**Figura 5:** Exemplo de eclipse solar total.

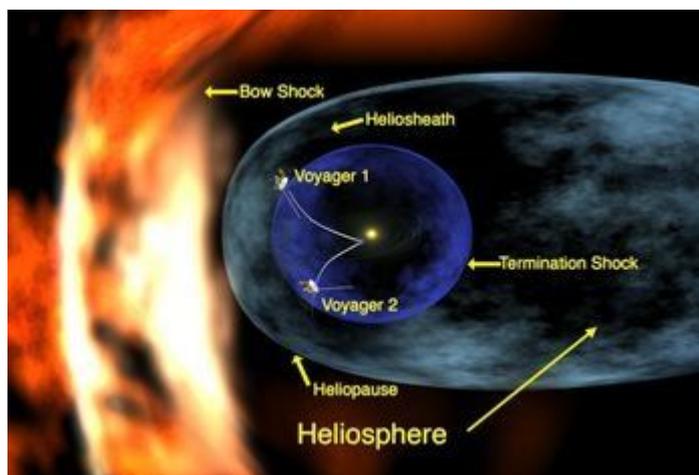
Fonte: [http://www.ccvalg.pt/astronomia/sistema\\_solar/sol.htm](http://www.ccvalg.pt/astronomia/sistema_solar/sol.htm)

## 2.2 O VENTO SOLAR

Sua existência foi primeiramente sugerida por Ludwig Biermann, entre 1951 e 1957, baseado no estudo da direção de caudas ionizadas de cometas, que o levaram a postular uma emissão de radiação corpuscular contínua (Brandt, 1970). A existência do Vento Solar também foi sugerida por outros cientistas que notaram mudanças no Campo Geomagnético, um dia ou mais após a ocorrência de grandes “Flares” solares (Burlaga, 1995).

O Vento Solar trata-se de um fluxo de elétrons e íons positivos que são expulsos da Coroa Solar em alta velocidade – cerca de 600 km/s – e uma densidade média de  $5 \text{ cm}^{-3}$  (Brandt, 1970) e propagam-se pelo meio interplanetário. Estas partículas se originam dos chamados Buracos Coronais e escapam do Sol para o espaço através das linhas abertas do campo magnético. Eventualmente, este vento atinge e interage com a Terra causando tanto o fenômeno conhecido como Aurora, quanto perturbações no Campo Magnético, quando interagindo com a Magnetosfera Terrestre causa sua deformação na direção da linha Sol-Terra, como representado na Figura 6.

E. N. Parker em 1958 formulou um modelo dinâmico com um fluxo de partículas saindo da base da Coroa. Este modelo propôs que o gradiente de pressão dos constituintes da Coroa Solar continuamente acelera o fluxo de partículas para fora do sol. O Vento Solar foi primeiramente medido pelas sondas soviéticas Lunik 2 e Lunik 3 em 1960, e pela sonda Norte Americana Mariner 2 em 1962, confirmando as previsões de E. N Parker. Desde então numerosas sondas e espaçonaves fizeram experimentos e identificaram como segundo mais abundante componente, o íon  $^4\text{He}^{++}$  - 5% -. Íons como  $^3\text{He}^{++}$ ,  $^4\text{He}^+$ ,  $\text{O}^{6+}$ , e  $\text{C}^{3+}$  também existem no Vento Solar, porem em menores quantidades – Parks, 1991 –.



**Figura 6:** A figura mostra a forma como o Vento Solar pressiona e define a forma da Magnetosfera Terrestre.

Fonte: <http://www.lagoaviva.org/index.php?pagina=40>

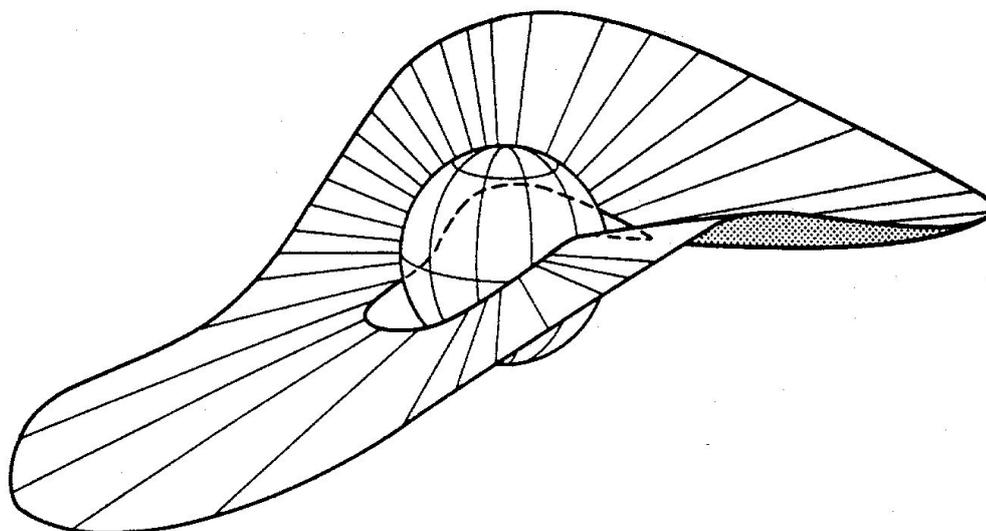
### 2.3 O CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO

O sol possui um campo magnético, cuja intensidade é  $10^{-4}$  T na superfície da Fotosfera. Este campo é aproximadamente dipolar (Pneuman e Kopp, 1970), porém devido ao fato do Vento Solar ser altamente condutor, ele é transportado para grandes distâncias, constituindo o chamado Campo Magnético Interplanetário – CMI –, que tem seu aspecto representado na Figura 7 e intensidade de aproximadamente 5 nT nas vizinhanças da Terra.

O eixo do dipolo magnético é próximo ao eixo de rotação do Sol, e pode-se imaginar um plano de simetria cortando o seu equador. As linhas de Campo Magnético Interplanetário são aproximadamente radiais próximas ao Sol – de 1,5 a 2,5 raios solares –, entretanto no Sol acima do plano de simetria e saindo abaixo deste plano, dependendo da fase do ciclo solar de 22 anos. No Meio Interplanetário, a transição entre as linhas de campo entrando e saindo do Sol constitui uma estreita região, não necessariamente planar, onde se forma uma lamina de corrente, chamada Lamina de Corrente Heliosferica, LCH (Schultz, 1973). Essa lamina separa um hemisfério com polaridade negativa de outro com polaridade positiva como pode ser visto na Figura 8.



**Figura 7:** Aspecto do Campo Magnético Interplanetario  
Fonte: <http://www.spaceweathercenter.org>



**Figura 8:** Lâmina de Corrente Heliosférica – LCH, próxima ao Sol.  
Fonte: Burlaga et al. (1981a, p.8895).

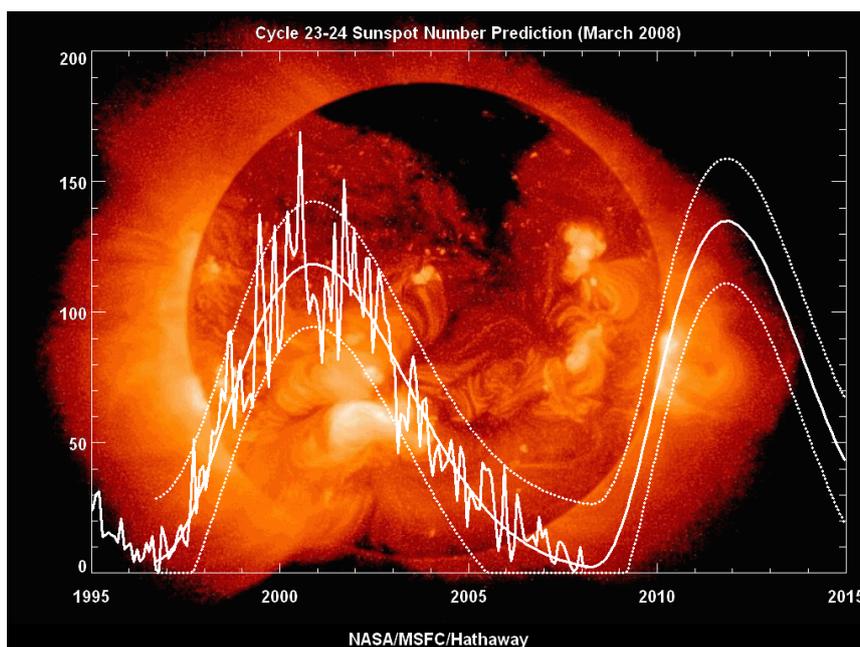
Devido a rotação solar, o Campo Magnético Interplanetário tem, em larga escala o aspecto de uma espiral de Arquimedes, sendo quase radial próximo ao Sol e praticamente perpendicular a direção radial além de 5-10 UA. Na vizinhança da Terra, 1 UA, o CMI tem inclinação de aproximadamente 45°.

## 2.4 CICLO SOLAR DE 11 ANOS

Desde sua descoberta no século XV por Galileo Galilei, as manchas solares são observadas por muitos cientistas. De tempos em tempos o número de manchas solares observado varia de valores muito grandes a seu completo desaparecimento da superfície do Sol. Este período é denominado ciclo solar e tem duração aproximada de 11 anos.

O ciclo é composto basicamente por quatro etapas o mínimo, fase ascendente, máximo e fase descendente.

Durante a fase ascendente e o máximo solar ocorre o aumento de fenômenos energéticos nas regiões ativas associadas às manchas solares. Estes fenômenos são as explosões solares (*flares*) e as ejeções coronais de massa (CMEs), que podem causar tempestades geomagnéticas. A Figura 9 mostra um gráfico do número de manchas solares em função dos anos caracterizando o ciclo solar 23.



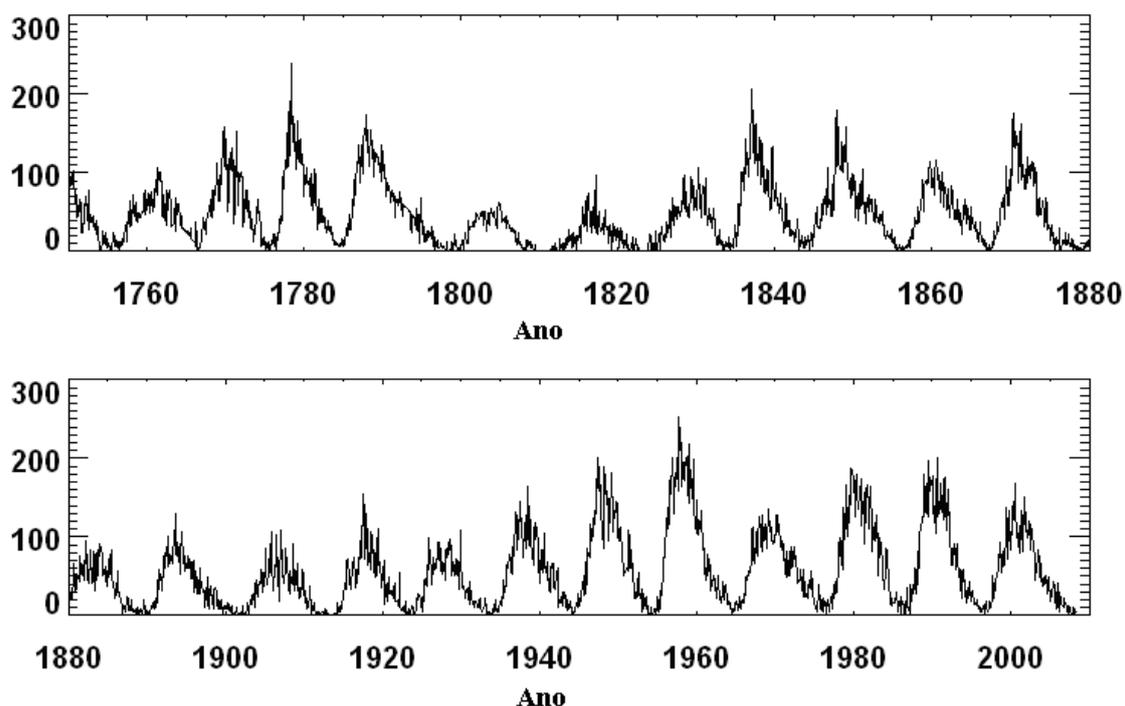
**Figura 9:** Gráfico do número de manchas solares em função dos anos caracterizando o ciclo solar de 11 anos.

Fonte: [http://science.nasa.gov/headlines/y2008/images/oldcycle/ssn\\_predict\\_1.gif](http://science.nasa.gov/headlines/y2008/images/oldcycle/ssn_predict_1.gif).

Durante a fase descendente e o mínimo solar as principais causas das tempestades geomagnéticas são as regiões de interação co-rotante. A fase descendente é a última fase do ciclo solar e a cada novo ciclo a polaridade do campo magnético do Sol se inverte.

Um novo ciclo começa quando a primeira mancha solar é observada. Atualmente estamos no início do ciclo solar 24.

As manchas solares originam-se em altas latitudes e migram para latitudes mais baixas até atingirem o equador solar na fase do máximo solar. Além do ciclo de 11 anos o sol possui outro ciclo de 22 anos. A Figura 10 mostra o número de manchas solares a partir do ano de 1749.



**Figura 10:** Gráficos mostrando o número de manchas solares a partir de 1749.  
Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/zurich.gif>.

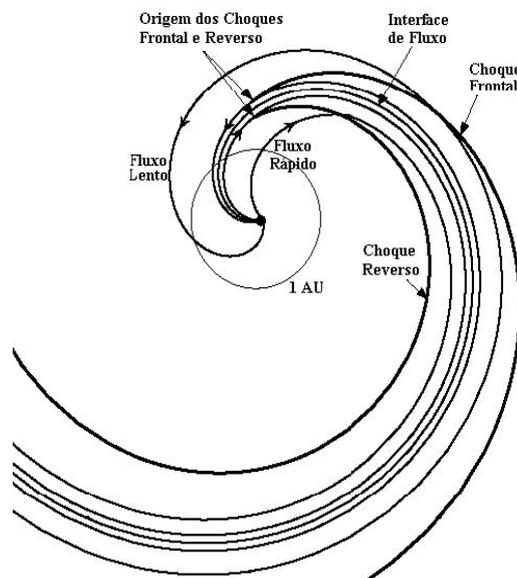
## 2.5 ESTRUTURAS MAGNÉTICAS NO MEIO INTERPLANETÁRIO

### 2.5.1 REGIÃO DE INTERAÇÃO CO-ROTANTE

As regiões de interação co-rotante (do inglês *corotating interaction region*, CIR) se originam da interação de feixes de plasma rápidos e lentos. Os feixes de plasma rápidos se originam dos buracos coronais nas regiões polares do Sol, pois nestas regiões as linhas do campo magnético solar são abertas permitindo o fluxo de partículas. Os feixes de plasma lentos se originam perto do equador solar, onde as linhas do campo magnético solar são fechadas, oferecendo resistência ao movimento das partículas, assim diminuindo a velocidade das partículas.

Uma CIR é formada quando um feixe lento desloca-se à frente de um feixe rápido. Com o aumento da distância heliocêntrica radial o vento solar rápido choca-se com o feixe lento e forma uma região de compressão. O feixe rápido arrasta o feixe

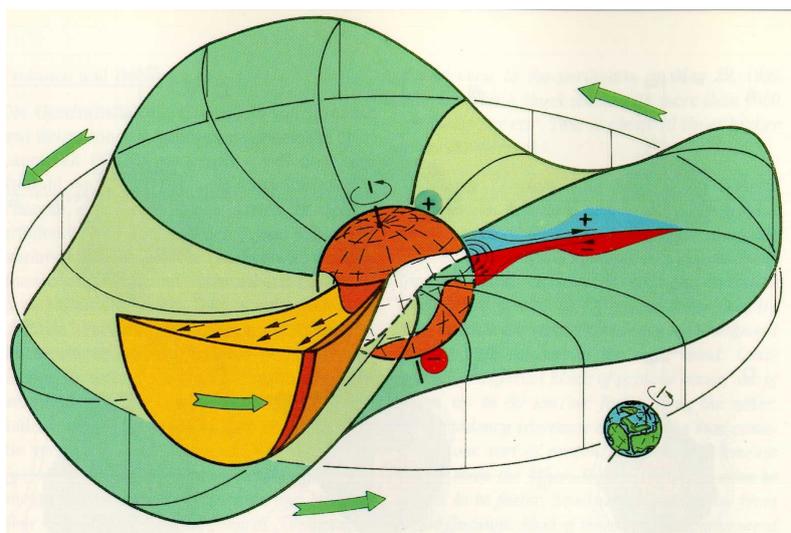
lento e com isso, cria uma região de rarefação na parte traseira da estrutura, a Figura 11 mostra o campo magnético interplanetário em forma de uma espiral.



**Figura 11:** Representação esquemática de uma CIR.  
Fonte: Modificado de (Crooker e Gosling, 1999).

Quando a pressão do vento solar na região de compressão atinge um valor determinado, à aproximadamente 2 AU, surge um choque frontal no vento lento e um choque reverso no vento rápido.

Há uma relação entre estruturas de setores e o campo magnético interplanetário (Wilcox e Ness, 1965). As estruturas são associadas com a lâmina de corrente heliosférica (LCH), que é envolta pelo vento solar lento. Em três dimensões a LCH parece oscilar criando uma figura parecida com uma “saia de bailarina” (Alfvén, 1977), como mostra a Figura 12.



**Figura 12:** Visão da estrutura de setor interplanetária e da lâmina de corrente heliosférica.

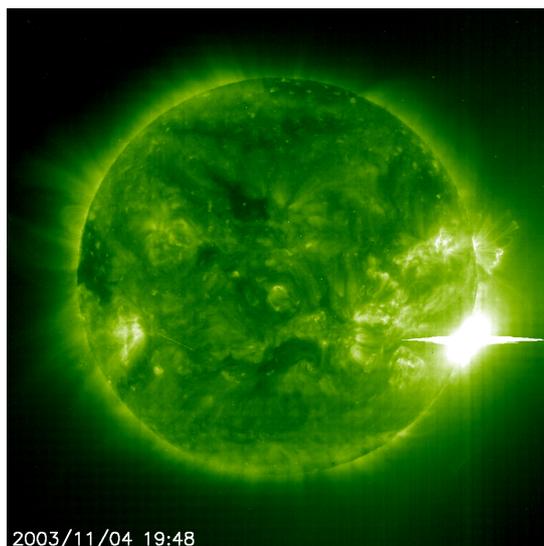
Fonte: Rainer Schwenn comunicação pessoal.

## 2.5.2 EXPLOSÕES SOLARES

As explosões solares foram observadas pela primeira vez em 1859, pelo astrônomo inglês Carrington, enquanto contava o número de manchas solares. Repentinamente, segundo seu relato, "dois pontos de luz branca e extremamente brilhante surgiram", próximas a um conjunto de manchas. Ele procurou outra pessoa para observar o fenômeno, mas quando retornou ao observatório as explosões já tinham parado.

O que o Carrington observou em 1859 foi apenas uma fração do que acontece. O brilho das explosões é maior em um comprimento de onda que um observador na Terra não pode ver (nossa atmosfera impossibilita a análise de emissões de raios-X e gama).

Explosões solares são definidas como uma súbita, rápida e intensa variação na luminosidade observada na superfície solar, Figura 13. Uma explosão ocorre quando energia magnética que estava armazenada na superfície solar é subitamente liberada.



**Figura 13:** Imagem de uma explosão solar.

Fonte: [http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2003\\_11\\_04/eit195.gif](http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2003_11_04/eit195.gif).

A radiação é emitida em praticamente todo o espectro eletromagnético, além da energia magnética também são liberados elétrons, prótons e núcleos pesados que são aquecidos e acelerados na atmosfera solar. A energia liberada durante uma explosão é tipicamente da ordem de  $10^{27}$  ergs/s. Grandes explosões podem emitir até  $10^{32}$  ergs de energia.

### 2.5.3 ONDAS DE CHOQUE

Tanto a teoria magnetohidrodinâmica (MHD) quanto à dinâmica de fluidos explicam a variação descontínua de campos físicos em um ponto sobre algumas superfícies (Richter et al., 1985). Tais discontinuidades são chamadas de ondas de choque e são formadas quando um objeto físico se desloca com uma velocidade acima das características do meio em que está se propagando, como por exemplo, um avião do tipo Concorde que possuía uma velocidade de cruzeiro de aproximadamente 2.346 km/h, uma velocidade superior à velocidade do som no ar que é aproximadamente 1.224 km/h.

Na teoria MHD existem três velocidades características: a velocidade do som, a velocidade de Alfvén e a velocidade magnetossônica. Para que seja formada uma onda de choque no meio interplanetário é necessário que uma estrutura viaje com uma

velocidade maior do que pelo menos uma das velocidades características do meio (Parks, 1991).

Estas velocidades podem produzir cinco tipos de choques MHD: choques rápidos, choques lentos e três tipos de choques intermediários. Apenas os choques rápidos e lentos estão presentes no vento solar, sendo identificados pela elevação da intensidade do campo magnético para o caso do choque rápido, ou pela redução da intensidade do campo magnético para o caso do choque lento.

Se a onda de choque se desloca do Sol para o meio interplanetário diz-se que o choque é frontal (do inglês *forward*) o caso contrário, quando a onda de choque se desloca do meio interplanetário para o Sol diz-se que o choque é reverso (do inglês *reverse*). Como o vento solar se desloca no sentido saindo do Sol com velocidade supersônica, ambos os choques se movem com o mesmo sentido, para fora do Sol (Burlaga, 1995).

A onda de choque realiza um processo de transferência de energia cinética, devido ao fluxo à frente do choque, em energia térmica atrás do choque sendo essa uma das motivações para o seu estudo.

#### 2.5.4 EJEÇÃO CORONAL DE MASSA

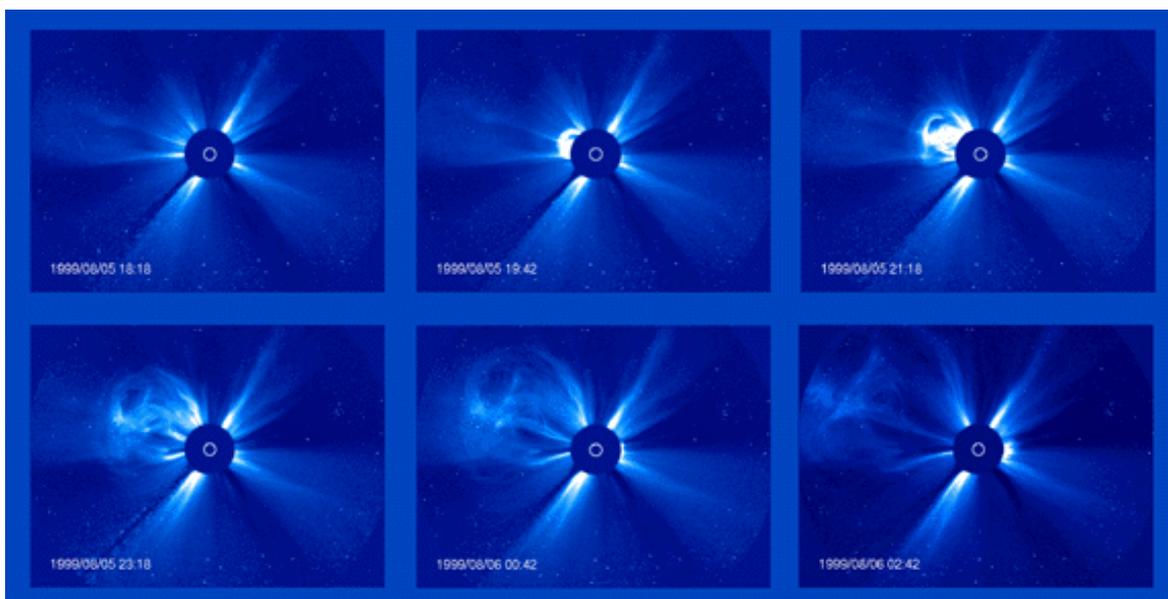
Uma ejeção coronal de massa (do inglês *coronal mass ejection* - CME) é um desprendimento de plasma solar, observado a partir da coroa, que se propaga através do espaço interplanetário e produz distúrbios geomagnéticos quando interage com o campo magnético terrestre. Estas estruturas viajam com uma velocidade de várias centenas de *km/s*, arrastando consigo o plasma do vento solar e o campo magnético interplanetário. Devido a sua velocidade estas estruturas são quase sempre acompanhadas por uma onda de choque.

A estrutura das CMEs é tipicamente caracterizada por um *loop* externo, cavidade interna com densidade menor e proeminência eruptiva interna (Hundhausen, 1998).

A origem das CMEs pode estar relacionada com estruturas chamadas de *helmet streamers* que é um feixe em forma de arcada ao longo e sobre uma linha de inversão de polaridade fotosférica (Sturrock e Smith, 1968), uma vez que os *helmet streamers*

normalmente apresentam proeminências.

A seqüência de imagens do coronógrafo, na Figura 14 mostra a estrutura da densidade da coroa solar e suas variações temporais, bem como suas expulsões transientes de plasma, que são a essência das CMEs (Hundhausen, 1997).



**Figura 14:** Sequência de imagens mostrando a ocorrência de uma CME observada pelo coronógrafo LASCO C3 a bordo do satélite SOHO em junho de 1999.

Fonte: [http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/cmeprogchart\\_prev.jpg](http://sohowww.nascom.nasa.gov/gallery/images/large/cmeprogchart_prev.jpg)

O coronógrafo mede a radiação fotosférica espalhada por elétrons no plasma coronal ionizado, mostrando a estrutura da densidade da Coroa. Tipicamente as CMEs têm uma frequência relacionada com o ciclo solar, podendo ser observado cerca de um evento por semana, no mínimo do ciclo enquanto podem ocorrer 2 a 3 eventos por dia nos períodos do máximo da atividade solar.

As CMEs foram divididas em dois tipos principais (Sheeley et al., 1999): CMEs graduais, aparentemente formadas pela elevação de proeminências e suas cavidades, vindas da baixa coroa, apresentando aceleração gradual até valores da ordem de 400-600 km/s<sup>2</sup> e CMEs impulsivas, associadas a explosões e ondas EIT (*Extreme Ultraviolet Image Telescope*), que são ondas observadas em comprimento de onda ultravioleta, não apresentando aceleração e com velocidades iniciais maiores eu 750 km/s. Portanto a relação entre explosões e CMEs não está esclarecida, não sendo possível afirmar que um é causa/efeito do outro ou que são eventos independentes.

Quando observadas no meio interplanetário, as CMEs são denominadas “ejeções coronais interplanetárias de massa” (do inglês *interplanetary coronal mass ejections*, ICMEs). As observações de ICMEs no meio interplanetário são feitas por sondas e satélites orbitando a Terra fora da magnetosfera terrestre, o ponto Lagrangeano interno L1 do sistema Sol – Terra, localizado a aproximadamente 240 raios terrestres da Terra. Estes instrumentos capturam imagens do Sol e medem intensidade e direção do campo magnético e parâmetros de plasma tais como, temperatura, densidade e velocidade de íons e elétrons do vento solar. Dentre os diversos satélites usados para este fim podemos citar o ACE (*Advanced Composition Explorer*), SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*) e o STEREO (*Solar Terrestrial Relations Observatory*).

As nuvens de plasma resultantes de ICMEs observadas no meio interplanetário não apresentam uma única característica. Segundo Neugebauer e Goldstein (1997), tais características das ICMEs são:

- 01 - Baixa temperatura de íons para uma dada velocidade do vento solar, razão para tal característica é a expansão da estrutura;
- 02 - Anisotropia não usual da distribuição de prótons com temperatura paralela superior a temperatura perpendicular ao campo magnético interplanetário, causado pela conservação do momento magnético dos íons à medida que o plasma se expande;
- 03 - Abundância de Helio não usual;
- 04 - Abundância de outras espécies iônicas;
- 05 - Feixes bidirecionais de elétrons supratérmicos e íons energéticos. Caracteriza uma configuração de campo magnético interplanetário é possível que seja o campo magnético interno de uma ejeção, fechado e com extremidades presas no Sol;
- 06 - Suave e intenso campo magnético interfere nos valores de parâmetro  $\beta$  de plasma, que quando combinado com baixas temperaturas levam o parâmetro  $\beta$  a baixos valores. Este parâmetro é geralmente menor que 0,1;
- 07 - Presença de rotação do campo magnético, algumas destas configurações são chamadas de nuvens magnéticas quando possuem: aumento de seu campo magnético por um fator maior que 2; suave rotação por um amplo intervalo de

ângulo; e baixa temperatura iônica;

08 - Decréscimo do fluxo de raios cósmicos.

No ano de 1982, Howard e colaboradores relataram à observação de uma CME que apresentava uma estrutura anular que cobria quase todo o entorno do osculador do coronógrafo usado na missão P78-1. Os autores chegaram a conclusão que a essa CME se deslocava em direção a Terra devido à observação de uma tempestade geomagnética subsequente, e devido à forma anular da estrutura denominaram-na ejeção coronal de massa “halo”.

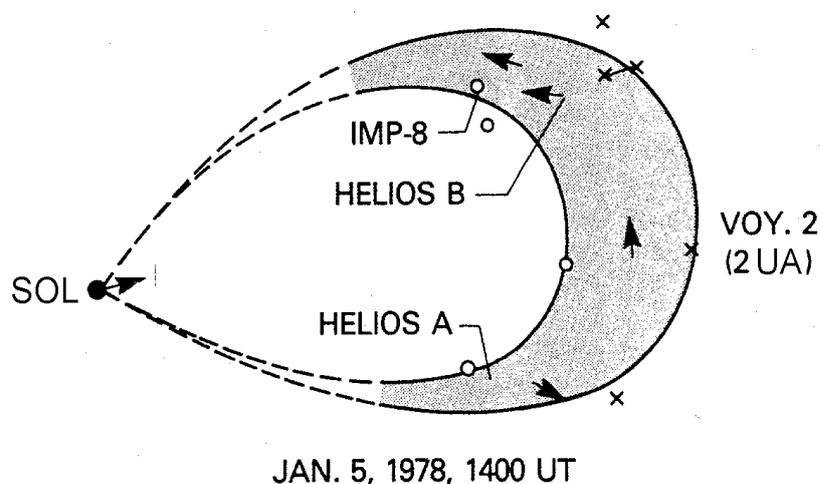
### 2.5.5 NUVENS MAGNÉTICAS

As nuvens magnéticas (do inglês *magnetic clouds*) são um subconjunto de CMEs observadas no meio interplanetário (ICME), representando aproximadamente 1/3 das ICMEs observadas em 1UA (Gosling, 1990). Elas apresentam estruturas bem definidas e estão relacionadas às principais causas de tempestades geomagnéticas não recorrentes devido às suas características de campo magnético.

Burlaga et al. (1981) definiram nuvem magnética como uma estrutura com extensão radial com aproximadamente 0,25 UA (em 1 UA), levando aproximadamente 24 h para atravessar o satélite observador, com um campo magnético mais intenso que o do vento solar normal, normalmente  $B > 10$  nT, suave rotação da direção do campo magnético em um grande ângulo, próximo a  $180^\circ$ , baixa temperatura e baixo valor do parâmetro beta,  $\beta \sim 0,1$ .

Uma nuvem magnética observada por vários satélites possibilitou o estabelecimento de sua geometria, mostrada na Figura 15, adaptada de Burlaga et al. (1990). Na figura estão indicados os satélites que observaram o evento ocorrido em 5 de Janeiro de 1978: IMP-8, Hélios A e Voyager 2. Na Figura 15, os “x” representam a fronteira dianteira da nuvem magnética vista por cada um dos satélites, e os círculos representam a fronteira traseira. As setas indicam a direção do campo magnético observado por cada um dos satélites. Esta situação é bastante rara, pois normalmente

não é possível observar nuvens magnéticas com mais de um satélite simultaneamente.



**Figura 15:** Geometria de uma nuvem magnética.  
Fonte: Adaptado de Burlaga et al. (1990, p.376).

A razão principal das nuvens magnéticas estarem entre as principais causas de tempestades magnéticas é o fato de freqüentemente apresentarem campo magnético  $B_z$  negativo e intenso,  $B > 10$  nT por intervalos de tempos superiores à 3h, cumprindo os critérios de Gonzáles e Tsurutani (1987) para a ocorrência de tempestades intensas.

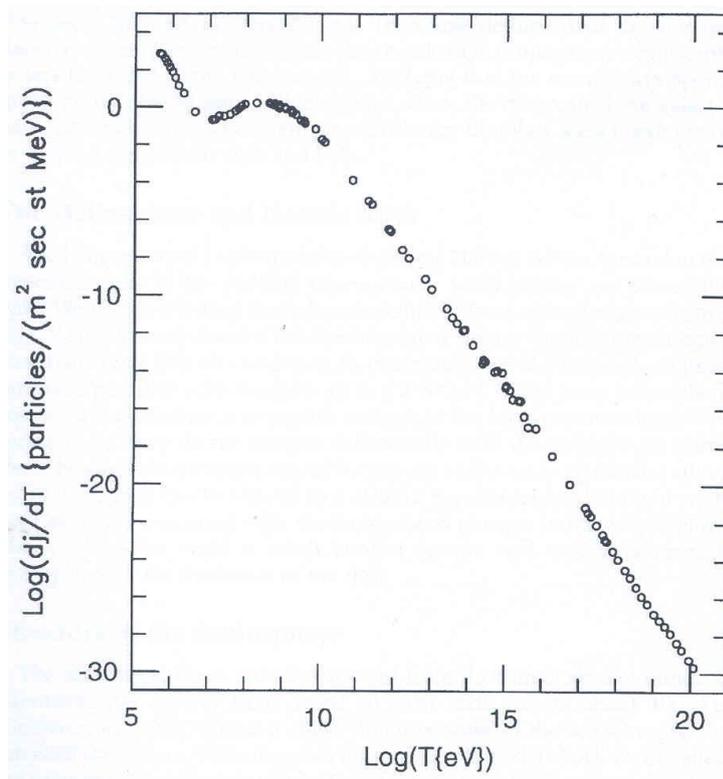
Devido ao aumento de densidade e velocidade, a pressão exercida na magnetosfera terrestre causa uma repentina compressão na magnetosfera e um salto positivo na componente horizontal H. Este salto é representado por um aumento do índice Dst e é observado na chegada do choque. Nesta fase ocorre o impulso repentino (*sudden impulse*, SI). Desde que SI é seguido pela fase principal da tempestade, é chamado de começo repentino de tempestade (*sudden impulse commencement*) o início da tempestade ocorre quase coincidentemente com o giro do CMI para a direção sul nos limites da nuvem magnética (Gonzalez et al., 1989). O desenvolvimento da fase principal da tempestade é rápido.

## 2.6 RAIOS CÓSMICOS

Apesar de o nome sugerir que este tipo de radiação seja composta por “raios” originados no espaço exterior, os raios cósmicos são, na realidade, compostos por

partículas energéticas, cujo poder de penetração é muito superior ao de qualquer outra partícula conhecida, seu espectro de energia varia desde alguns MeV até acima de  $10^{21}$  eV, a Figura 16 mostra um gráfico da distribuição da energia dos raios cósmicos. Existem dois fatos relativos ao espectro de energia que são importantes para a discussão sobre a origem dos raios cósmicos galácticos. Um é a isotropia dos raios cósmicos medida para energias  $\leq 10^{15}$  eV e o outro é sua constância sobre um longo período de tempo, aproximadamente  $10^9$  anos.

Com isto, a fonte dos raios cósmicos deve produzir partículas com energia próxima a  $10^{21}$  eV e com um espectro de potências dado por  $I(E) \propto E^{-2.7}$  (Mursula e Usoskin, 2003). Além disso, a energia total produzida deve ser da ordem de  $10^{49}$  ergs/ano em nossa galáxia, os raios cósmicos devem ser isotrópicos e constantes durante  $10^9$  anos. Também, o espectro primário deve incluir elementos pesados em torno de aproximadamente  $Z = 100$ .



**Figura 16:** Intensidade dos raios cósmicos em função da energia.  
Fonte: Jokipii (1998).

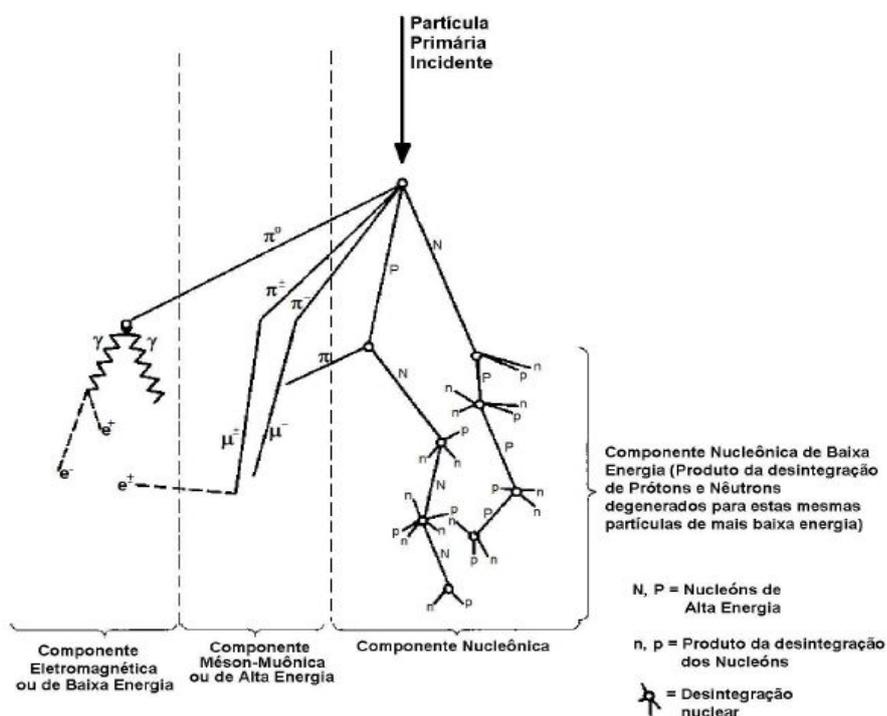
Os raios cósmicos podem ser divididos em duas categorias raios cósmicos primários e raios cósmicos secundários.

Os raios cósmicos primários são partículas que sofrem a modulação heliosférica, podendo ser originadas em três locais diferentes no centro da galáxia, raios cósmicos galácticos (do inglês *galactic cosmic rays*, GCR), no Sol, raios cósmicos solares (do inglês *solar cosmic rays*, SCR) e na heliosfera através da interação de partículas neutras do gás interestelar com o vento solar, raios cósmicos anômalos (do inglês *anomalous cosmic rays*, ACR).

Os raios cósmicos secundários são produtos da interação dos raios cósmicos primários com a atmosfera terrestre, sofrem as modulações principalmente do campo magnético e da atmosfera terrestre.

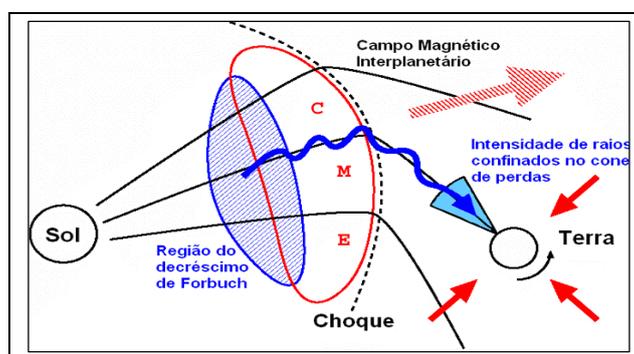
Na região de baixa energia, os estudos das emulsões fotográficas revelaram que os processos são caracterizados por traços radiais a partir do ponto de interação, conhecidos como estrelas. Alguns destes rastros são reconhecidos como sendo píons, outros representando nucleons e um deles sendo o remanescente do núcleo original. A Figura 17 mostra, esquematicamente, algumas das partículas secundárias de um “chuveiro” de raios cósmicos, gerado a partir da interação das partículas primárias de raios cósmicos com os constituintes atmosféricos.

Um dos produtos dos raios cósmicos são os muons, componente méson-muônica, os muons são partículas subatômicas que possuem a mesma carga do elétron, porém tem massa 207 vezes maior. Eles possuem grande poder de penetração e mantêm a direção e o sentido do raio cósmico primário que os originou. A figura mostra três tipos de componentes a componente méson-muônica, componente eletromagnética e componente nucleônica.



**Figura 17:** Diagrama esquemático de um chuva de raios cósmicos.  
 Fonte: Modificado de Forbush (1993).

A relação entre a incidência na Terra dos raios cósmicos e as estruturas interplanetárias é de grande importância para o estudo do Clima Espacial, pois quando uma estrutura como uma nuvem magnética se aproxima, ela age como um escudo fazendo com que a taxa de raios cósmicos que incidem na Terra, vindos daquela direção diminua, veja Figura 18. Através disso é possível perceber quando uma nuvem magnética se aproxima da Terra e prever a ocorrência de uma tempestade geomagnética.



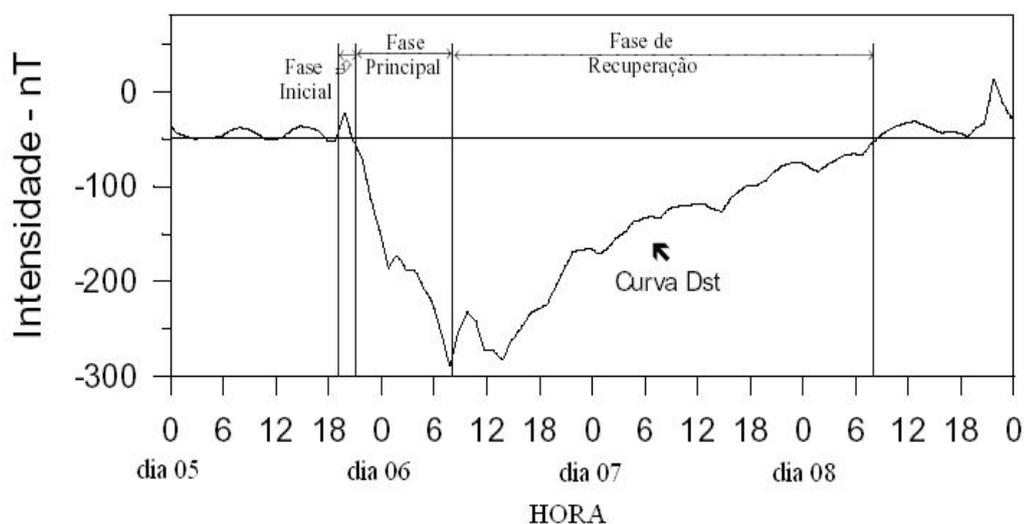
**Figura 18:** Ilustração do bloqueio de raios cósmicos por uma CME.  
 Fonte: Adaptado de Nagashima et al. (1992) e Ruffolo et al. (1999).

Quando há uma tempestade geomagnética acontece um novo decréscimo na taxa

de raios cósmicos que atingem a Terra, mas desta vez de maneira global e este decréscimo é denominado decréscimo de *Forbush*.

## 2.7 TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS

Tempestades Geomagnéticas são eventos que ocasionam grandes perturbações no Campo Magnético Terrestre, onde a Terra fica vulnerável a precipitação de partículas energéticas do Vento Solar, tendo recebido esta denominação desde a metade do século XIX (Gonzalez, 1994). A característica principal de uma Tempestade Geomagnética é o decréscimo acentuado da componente horizontal, H, do Campo Geomagnético e a posterior fase de recuperação (Kamide, 1998). O decréscimo atribui-se a um aumento da quantidade de partículas aprisionadas na magnetosfera. Este decréscimo é descrito quantitativamente através de vários índices dentre eles o principal se chama Dst. O índice Dst é baseado nas medidas horárias da componente horizontal, H, do Campo Geomagnético obtido em observatórios de latitudes média e baixa. As variações do índice DST durante uma Tempestade Geomagnética é mostrado na Figura 19.



**Figura 19:** Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982  
Fonte: Adaptada de Yamashita (1999)

As tempestades geomagnéticas podem causar danos tais como:

- Efeitos sobre a rede de transmissão de energia elétrica gerando “black-out”.

- Danos em satélites causados por partículas de alta energia.
- Mudanças nos arrastos atmosféricos em satélites.

Além dos danos as tempestades também provocam fenômenos fascinantes, como a formação das auroras nos pólos, Figura 20.

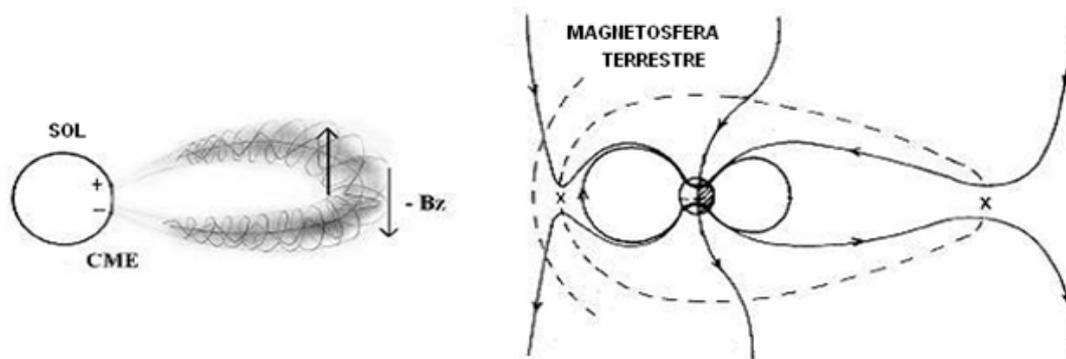


**Figura 20:** Aurora formada após uma tempestade geomagnética.

Fonte: [http://sohowww.nascom.nasa.gov/spaceweather/lenticular/AUR\\_coron\\_curtis.jpg](http://sohowww.nascom.nasa.gov/spaceweather/lenticular/AUR_coron_curtis.jpg)

Todas as estruturas citadas acima podem causar ou tem influência na ocorrência de tempestades, sendo as CMEs e as nuvens magnéticas as principais causas das tempestades mais intensas (Gosling et al., 1990, 1991).

As nuvens magnéticas causam as tempestades geomagnéticas quando ao interagir com a magnetosfera a componente Z do campo magnético da estrutura é antiparalela a magnetosfera. Quando isto ocorre diz-se que há o fenômeno de reconexão dos campos. A Figura 21 mostra a interação entre uma CME tipo nuvem com a magnetosfera, onde são mostradas as direções da componente do campo da nuvem e da magnetosfera.



**Figura 21:** Ilustração da interação entre uma nuvem magnética, oriunda de uma ICME, com a magnetosfera terrestre.

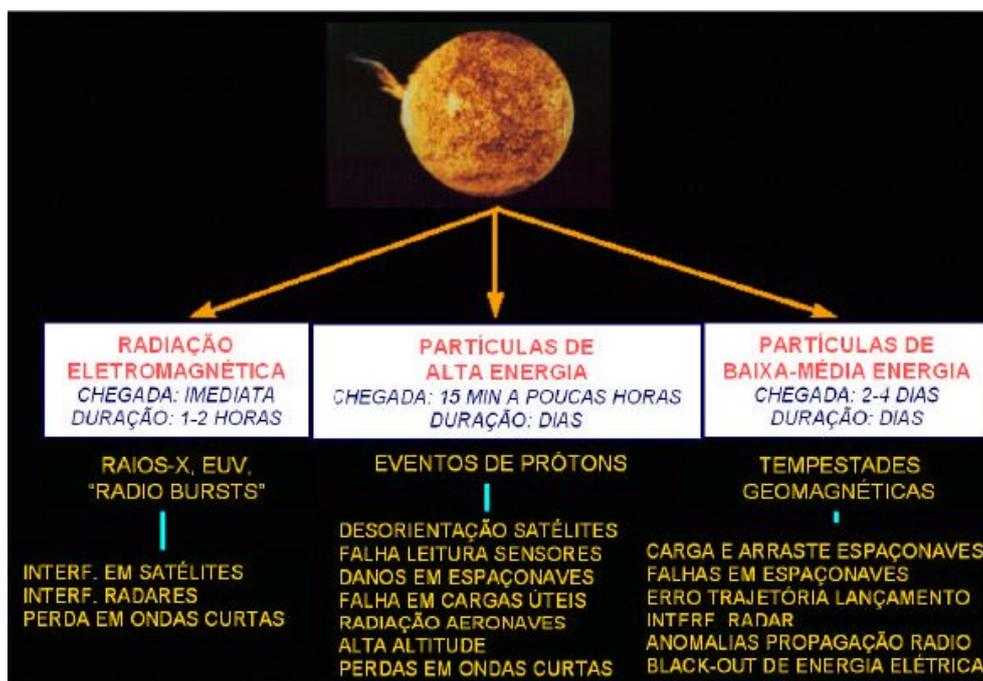
Fonte: Adaptado de Tsurutani e Gonzalez et al. (1997).

Com os vários danos causados na Terra por estas estruturas fica óbvia a necessidade de um estudo detalhado sobre a natureza física das estruturas interplanetárias bem como dos mecanismos que as geram no Sol. Neste sentido somam-se esforços dos principais centros de pesquisa do mundo resultando em grandes avanços científicos, como a possibilidade de previsão das tempestades geomagnéticas.

Existem diversos índices para a classificação das tempestades geomagnéticas, neste trabalho foi usado o índice Dst do *World Data Center for Geomagnetism* (Kyoto, Japão) disponível no site <http://swdcdb.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir>.

De um modo geral a área científica responsável pelo estudo e sensoriamento remoto do geoespaço, através de observações *in situ*, é denominada como Clima Espacial.

Clima Espacial é o conjunto de variações das condições do meio interplanetário por influência da atividade solar. Alguns exemplos dessas condições são o vento solar, a radiação eletromagnética e o campo magnético interplanetário. A Figura 22 mostra os fenômenos que afetam o Clima Espacial mostrando os seus tempos de chegada na Terra e de duração, as energias envolvidas e seus principais efeitos.



**Figura 22:** Fenômenos que afetam o Clima Espacial, energias envolvidas, tempo de duração de seus efeitos e principais tipos de danos em sistemas tecnológicos.

Fonte: Schwenn (comunicação pessoal), (apud Dal Lago, 2003).

### 3 CAPÍTULO: METODOLOGIA

No Capítulo é descrita a metodologia adotada na realização do projeto. Inicialmente é feita uma pequena descrição do satélite ACE e dos instrumentos SWPAN e MAG. Após é feita uma explanação do satélite SOHO e dos instrumentos LASCO e EIT, na última parte do capítulo é explicado de forma sucinta, o Detector Multi-Direcional de Muons – DMM e do método de contagem por cintilação. Todos os dados usados na execução do projeto são tratados em linguagem IDL.

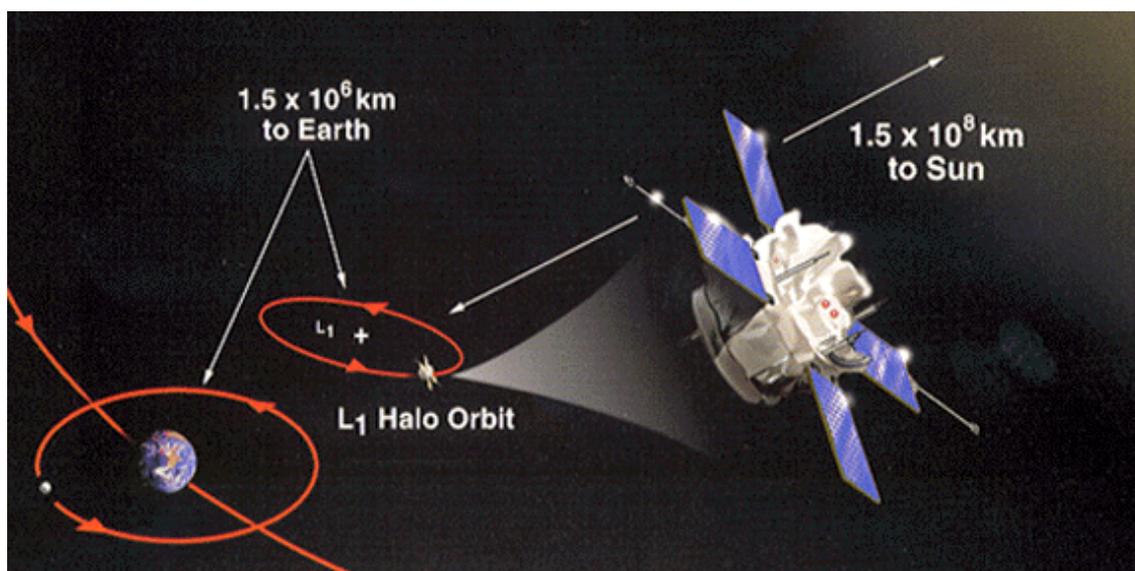
#### 3.1 O SATÉLITE ACE

O satélite ACE (do inglês *Advanced Composition Explorer*) é um projeto da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e foi lançado em 25 de agosto de 1997 do *Kennedy Space Center* na Florida.

O satélite tem 1,6 m de comprimento e 1 m de altura, não incluindo os quatro

painéis solares e a antena do magnetômetro. No momento de lançamento sua massa era de 785 kg, sendo 189 kg de combustível inserção e correção da órbita. Seus painéis solares geram aproximadamente 500 W de potência.

O ACE encontra-se a aproximadamente 1,5 milhões de km da Terra, orbitando o ponto Lagrangeano interno L1, que é o ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra. O ACE está em uma posição constante em relação à Terra e assim como ela gira em torno do Sol, a Figura 23 é uma ilustração do ACE e da sua órbita.



**Figura 23:** Ilustração representativa da órbita do satélite ACE, o ponto Lagrangeano L1, a distância do L1 em relação à Terra e ao Sol.

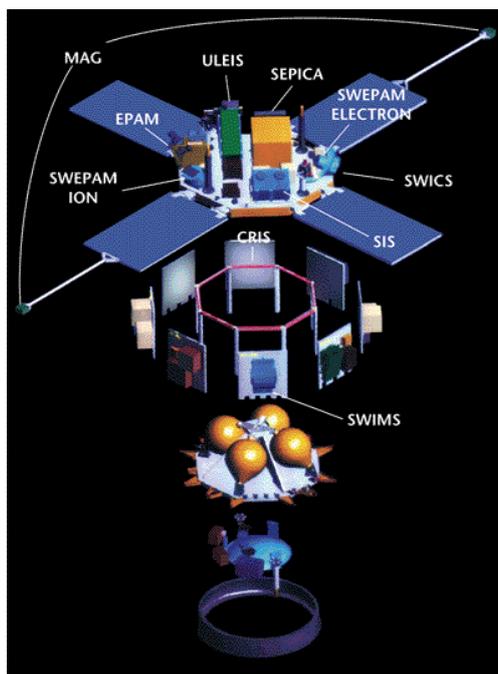
Fonte: [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace\\_mission.html](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html)

Os principais objetivos da missão do ACE são determinar a composição elementar e isotópica de diversas substâncias, incluindo a coroa solar, o meio interplanetário e galáctico. O estudo relacionado ao Sol é feito através da medição direta da composição do vento solar, CMEs e de partículas solares expelidas durante alguma atividade solar.

Para coletar os dados usados para estudo o ACE conta com 10 instrumentos, listados abaixo, que estão dispostos em sua maioria na parte superior do satélite, a Figura 24 mostra um esquema da disposição dos instrumentos no ACE.

- CRIS (*Cosmic Ray Isotope Spectrometer*)
- SIS (*Solar Isotope Spectrometer*)
- ULEIS (*Ultra Low Energy Isotope Spectrometer*)

- SEPICA (*Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer*)
- SWIMS (*Solar Wind Ion Mass Spectrometer*)
- SWICS (*Solar Wind Ionic Composition Spectrometer*)
- EPAM (*Electron, Proton, and Alpha Monitor*)
- SWEPAM (*Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor*)
- MAG (*Magnetometer*)
- RTSW (*Real Time Solar Wind*)



**Figura 24:** Ilustração da disposição dos instrumentos a bordo do ACE.

Fonte: [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace\\_mission.html](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html)

Dentre os instrumentos a bordo do ACE neste projeto foram usados dados dos instrumentos SWEPAM e MAG.

O SWEPAM mede o fluxo de partículas, elétrons e íons, no vento solar como funções da posição e da energia, com isso ele fornece dados de parâmetros como velocidade, temperatura, densidade do vento solar, estes dados proporcionam o estudo das condições internas do plasma do vento solar. Os dados do SWEPAM estão disponíveis no site da missão ACE (<http://www.srl.caltech.edu/ACE>), onde ainda encontram-se dados do meio interplanetário em tempo real.

O MAG é basicamente um sistema composto por dois magnetômetros fluxgate gêmeos que estão instalados no final de dois painéis solares que estão opostos, ver

Figura 24. O MAG fornece dados de campo magnético do meio interplanetário nos sistemas de coordenadas GSM e GSE. Os dados do MAG também estão disponíveis na página da missão ACE.

Através dos dados fornecidos pelo SWEPAM e pelo MAG é possível identificar e distinguir as diferentes estruturas interplanetárias, os dados são disponíveis em arquivos de texto dispostos em colunas como mostra a Figura 25.

Year	day	hr	min	sec	fp_year	Np	Tp	Vp	B_gsm_x	B_gsm_y	B_gsm_z	Bmag
2004	305	0	0	17.021	2004.83060163	6.626	1.6244e+05	449.64	-5.701	-4.068	3.581	8.015
2004	305	0	1	21.043	2004.83060366	6.822	1.4809e+05	447.46	-7.378	-2.982	0.287	8.352
2004	305	0	2	24.979	2004.83060568	7.245	1.5794e+05	438.56	-7.439	-2.900	1.038	8.225
2004	305	0	3	29.002	2004.83060770	7.392	1.5806e+05	445.45	-7.082	-3.174	2.223	8.180
2004	305	0	4	33.024	2004.83060973	6.601	1.7844e+05	446.64	-7.378	-3.087	0.206	8.058
2004	305	0	5	37.046	2004.83061175	6.862	1.6687e+05	438.85	-7.725	-2.224	0.740	8.103
2004	305	0	6	40.982	2004.83061377	7.001	1.7078e+05	442.36	-7.437	-3.020	0.928	8.090
2004	305	0	7	45.005	2004.83061580	6.785	1.8775e+05	441.54	-8.103	-2.587	0.202	8.529
2004	305	0	8	49.027	2004.83061782	6.646	2.1039e+05	444.75	-8.274	-1.817	0.179	8.540
2004	305	0	9	53.050	2004.83061985	6.523	1.8604e+05	440.03	-8.009	-2.439	1.116	8.470
2004	305	0	10	56.986	2004.83062187	6.888	1.7058e+05	436.83	-7.514	-3.361	0.294	8.259
2004	305	0	12	1.008	2004.83062389	6.747	1.4938e+05	439.21	-7.489	-3.524	0.764	8.316
2004	305	0	13	5.030	2004.83062592	6.560	1.7307e+05	443.93	-7.239	-3.774	1.080	8.249
2004	305	0	14	9.053	2004.83062794	6.528	1.5840e+05	445.21	-6.526	-3.929	1.959	7.872
2004	305	0	15	12.989	2004.83062996	6.295	1.8536e+05	448.08	-6.262	-3.868	2.092	7.664
2004	305	0	16	17.011	2004.83063199	6.249	1.6868e+05	444.22	-6.183	-3.702	2.123	7.524
2004	305	0	17	21.034	2004.83063401	6.197	1.7737e+05	445.24	-6.204	-3.390	2.342	7.465
2004	305	0	18	25.056	2004.83063604	6.320	1.8735e+05	443.45	-6.388	-3.194	2.095	7.463
2004	305	0	19	28.992	2004.83063806	6.111	1.8575e+05	448.40	-6.448	-3.025	1.700	7.378
2004	305	0	20	33.014	2004.83064008	6.305	1.9047e+05	440.38	-6.996	-2.379	0.619	7.434

**Figura 25:** Tabela de dados obtidos do Satélite ACE, dados baixados da internet pelo bolsista para confecção de gráficos.

Fonte: [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/mag\\_l2desc.html](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/mag_l2desc.html)

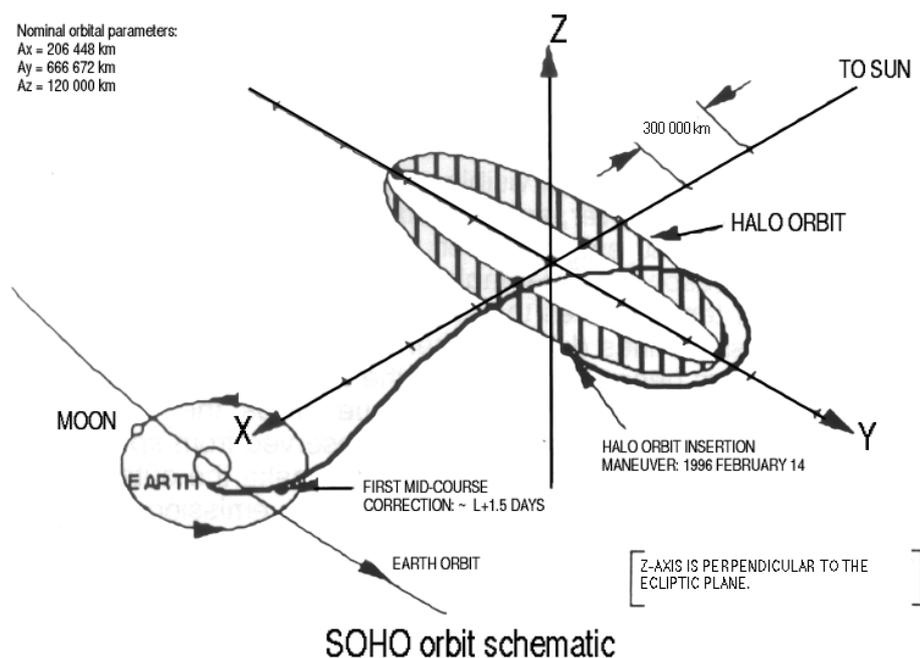
O quadro da Figura 25 contém colunas que indicam respectivamente o ano, dia, hora, minuto, segundo, ano fracionado, densidade, temperatura e velocidade dos prótons, os valores do módulo e das componentes nas direções x, y e z do campo magnético do vento solar. Estes dados são utilizados para a análise através da confecção de gráficos. Os gráficos são feitos através de rotinas no programa IDL (*Interactive Data Language*).

### 3.2 O SATÉLITE SOHO

A cooperação entre a *European Space Agency* (ESA) e a NASA propiciou a realização da construção do satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*). O SOHO foi lançado pela NASA em um foguete Atlas II-AS (AC-121) do *Canaveral Air Station* na Flórida, EUA, em 2 de dezembro de 1995.

O SOHO tem aproximadamente 4,3 metros de altura, 2,7 metros de largura e 3,7 metros de comprimento (9,5 m incluindo-se os painéis solares), massa de 1850 kg no momento do lançamento.

Estando em operação desde 1995, a mais de 10 anos o SOHO faz um excelente trabalho ininterrupto de monitoramento do Sol. SOHO assim como o satélite ACE está localizado no ponto Lagrangeano L1. A Figura 26 mostra um esquema da órbita do SOHO.



**Figura 26:** Esquema da órbita do Satélite SOHO.

Fonte: [http://sohowww.nascom.nasa.gov/about/images/halo\\_orbit.gif](http://sohowww.nascom.nasa.gov/about/images/halo_orbit.gif)

O SOHO desenvolvido para tentar responder as seguintes questões:

- Qual é a estrutura e dinâmica do interior solar?
- Por que a coroa existe e como ela é aquecida até a temperatura extremamente

elevada de cerca de 1000000 °C?

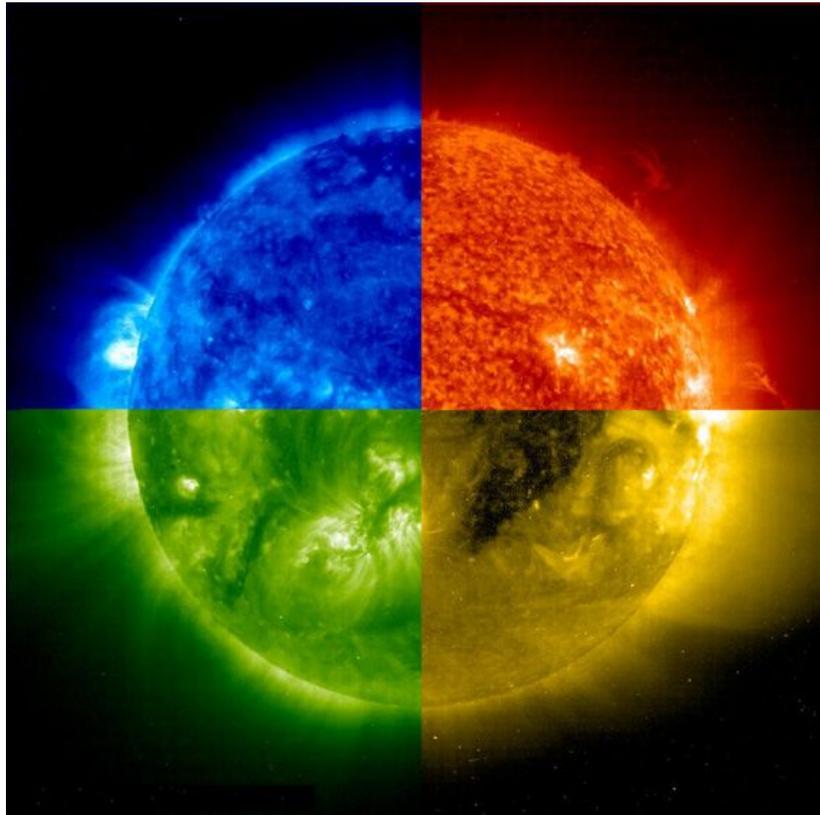
- Como o vento solar produzido é acelerado?

O SOHO tem a bordo 12 instrumentos complementares, projetados e desenvolvidos por 12 consórcios internacionais, envolvendo 29 instituições de 15 países. Nove consórcios são liderados por cientistas europeus, os três restantes por cientistas norte-americanos. Mais de 1500 cientistas de países em todo o mundo utilizam instrumentos SOHO ou que tenham dados SOHO em seus programas de investigação (Fonte: <http://sohowww.nascom.nasa.gov/home.html>).

- CDS (*Coronal Diagnostic Spectrometer*)
- CELIAS (*Charge, Element, and Isotope Analysis System*)
- COSTEP (*Comprehensive Suprathermal and Energetic Particle Analyzer*)
- EIT (*Extreme Ultraviolet Imaging Telescope*)
- ERNE (*Energetic and Relativistic Nuclei and Electron Experiment*)
- GOLF (*Global Oscillations at Low Frequencies*)
- LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph*)
- MDI (*Michelson Doppler Imager*)
- SUMER (*Solar Ultraviolet Measurements of Emitted Radiation*)
- SWAN (*Solar Wind Anisotropies*)
- UVCS (*Ultraviolet Coronagraph Spectrometer*)
- VIRGO (*Variability of Solar Irradiance and Gravity Oscillations*)

Dentre os instrumentos do SOHO serão utilizados no projeto dados do EIT e do LASCO.

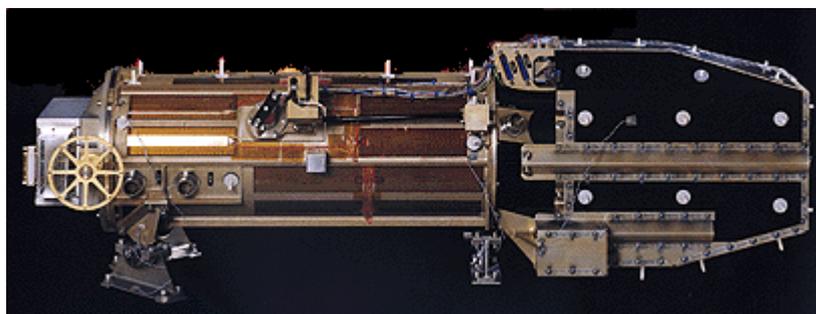
O EIT consiste de um telescópio de Ritchey–Chretien, diversos filtros em um detector CCD. O EIT é capaz de captar radiação eletromagnética em quatro comprimentos de onda distintos que são: 171 Å (Fe IX e Fe X); 195 Å (Fe XII); 284 Å (Fe XV); 304 Å (He II). A seguir na Figura 27 são exemplificados os quatro tipos de imagens obtidas pelo EIT.



**Figura 27:** O Sol dividido em quatro quadrantes, onde cada quadrante corresponde a um comprimento de onda distinto.

Fonte: <http://sohowww.nascom.nasa.gov>.

O principal objetivo científico do EIT é fornecer imagens para o estudo da dinâmica e evolução das estruturas da coroa solar. A Figura 28 mostra uma imagem do telescópio EIT.



**Figura 28:** Imagem do telescópio EIT.

Fonte: <http://umbra.nascom.nasa.gov/eit>

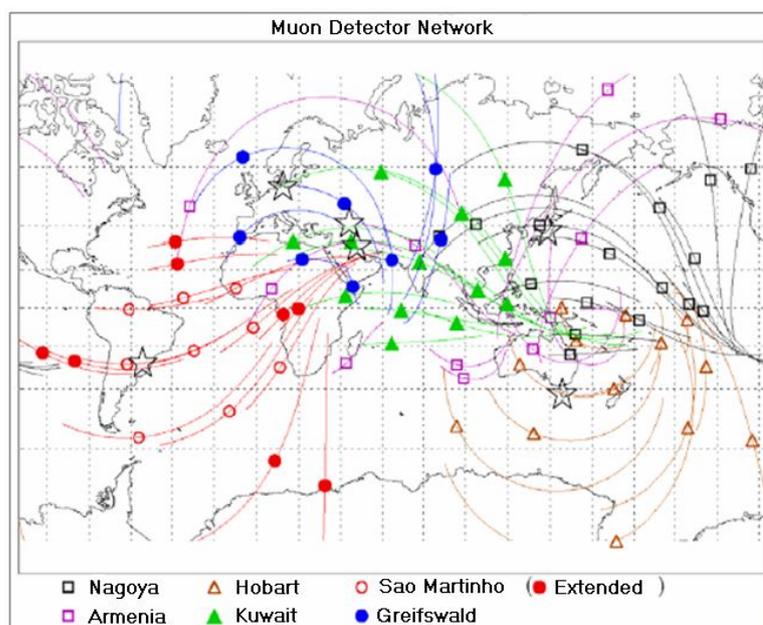
O LASCO consiste em um conjunto de três coronógrafos que fornecem imagens

da coroa solar de 1,1 a 32 raios solares. Os três coronógrafos que compõem o LASCO são: C1 com uma cobertura de 1.1 a 3 raios solares, o C2 que abrange uma cobertura que pega partes do C1 e C3 e se estende de 2 a 6 raios solares e o C3 que fornece imagens da coroa exterior, estendendo-se de 3.7 a 32 raios solares. A utilização do LASCO está na tarefa de descobrir o mecanismo de aquecimento da coroa solar, a origem e o mecanismo de aceleração do vento solar, estudar a causa das CME e o seu papel na evolução temporal do campo magnético em grande escala e na investigação do que é a distribuição e as propriedades da nuvem de poeira zodiacal.

### **3.3 DETECTOR MULTI-DIRECIONAL DE MUONS**

Um Detector Multi-Direcional de Muons (DMM), está em atividade no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS, Brasil (Latitude 29°, 26', 24''S, Longitude 53°, 48', 38''O, altitude 492m acima do nível do mar) no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria - LACESM/CT – UFSM, desde março de 2001.

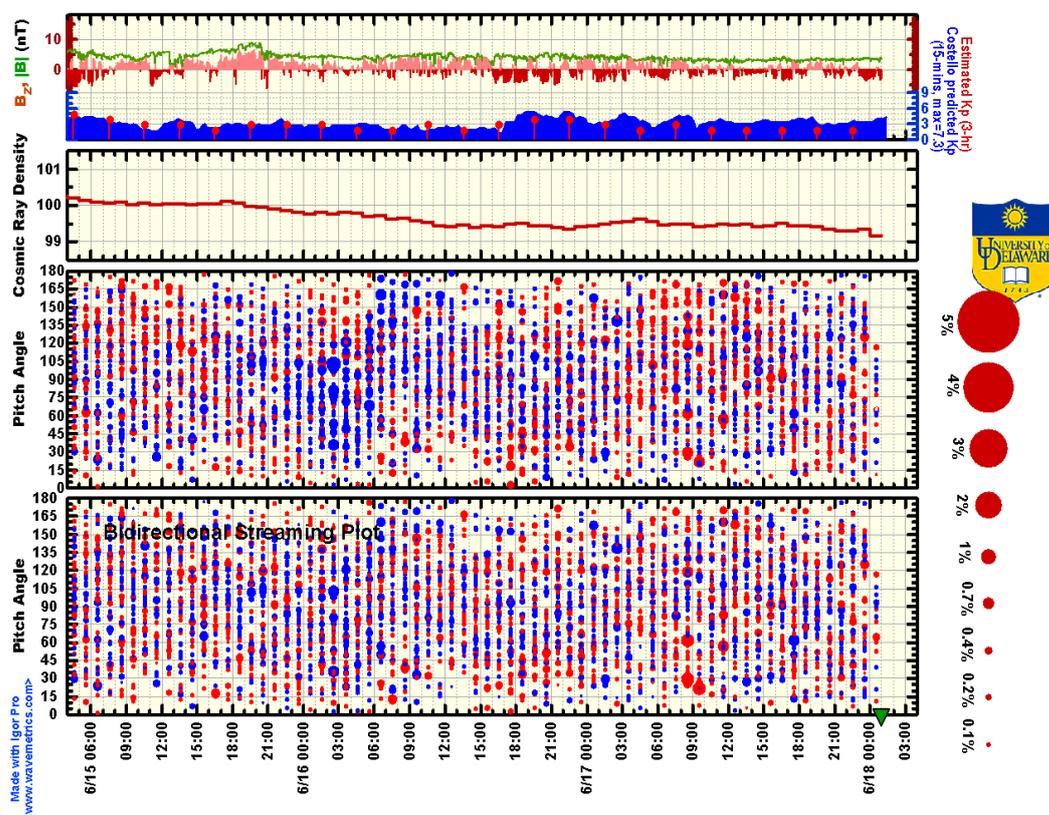
O DMM faz parte da rede internacional de detectores, ou Rede Global de DMMs, (*Global Muon Detector Network (GMDN)*), constituída por seis detectores, um em cada cidade: Nagoya (Japão), Hobart (Austrália), Kuwait (Kuwait), São Martinho da Serra (Brasil), Greifswald (Alemanha) e Yerevan (Armênia), a Figura 29 mostra a área de cobertura da rede, com as visões assintóticas de cada detector.



**Figura 29:** Diagrama mostrando a área de cobertura da rede dos DMMS, mostrando as visões assintóticas de cada detector.  
 Fonte: Munakata et al. (2004).

Os raios cósmicos de alta energia (muons) estão sujeitos a modulações conseqüentes de distúrbios interplanetários (Lockwood, 1971; Cane, 1993). Em adição a esta redução de intensidade, chamada decréscimo de *Forbush*, fenômenos precursores ao choque também foram relatados (Dorman, 1963; Dorman et al. 1967, 1972).

Decréscimos precursores devem resultar de um efeito “cone de perdas”, no qual o detector está observando partículas que passam na região de depleção de raios cósmicos atrás do choque. O efeito cone de perdas é geralmente restrito a partículas movendo-se de modo a afastar-se do choque e com ângulos de *pitch* pequenos. Através destas análises é possível obter informações para prever uma tempestade geomagnética, a Figura 30 mostra gráficos de dados do meio interplanetário e da intensidade de partículas com relação aos ângulos de *pitch*.



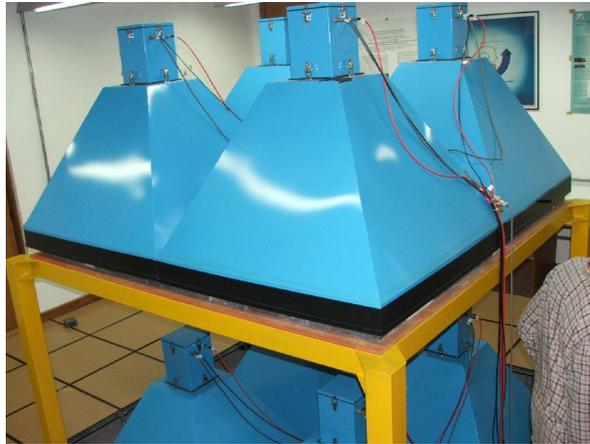
**Figura 30:** Gráficos contendo dados do meio interplanetário e dados da intensidade de muons em relação aos ângulos de pitch.

Fonte: [http://www.bartol.udel.edu/~takao/test\\_frac.html](http://www.bartol.udel.edu/~takao/test_frac.html)

O gráfico da Figura 30 mostra, de cima para baixo, gráficos de dados do meio interplanetário, densidade de raios cósmicos detectados pela Rede Internacional de DMMs e os dois últimos a intensidade de muons em relação aos ângulos de *pitch*. Um precursor é indicado no gráfico pelo círculo correspondente ao decréscimo de 2% ou maiores para valores de ângulo de *pitch* próximos de zero. Os gráficos das contagens dos muons juntamente com contagens de nêutrons podem ser encontrados na página da *University of Delaware* (<http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather>).

O DMM foi instalado através de uma colaboração internacional tri-lateral entre Brasil, Japão e Estados Unidos, e tem como Principal Investigador (PI) internacional o Professor Dr. Kazuoki Munakata do *Physics Department, Faculty of Science, Shinshu University* – Japão. Durante a primeira parte do projeto em março de 2001 foi instalado um protótipo do DMM no OES com duas camadas de 4 detectores em cada uma, 2x4x4, Figura 31 e em dezembro de 2005 o DMM foi ampliado para duas camadas, com 28

detectores em cada, 2x4x7, mostrado na Figura 32.



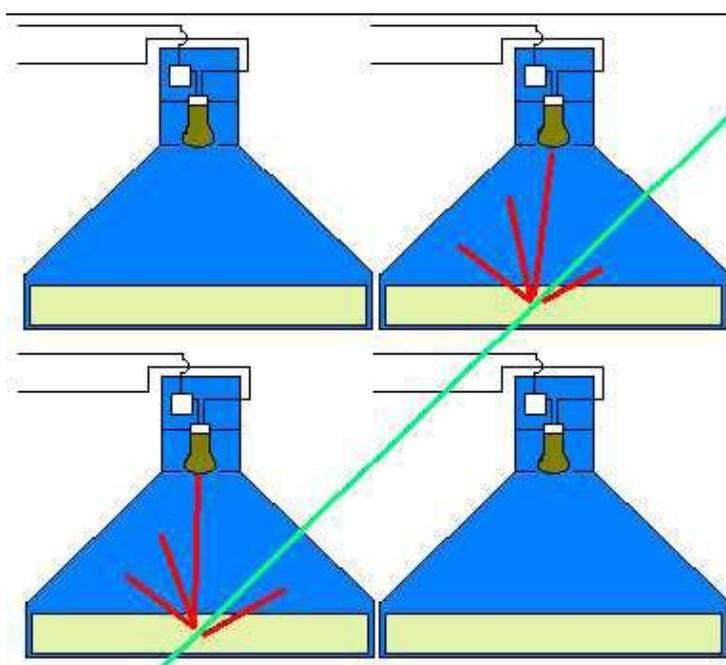
**Figura 31:** Foto do protótipo do DMM instalado no OES em 2001.



**Figura 32:** Foto do DMM instalado no OES em dezembro de 2005.

A detecção e contagem dos muons são realizadas pelo método de contagem por cintilação. Quando um muon atinge o plástico cintilante, localizado dentro de cada detector, alguns fótons são emitidos e detectados por uma fotomultiplicadora que está acoplada em cada detector e um muon é detectado através do registro de uma corrente elétrica. Quando é registrada a passagem de uma partícula em um detector na camada de cima e na de baixo ao mesmo tempo (tendo em vista que o muons se desloca com velocidades muito altas) o computador conta como um muons, a Figura 33 mostra um

esquema do DMM. Os muons que são detectados no DMM devem ter energia  $\geq 50\text{GeV}$ , para isso foi colocada uma camada de chumbo em baixo de cada camada do DMM para filtrar partículas com energia inferior.



**Figura 33:** Esquema do método de contagem do DMM.  
 Fonte: DA SILVA, 2005 pg. 68.

Os detectores são identificados por uma letra seguida de um número sendo U para a camada superior e L para a camada inferior. O DMM instalado no OES possui 13 direções de detecção que são dadas pela combinação dos detectores da camada superior e inferior, a Tabela 1 mostra as direções e o número de sub-detectores do DMM.

*Tabela 1: Informações do DMM.*

Detector Multi-Direcional	Número de sub-detectores	Contagem horária (fator $10^6$ )	Erro de Poisson (%)
Vertical (V)	28	2,56	0,06
30° Norte (N)	21	1,03	0,10
30° Sul (S)	21	1,06	0,10
30° Leste (EE)	24	1,19	0,10
30° Oeste (W)	24	1,20	0,10
39° Nordeste (NE)	18	0,51	0,14
39° Noroeste (NW)	18	0,53	0,14
39° Sudeste (SE)	18	0,53	0,14
39° Sudoeste (SW)	18	0,54	0,14
49° Norte (NN)	14	0,36	0,17
49° Sul (SS)	14	0,35	0,17
49° Leste (EE)	20	0,49	0,14
49° Oeste (WW)	20	0,48	0,14

Neste projeto foram usados dados do detector instalado no OES, apenas para o estudo da modulação dos muons por estruturas interplanetárias.

## 4 CAPÍTULO: Análise de dados e discussão dos resultados

No Capítulo são descritas as análises e os resultados obtidos pelo aluno para eventos interplanetários ocorridos. Foram realizadas dos dados do satélite ACE e do Detector Multi-Direcional de Muons – DMM.

Foram utilizados dados do satélite ACE de parâmetros de plasma, como temperatura, densidade e velocidade dos prótons, e parâmetros de campo magnético, como módulo, componentes x, y e z do campo magnético interplanetário, e as imagens obtidas pelo coronógrafo LASCO C2 e C3.

Os dados foram tratados em ambiente de programação IDL, e foram calculadas as pressões cinética e magnética e a relação entre elas, dada pelo parâmetro beta.

A pressão cinética ou pressão termal é definida por  $P_k = NkT$ , onde N é a densidade numérica de prótons no vento solar dada em  $\text{cm}^{-3}$ , k é a constante de Boltzmann  $k = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  e T é a temperatura dos prótons dada em K.

A pressão magnética é definida por  $P_b = \frac{B^2}{2\mu_0}$ , onde B é o módulo do campo magnético do vento solar e  $\mu_0$  é a constante de permeabilidade magnética no vácuo  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N A}^{-2}$ .

O parâmetro beta definido como a razão entre as pressões cinéticas e magnéticas, mostrando qual das pressões é predominante no vento solar. Para o vento solar normal o beta varia entre valores em torno de 1, pois ele não é emitido com um fluxo constante. Dentro de uma nuvem magnética, o beta fica com valor entre 0 e 0,1 mostrando que a pressão magnética dentro da nuvem é maior que a pressão cinética do plasma. Forma escolhidos eventos onde ocorreram tempestades geomagnéticas super intensas, ou seja, com o pico do índice Dst < - 200 nT (Dal Lago, 2004).

Após a análise dos dados do meio interplanetário foram analisadas as variações percentuais na contagem de muons em diversas direções, com os dados do DMM, que é realizada através da seguinte equação.

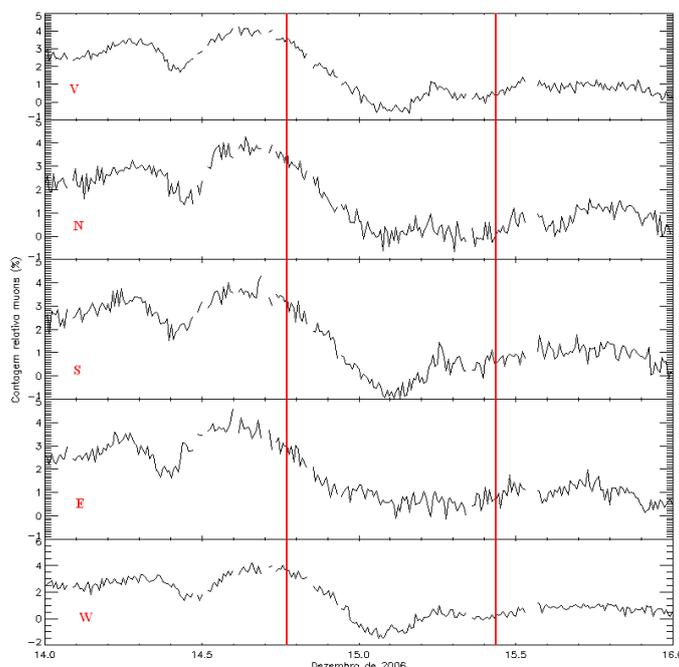
$$\Delta\% = \left[ \frac{\text{Contagem}(\text{Partic./h}) - \text{m\u00e9dia}}{\text{m\u00e9dia}} \right] \times 100$$

Onde a “contagem” significa a contagem de determinada amostra (em geral a contagem hor\u00e1ria de muons em determinada dire\u00e7\u00e3o) e “m\u00e9dia” significa a m\u00e9dia da contagem hor\u00e1ria. Para calcular-se a m\u00e9dia toma-se um per\u00edodo de tempo muito maior que o per\u00edodo de an\u00e1lise (geralmente o per\u00edodo de um m\u00eas ou um ano).

#### 4.1 VARIA\u00c7\u00c3O NA CONTAGEM DE MUONS EM DEZEMBRO DE 2006

No per\u00edodo de dezembro de 2006 ocorreu uma tempestade geomagn\u00e9tica cujo pico do \u00edndice DST foi de  $-146$  nT no dia 15 de dezembro. A poss\u00edvel causa da tempestade geomagn\u00e9tica foi a passagem de uma ICME, analisada anteriormente.

A Figura 34 mostra os gr\u00e1ficos feitos com as contagens relativas do DMM para o mesmo per\u00edodo, as linhas vermelhas indicam a passagem da estrutura pela Terra, que causou um decr\u00e9scimo na contagem dos muons nas dire\u00e7\u00f5es vertical (V), norte  $30^\circ$  (N), sul  $30^\circ$  (S), leste  $30^\circ$  (E) e oeste  $30^\circ$  (W). O decr\u00e9scimo ocorrido antes da passagem da ICME \u00e9 pode estar associado \u00e0 onda de choque que precedeu a estrutura.



**Figura 34:** Contagem relativa de muons nas dire\u00e7\u00f5es vertical (V), norte  $30^\circ$  (N), sul  $30^\circ$  (S), leste  $30^\circ$  (E) e oeste  $30^\circ$  (W), mostrando o decr\u00e9scimo de Fourbush relacionado a uma tempestade geomagn\u00e9tica.

## 4.2 ANÁLISE DE DADOS DO MEIO INTERPLANETÁRIO

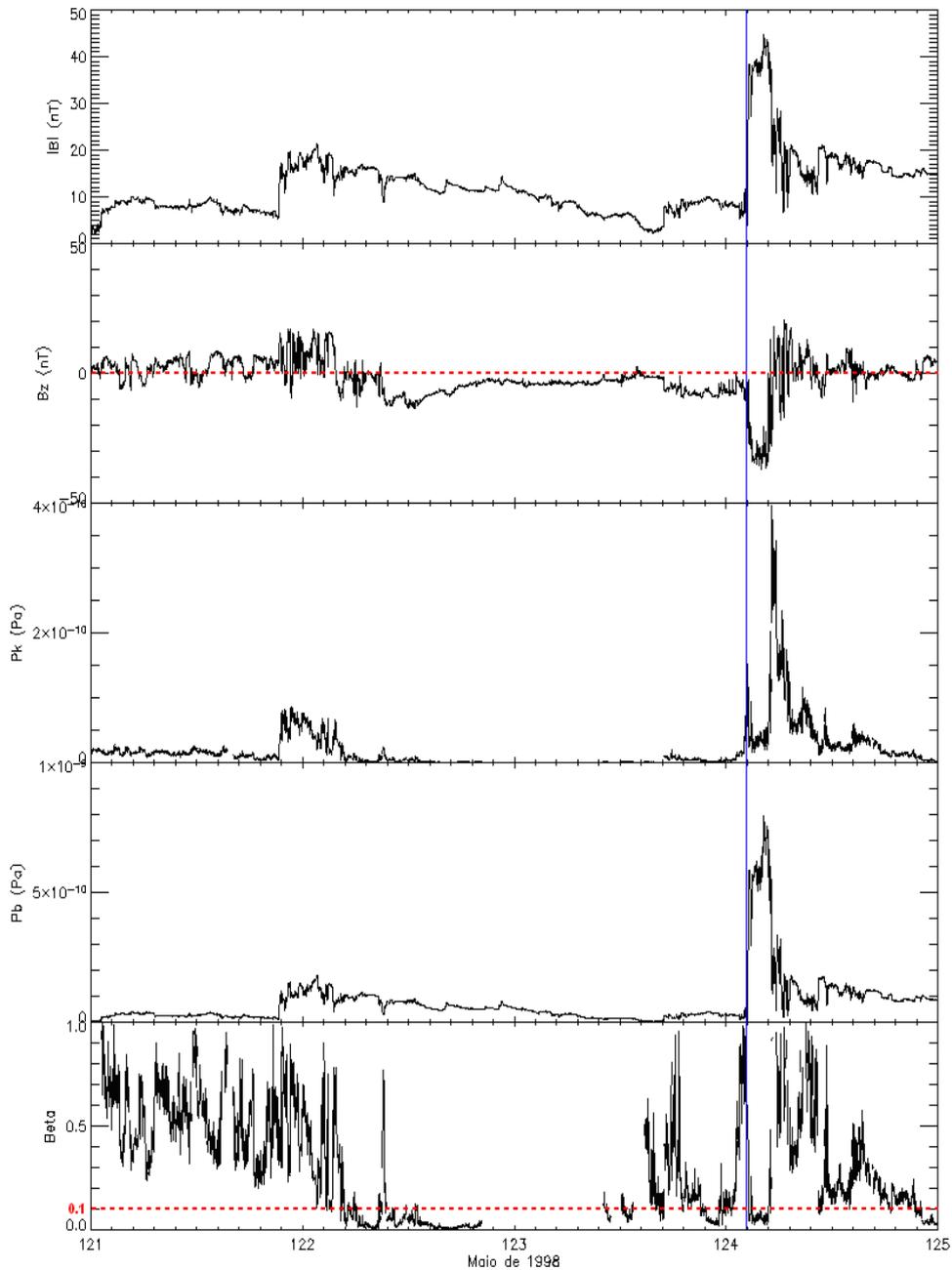
### 4.2.1 EVENTO DE MAIO DE 1998

No período entre os dias 121 e 125 de 1998 que corresponde respectivamente a 01 e 05 de maio houve a variação dos parâmetros interplanetários indicando a passagem de uma estrutura interplanetária pelo satélite ACE. Na Figura 35 são mostrados gráficos de dados interplanetários, de cima para baixo na Figura se tem o módulo ( $|B|$ ) e a coordenada Z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética ( $P_k$ ), pressão magnética ( $P_b$ ) e o parâmetro beta do vento solar.

Os valores de  $|B|$  tem um súbito aumento de  $\sim 10$  nT para valores entre 40 e 50 nT por um curto período de tempo (5 a 6h), indicado pela linha azul, e  $B_z$  está direcionada para valores negativos, ou seja, sentido norte-sul.

A pressão cinética tem um súbito aumento devido ao aumento da temperatura e da densidade de prótons, caracterizando a estrutura com um choque e como nenhuma CME foi observada após a passagem do choque, acredita-se que ele foi o responsável pela tempestade geomagnética ocorrida no dia 04 de maio com pico do Dst = -205 nT (Fonte: [http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/f/dstfinal199805.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal199805.html)).

A pressão magnética também teve um aumento durante a passagem do choque, pois houve um aumento da intensidade do campo magnético. O aumento da pressão magnética ocorreu pouco antes do aumento da pressão cinética e com isso o beta durante o choque teve valores próximos de 1, depois valores próximos de 0,1 indicando que  $P_b$  é maior e por fim assumindo valores próximos de 1 novamente.

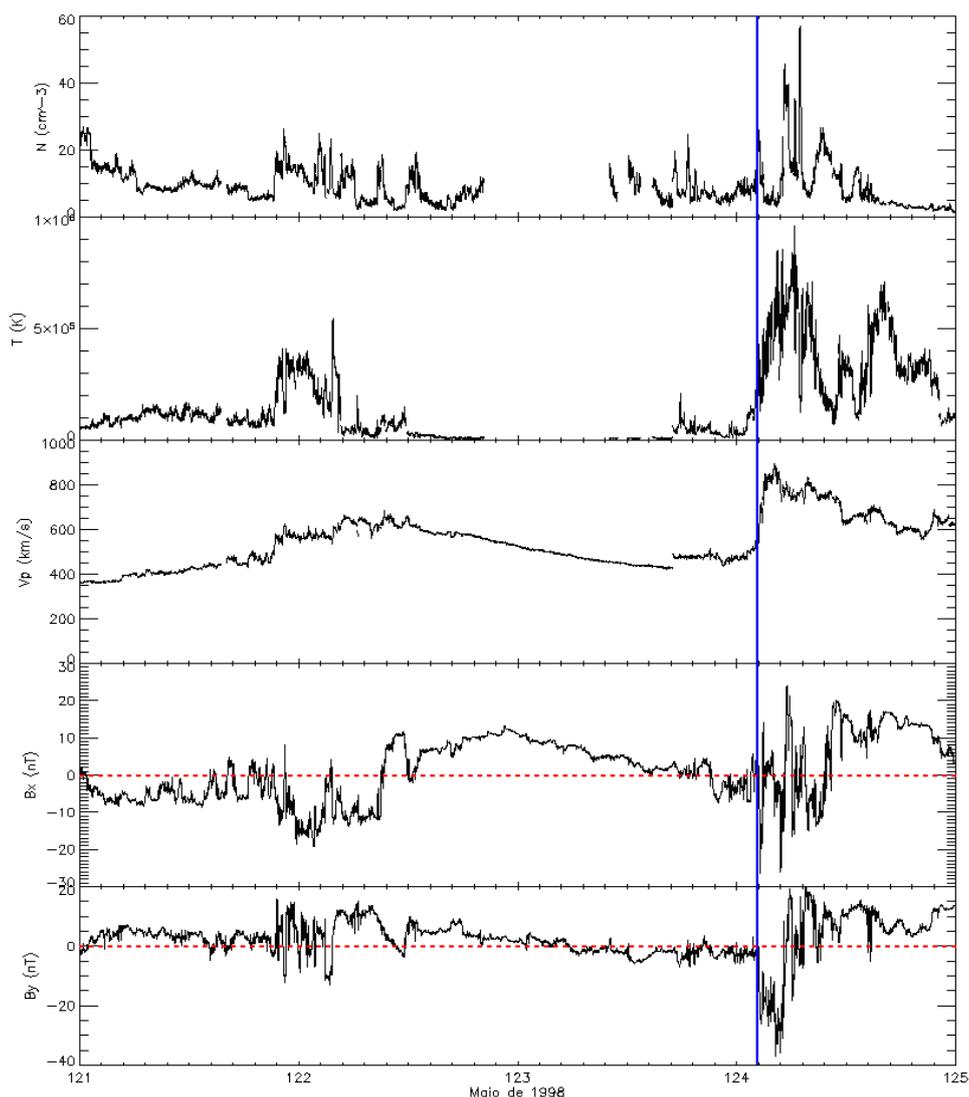


**Figura 35:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de maio de 1998. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada  $z$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE.

Na Figura 36 são mostrados outros parâmetros do vento solar, de cima para baixo se tem a densidade ( $N$ ), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar ( $T$ ) e as

componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM.

A velocidade do vento solar passou de valores entre 400 e 500 km/s para valores próximos de 800 km/s no momento do choque. Os valores de  $B_x$  oscilaram entre 20 nT e -20 nT e  $B_y$  passou de -30 nT para 20 nT, indicando uma rotação do campo nessa direção.



**Figura 36:** Densidade (N), velocidade (Vp) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. A linha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE.

Os fatos de a componente Bz estar direcionada para sul, ou no sentido contrário

do campo geomagnético e ser bastante intenso combinada com a velocidade do choque ter um módulo também com altos valores, quase o dobro do vento solar antes do choque são as possíveis causas da formação de uma tempestade geomagnética super intensa. A Terra nem o satélite ACE estavam no caminho da ejeção que possivelmente provocou a onda de choque, pois nenhum indício detectado.

No final do dia 121 (02/05) início do dia 122 (03/05), 2 dias antes da detecção do choque, houve uma variação dos parâmetros interplanetários principalmente no aumento do módulo do campo magnético e aumento do módulo da velocidade do vento solar, o índice Dst registrou o valor de  $-85$  nT.

#### 4.2.2 EVENTO DE SETEMBRO DE 1998

No período entre os dias 267 e 271 de 1998 que corresponde respectivamente a 24 e 27 de setembro houve a variação dos parâmetros interplanetários indicando a passagem de uma estrutura interplanetária pelo satélite ACE. Na Figura 37 são mostrados gráficos de dados interplanetários, de cima para baixo na Figura se tem o módulo ( $|B|$ ) e a coordenada  $z$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética ( $P_k$ ), pressão magnética ( $P_b$ ) e o parâmetro beta do vento solar.

O salto abrupto de todos os parâmetros interplanetário indica a passagem da onda de choque formada pela ejeção que a precede. Durante a fase do choque  $|B|$  tem um súbito aumento de valores de  $\sim 10$  nT para  $\sim 40$  nT e depois decai para 20 nT dentro da nuvem magnética permanecendo entre 10 e 20 nT.

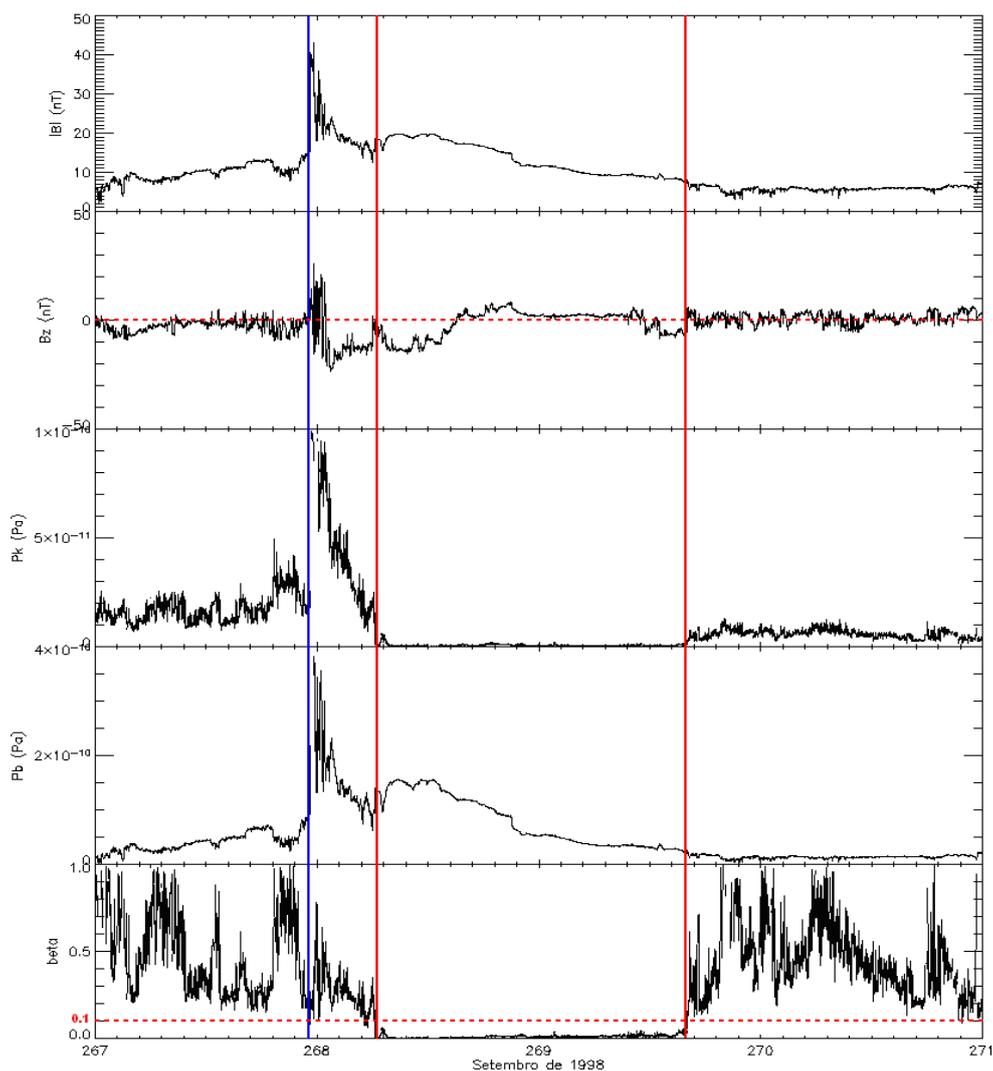
A componente  $B_z$  durante a passagem do choque tem sentido contrário ao do campo geomagnético e durante a passagem da ejeção adquire uma rotação de valores negativos para valores positivos.

A pressão cinética tem um súbito aumento devido ao aumento da temperatura e da densidade de prótons durante o choque caracterizando compressão do plasma, e dentro da estrutura a pressão assume valores baixos devida principalmente à baixa temperatura dentro da estrutura.

A pressão magnética também teve um aumento durante a passagem do choque, pois houve um aumento da intensidade do campo magnético. E dentro como dentro da

nuvem magnética a intensidade campo magnético permaneceu com valores altos, quando comparado com valores do meio interplanetário.

Com isso, o beta durante o choque oscila com valores perto de 0,5, dentro da estrutura os valores são sempre menores que 0,1 indicando que  $P_B$  é dominante em relação à  $P_k$ . Com a análise do beta e dos demais parâmetros pode se caracterizar a estrutura como sendo uma nuvem magnética.

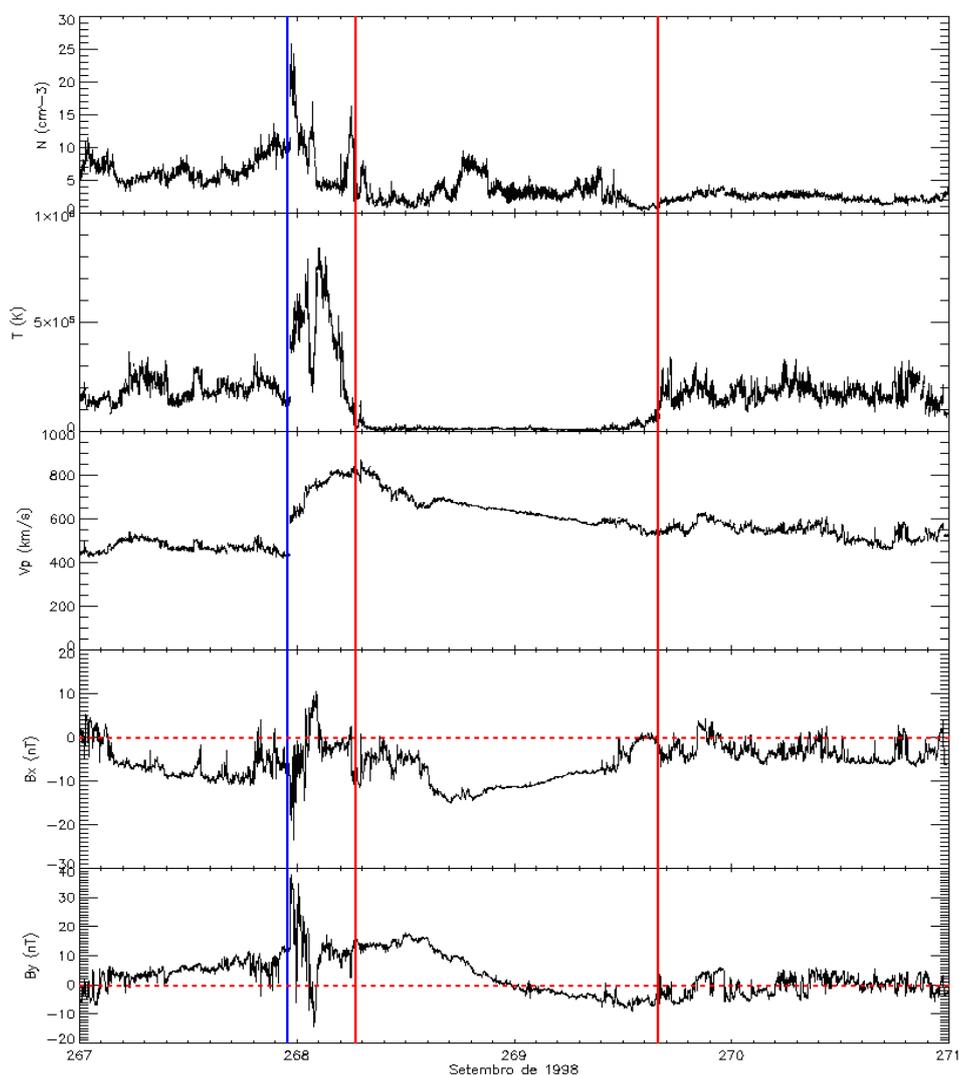


**Figura 37:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de setembro de 1998. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

Na Figura 38 são mostrados outros parâmetros do vento solar, de cima para

baixo se tem a densidade ( $N$ ), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar ( $T$ ) e as componentes  $x$  e  $y$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM. A velocidade do vento solar passou de valores entre 400 e 500 km/s para valores próximos de 800 km/s durante a passagem da onda de choque e foi diminuindo gradualmente com a passagem da nuvem magnética.

As componentes  $B_x$  e  $B_y$  passam por uma grande variação durante a passagem da onda de choque e apresentam um “bom comportamento” dentro da nuvem.



**Figura 38:** Densidade ( $N$ ), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar ( $T$ ) e as componentes  $x$  e  $y$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

O fato de  $B_z$  durante a passagem da onda de choque e no início da nuvem

magnética ter sentido norte-sul são os possíveis responsáveis pela tempestade geomagnética, classificada como tempestade super intensa, pois foi registrado  $Dst = -207$  nT (Fonte: [http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/f/dstfinal199809.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal199809.html)).

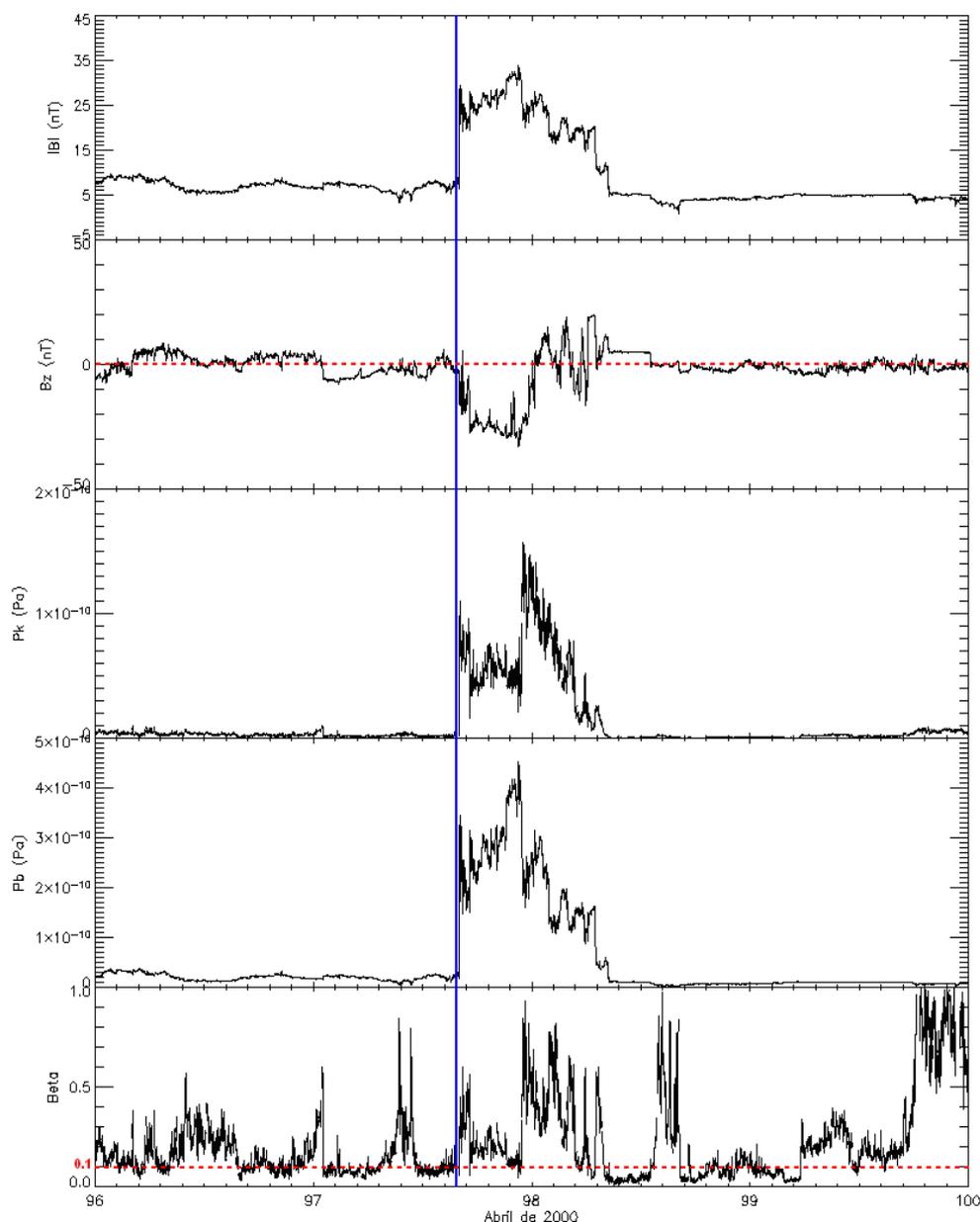
#### 4.2.3 EVENTO DE ABRIL DE 2000

No período entre os dias 96 e 100 de 2000 que corresponde respectivamente a 05 e 09 de abril houve a variação dos parâmetros interplanetários indicando a passagem de uma estrutura interplanetária pelo satélite ACE. Na Figura 39 são mostrados gráficos de dados interplanetários, de cima para baixo na Figura se tem o módulo ( $|B|$ ) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética ( $P_k$ ), pressão magnética ( $P_b$ ) e o parâmetro beta do vento solar.

O salto abrupto de todos os parâmetros interplanetário indica a passagem da onda de choque, porém a estrutura que a ocasionou não foi observada.

Durante a fase do choque  $|B|$  teve um súbito aumento de valores de  $\sim 10$  nT para  $\sim 35$  nT.  $B_z$  durante a passagem do choque tem sentido contrário ao do campo geomagnético na região após a onda de choque, no final desta região  $B_z$  oscilou entre valores positivos e negativos.

A pressão cinética tem um súbito aumento devido ao aumento da temperatura e da densidade de prótons durante o choque caracterizando a compressão do plasma. A pressão magnética também teve um aumento durante a passagem do choque, pois houve um aumento da intensidade do campo magnético.

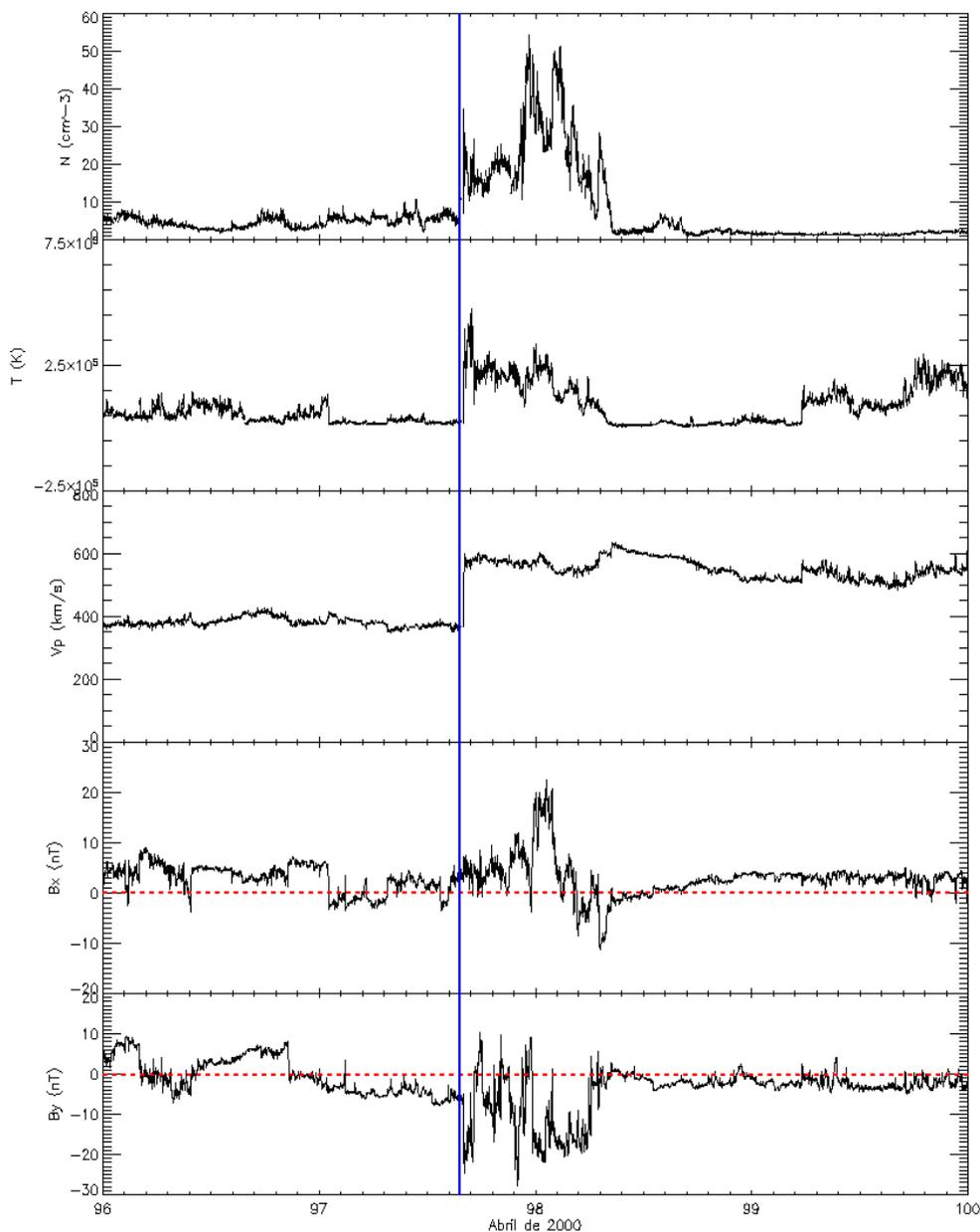


**Figura 39:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de abril de 2000. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada  $z$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite.

Na Figura 40 são mostrados outros parâmetros do vento solar, de cima para baixo se tem a densidade ( $N$ ), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar ( $T$ ) e as componentes  $x$  e  $y$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM.

A velocidade do vento solar passou de  $\sim 400$  km/s para valores próximos de 600 km/s durante a passagem da onda de choque, permanecendo assim depois da passagem

da estrutura. As coordenadas Bx e By passam por uma grande variação durante a passagem da onda de choque.



**Figura 40:** Densidade (N), velocidade (Vp) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE.

O fato de o campo geomagnético ter sido intensificado com o a passagem da onda de choque e Bz durante ter sentido contrário a passagem da onda de choque são os possíveis responsáveis pela tempestade geomagnética, classificada como tempestade

super intensa, com pico do Dst = -288 nT (Fonte: [http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/f/dstfinal200004.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200004.html)).

#### 4.2.4 EVENTO DE JULHO DE 2000

No período entre os dias 197 e 200 de 2000 que corresponde respectivamente a 15 e 08 de abril um salto abrupto de todos os parâmetros interplanetário indica a passagem da onda de choque e a estrutura que possivelmente a origina é classificada como nuvem magnética. Na Figura 41 são mostrados gráficos de dados interplanetários, de cima para baixo na Figura se tem o módulo ( $|B|$ ) e a coordenada  $z$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética ( $P_k$ ), pressão magnética ( $P_b$ ) e o parâmetro beta do vento solar.

Durante a fase do choque o módulo do campo magnético interplanetário teve um súbito aumento de valores de  $\sim 10$  nT para valores maiores que 40 nT e no início da nuvem magnética  $|B|$  chegou aproximadamente 60 nT.

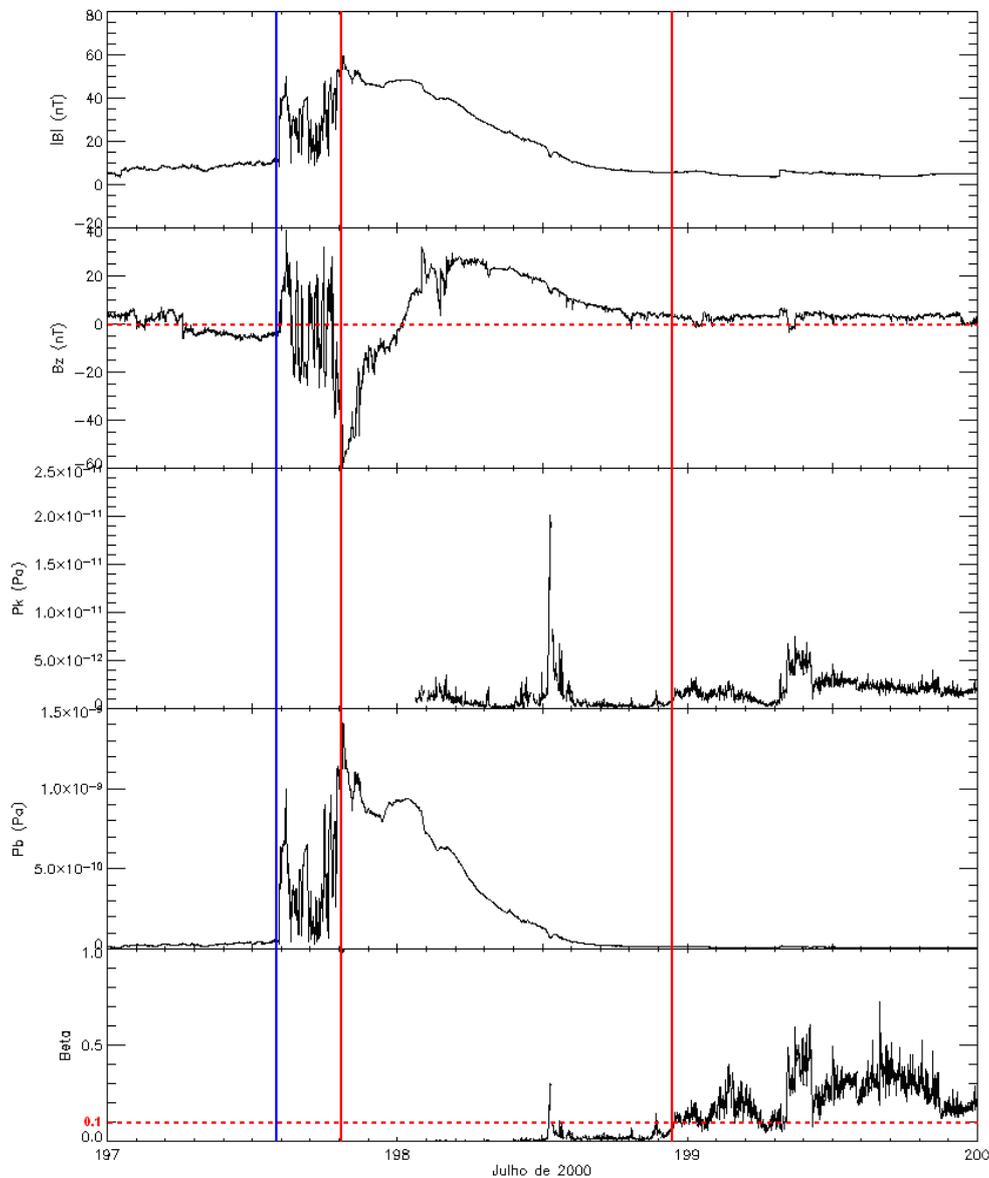
No momento da passagem da onda de choque  $B_z$  tem o mesmo sentido do campo geomagnético, sendo assim na região após a onda de choque (região da bainha). A nuvem magnética tem  $B_z$  no sentido contrário ao do campo geomagnético com valores de  $\sim -50$  nT, e passa a ter uma rotação suave que dura aproximadamente 14 horas.

Não há dados de densidade e temperatura para o momento do choque, logo não foi possível realizar o cálculo da pressão cinética, durante a passagem da nuvem magnética a pressão cinética manteve valores baixos devido à baixa temperatura em quase todo o interior da estrutura.

A pressão magnética teve um aumento durante a passagem do choque, pois houve um aumento da intensidade do campo magnético permanecendo assim durante a passagem da nuvem pelo telescópio observador.

Pelo fato de não se obter a pressão cinética no momento da passagem da onda de choque não é possível calcular o parâmetro beta para esse mesmo período, lembrando que  $\beta = P_k/P_b$ , na parte final da nuvem magnética os valores do beta são menores que 0,1 indicando que a pressão magnética domina o meio, o que é uma característica das

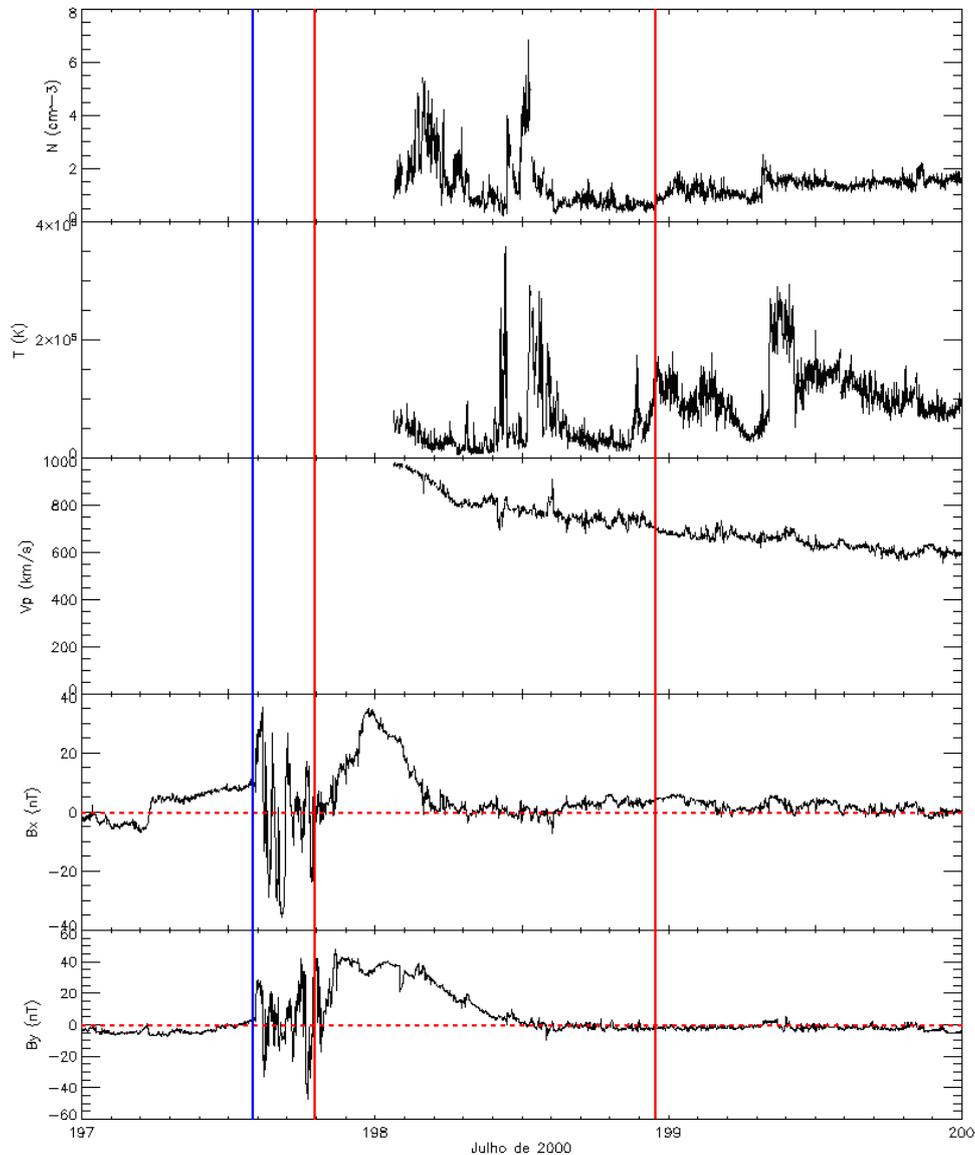
nuvens magnéticas.



**Figura 41:** Paineil mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de julho de 2000. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

No momento da passagem da onda de choque não houve dados do módulo da velocidade do vento solar, o gráfico indica que o módulo da velocidade era tão grande que ultrapassou a escala do instrumento de medida, para a nuvem magnética os valores de  $V_p$  chegam a 900 km/s (ver Figura 42).

As componentes Bx e By passam por uma grande variação durante a passagem da onda de choque e um aumento durante a passagem da nuvem magnética.



**Figura 42:** Densidade ( $N$ ), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar ( $T$ ) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

A nuvem magnética provavelmente é a responsável pela tempestade geomagnética por ter a coordenada z do campo magnético é direcionada para o sul magnético. A onda de choque não contribuiu para a formação da tempestade, pois teve a

coordenada  $z$  direcionada para o norte. A tempestade ocorrida é classificada como tempestade super intensa, pois atingiu  $Dst = -301$  nT ([http://swdewww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/f/dstfinal200007.html](http://swdewww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200007.html)).

#### 4.2.5 EVENTO DE AGOSTO DE 2000

No período entre os dias 224 e 229 de 2000 que corresponde respectivamente a 11 e 15 de agosto houve salto abrupto de todos os parâmetros interplanetário indicando a passagem da onda de choque e a estrutura que possivelmente a origina pode ser classificada como nuvem magnética. Na Figura 43 são mostrados gráficos de dados interplanetários, de cima para baixo na Figura se tem o módulo ( $|B|$ ) e a coordenada  $z$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética ( $P_k$ ), pressão magnética ( $P_b$ ) e o parâmetro beta do vento solar.

Durante a fase do choque o módulo campo magnético interplanetário  $|B|$  teve um súbito aumento de valores de  $\sim 10$  nT para valores próximos de 25 nT e no início da nuvem magnética  $B$  chegou aproximadamente 35 nT.

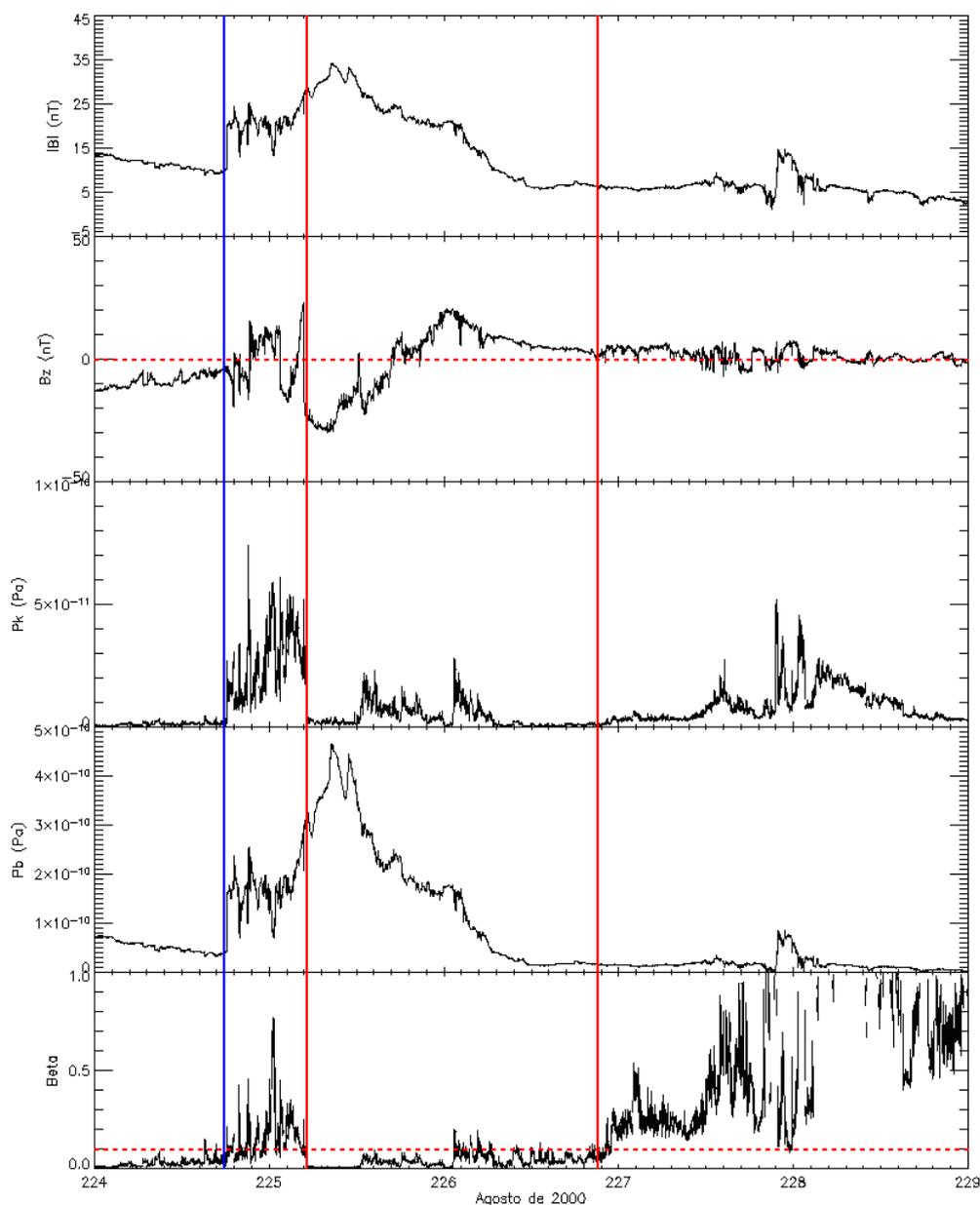
No momento da passagem da onda de choque  $B_z$  tem o mesmo sentido do campo geomagnético (sentido norte) e no final da região que segue o choque (sheath)  $B_z$  está voltada para sul. A nuvem magnética tem  $B_z$  no sentido contrário ao do campo geomagnético com valores de  $\sim -30$  nT, e passa a ter uma rotação suave de sul para norte que dura mais de 20 horas.

No momento da passagem da onda de choque, a pressão cinética tem um aumento abrupto devido ao aumento da temperatura e da densidade de partículas, causados pela compressão do plasma, caracterizando a onda de choque. Dentro da nuvem a pressão cinética diminui, devido à diminuição da temperatura, embora a densidade de partículas ainda apresente valores elevados.

A pressão magnética teve um aumento durante a passagem do choque, pois houve um aumento da intensidade do campo magnético permanecendo assim durante a passagem da nuvem pelo telescópio observador.

O parâmetro beta obtido no interior da estrutura possui valores abaixo de 0,1 mostrando que a pressão magnética é no mínimo 10 vezes maior que a pressão cinética,

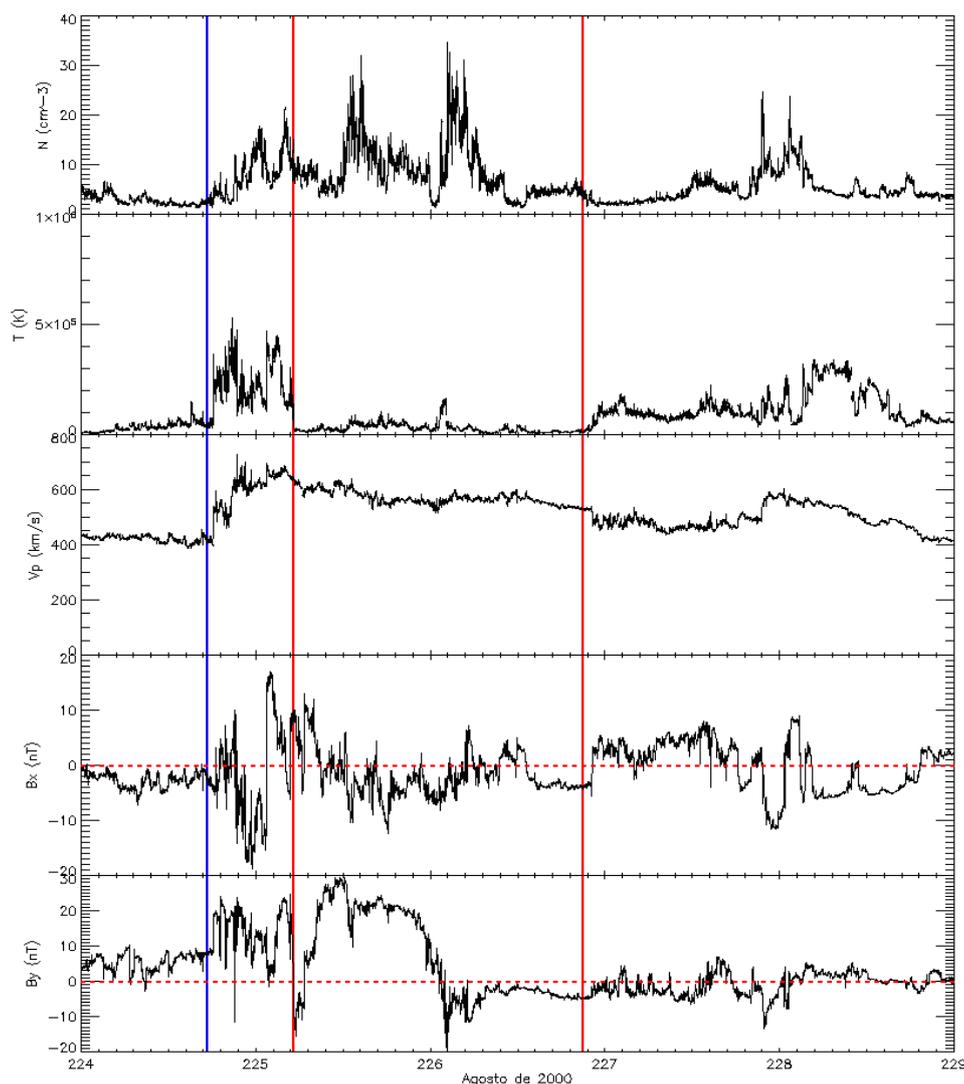
sendo assim as propriedades magnéticas são dominantes nesta região. Na região que precede a nuvem magnética os valores de beta são maiores, devido à elevação da pressão cinética. O valor de beta sempre abaixo de 0,1 no interior da estrutura indica que ela pode ser classificada como uma possível nuvem magnética.



**Figura 43:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de agosto de 2000. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a coordenada  $z$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

Na Figura 44 são mostrados outros O valor do módulo da velocidade do vento solar teve um salto no momento da passagem da onda de choque de ~ 450 km/s para 500 km/s e depois passou para valores acima de 600 km/s.

As componentes Bx e By passam por uma grande variação durante a passagem da onda de choque e um aumento durante a passagem da nuvem magnética.



**Figura 44:** Densidade (N), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

A nuvem magnética provavelmente é a responsável pela tempestade geomagnética por ter a coordenada  $z$  do campo magnético é direcionada para o sul. A onda de choque teve uma pequena contribuição para a formação da tempestade, pois teve a coordenada  $z$  direcionada para o sul apenas no final da bainha. A tempestade ocorrida é classificada como super tempestade, pois atingiu  $Dst = - 225$  nT (Fonte: [http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/f/dstfinal200008.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200008.html)).

#### 4.2.6 EVENTO DE SETEMBRO DE 2000

No período entre os dias 260 e 264 de 2000 que corresponde respectivamente a 16 e 21 de setembro houve uma variação abrupta dos parâmetros interplanetário indicando a passagem de uma onda de choque e a estrutura que possivelmente a origina, que pode ser classificada como nuvem magnética. Na Figura 45 são mostrados gráficos de dados interplanetários, de cima para baixo na Figura se tem o módulo ( $|B|$ ) e a coordenada  $z$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética ( $P_k$ ), pressão magnética ( $P_b$ ) e o parâmetro beta do vento solar.

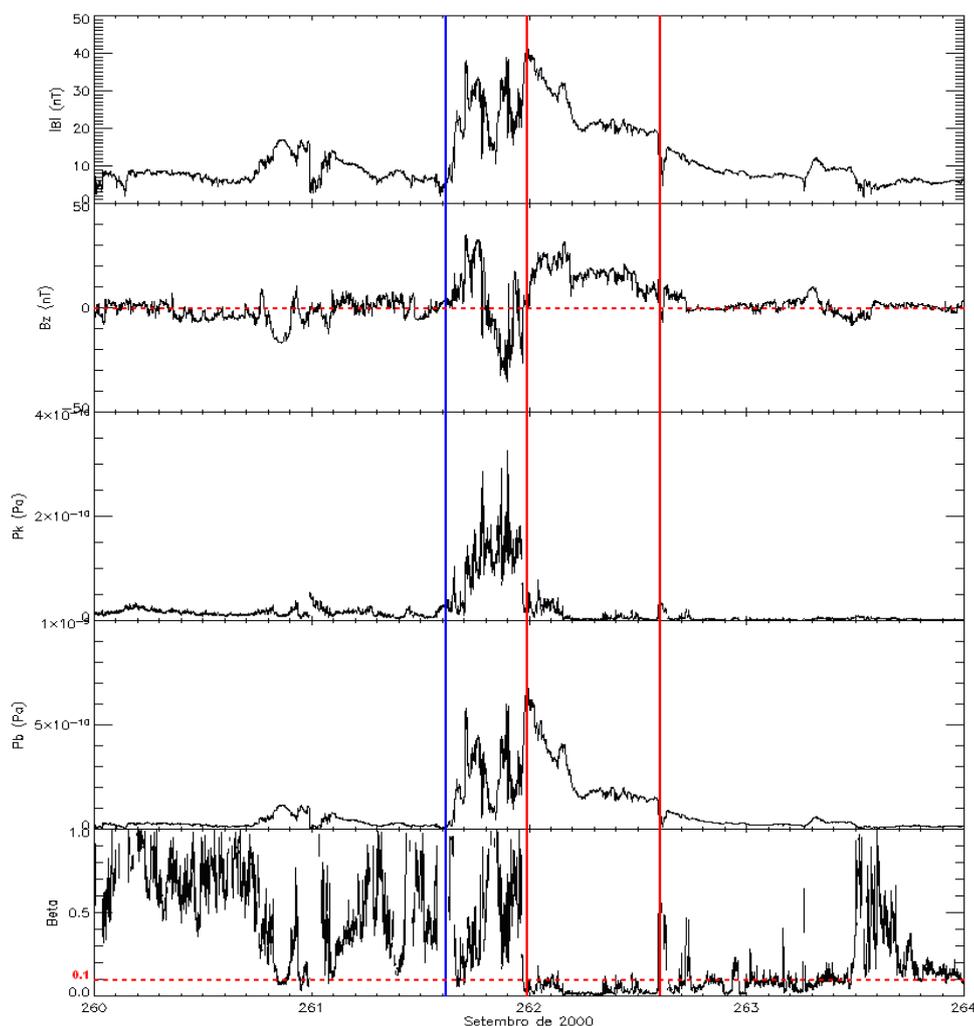
Durante a passagem da onda de choque  $B$  teve um súbito aumento de valores de  $\sim 10$  nT para valores próximos de 40 nT, na região da bainha o módulo do campo magnético obteve variações bruscas e no início da nuvem magnética os valores de  $|B|$  novamente se aproximaram de 40 nT.

No momento da passagem da onda de choque  $B_z$  está no mesmo sentido do campo geomagnético e na região após a onda da bainha tem rotação de norte para sul retornado para norte na parte final dessa região. A nuvem magnética tem  $B_z$  sempre sentido do campo geomagnético com valores de  $\sim 30$  nT, e não apresenta rotação.

A pressão cinética teve um aumento durante a passagem do choque devido à compressão do plasma (que aumenta a temperatura e a densidade numérica do vento solar), no interior da estrutura a pressão cinética diminui com a diminuição da temperatura.

A pressão magnética teve um aumento durante a passagem do choque, pois houve um aumento da intensidade do campo magnético permanecendo assim durante a passagem da nuvem pelo telescópio observador. O parâmetro beta dentro da estrutura

permanece quase o tempo todo com valores abaixo de 0,1 e nas regiões que a precedem assume valores maiores.



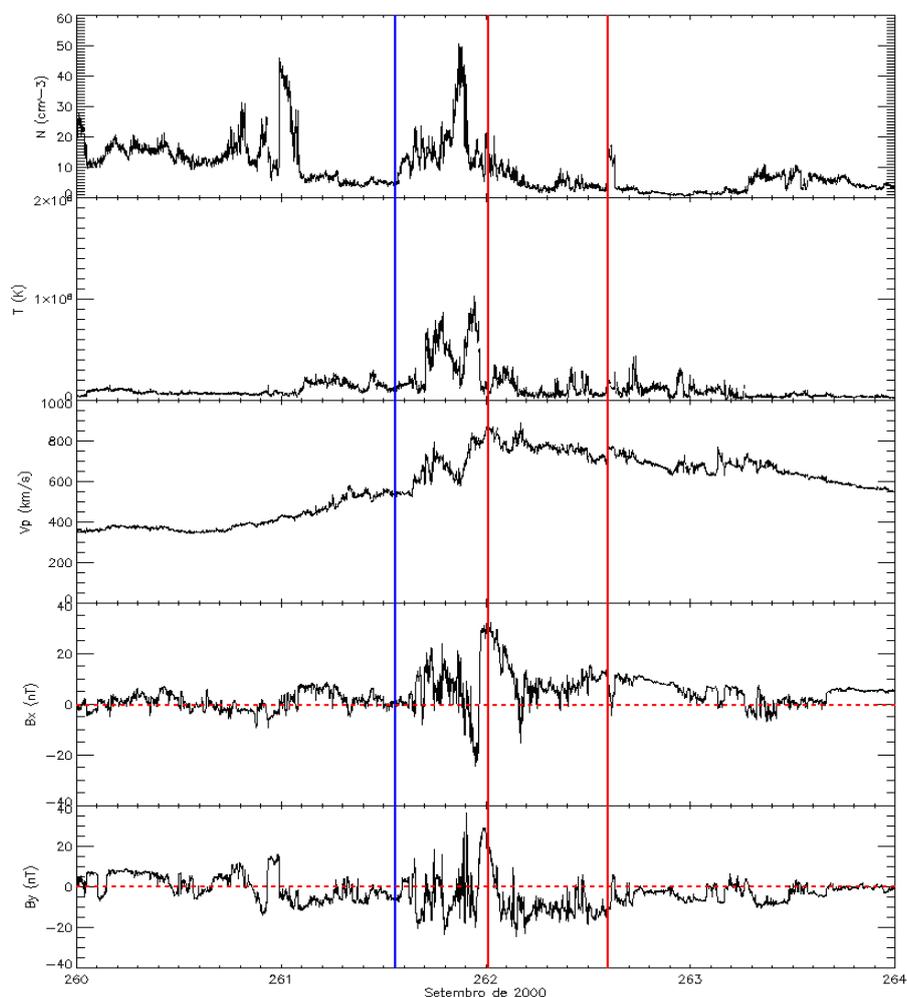
**Figura 45:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de setembro de 2000. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a componente z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

Na Figura 46 são mostrados outros parâmetros do vento solar, de cima para baixo se tem a densidade ( $N$ ), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar ( $T$ ) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM.

O módulo da velocidade do vento solar teve um aumento suave até o momento da passagem da onda de choque, quando tem um aumento abrupto e atinge o valor

máximo de 800 km/s no interior da nuvem.

As componentes Bx e By passam por uma grande variação durante a passagem da onda de choque e um aumento durante a passagem da nuvem magnética.



**Figura 46:** Densidade (N), velocidade (Vp) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

O campo magnético da bainha é provavelmente o responsável pela tempestade geomagnética por apresentar Bz voltada para o sul em um determinado instante. Não há indícios que a nuvem magnética tenha contribuído para a formação da tempestade, pois Bz no seu interior esteve sempre voltada para norte, ou seja, no mesmo sentido do campo geomagnético.

A tempestade foi classificada como super intensa e teve o pico do Dst = - 201 nT (Fonte: [http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/f/dstfinal200009.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200009.html)).

#### 4.2.7 EVENTO DE MARÇO/ABRIL DE 2001

No período entre os dias 89 e 92 de 2001 que corresponde respectivamente a 29 de março e 02 de abril houve um salto abrupto de todos os parâmetros interplanetário indica a passagem da onda de choque e a estrutura que possivelmente a origina é classificada como uma ejeção coronal de massa. Na Figura 47 são mostrados gráficos de dados interplanetários, de cima para baixo na Figura se tem o módulo ( $|B|$ ) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética ( $P_k$ ), pressão magnética ( $P_b$ ) e o parâmetro beta do vento solar.

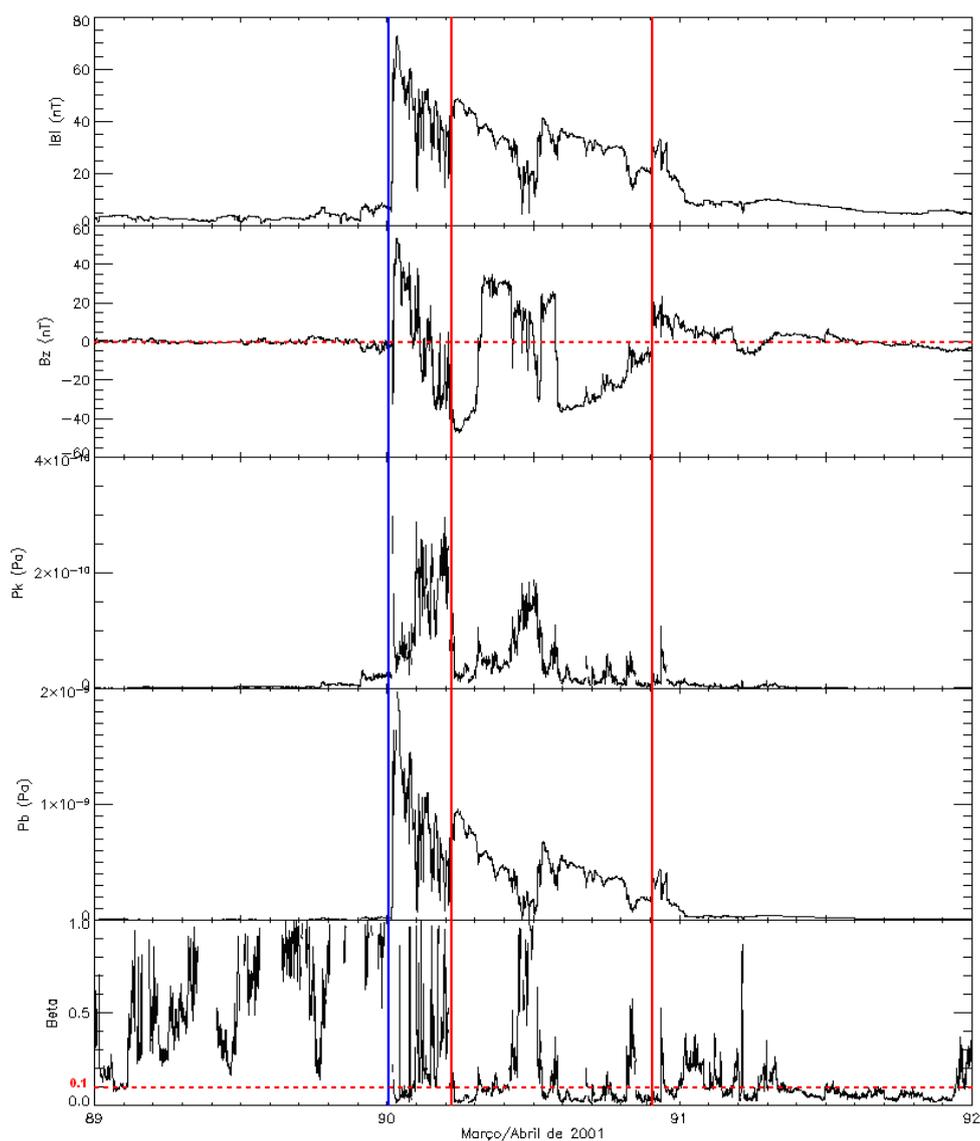
Durante a passagem da onda de choque o módulo do campo magnético interplanetário teve um súbito aumento de valores de ~ 5 nT para valores próximos de 70 nT, a região da bainha  $|B|$  obteve variações bruscas e no início da ICME os valores de B se aproximaram de 40 nT.

No momento da passagem da onda de choque a coordenada  $B_z$  está no mesmo sentido do campo geomagnético e na região da bainha tem rotação de norte para sul. Na estrutura  $B_z$  tem um comportamento com várias flutuações.

A pressão cinética teve um aumento durante a passagem da onda de choque devido à compressão do plasma, no interior da estrutura a pressão cinética oscila com valores altos quando comparado com a pressão no vento solar.

A pressão magnética teve um grande aumento na passagem do choque, dentro da estrutura a pressão teve uma diminuição, porém os valores são elevados quando comparados com a pressão magnética no vento solar normal.

O parâmetro beta obteve grandes oscilações, tanto na passagem do choque quanto dentro da estrutura.



**Figura 47:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de março/abril de 2001. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a componente z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da ICME.

Na Figura 48 são mostrados outros parâmetros do vento solar, de cima para baixo se tem a densidade ( $N$ ), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar ( $T$ ) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM.

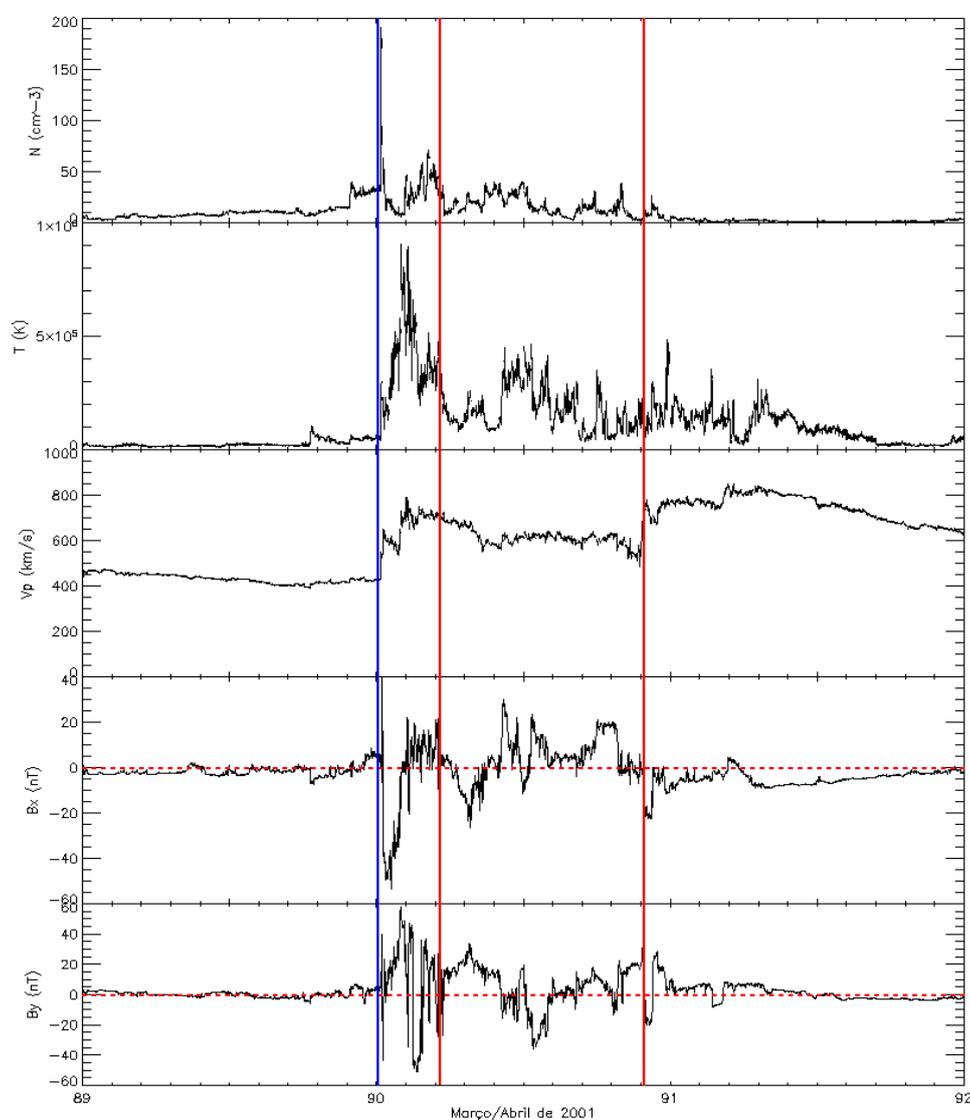
O módulo da velocidade do vento solar teve um aumento abrupto até aproximadamente 700 km/s, durante a passagem da estrutura o módulo da velocidade tem uma pequena diminuição. Após a passagem da estrutura o módulo da velocidade

tem um novo aumento atingindo valores de aproximadamente 800 km/s.

As componentes Bx e By passam por uma grande variação durante a passagem da onda de choque e da estrutura.

A configuração de Bz da onda de choque e da possível estrutura mostram que a ICME seja provavelmente a responsável pela tempestade geomagnética que pode ser classificada como uma tempestade super intensa.

O índice Dst teve pico de -387 nT no dia 31/03 (Fonte: [http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/f/dstfinal200103.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200103.html)).



**Figura 48:** Densidade (N), velocidade (Vp) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da ICME.

#### 4.2.8 EVENTO DE ABRIL DE 2001

No período entre os dias 101 e 104 de 2001 que corresponde respectivamente a 11 de março e 15 de abril houve um salto abrupto de todos os parâmetros interplanetário indica a passagem da onda de choque e a estrutura que possivelmente a origina é classificada como uma nuvem magnética. Na Figura 49 são mostrados gráficos de dados interplanetários, de cima para baixo na Figura se tem o módulo ( $|B|$ ) e a coordenada  $z$  do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética ( $P_k$ ), pressão magnética ( $P_b$ ) e o parâmetro beta do vento solar.

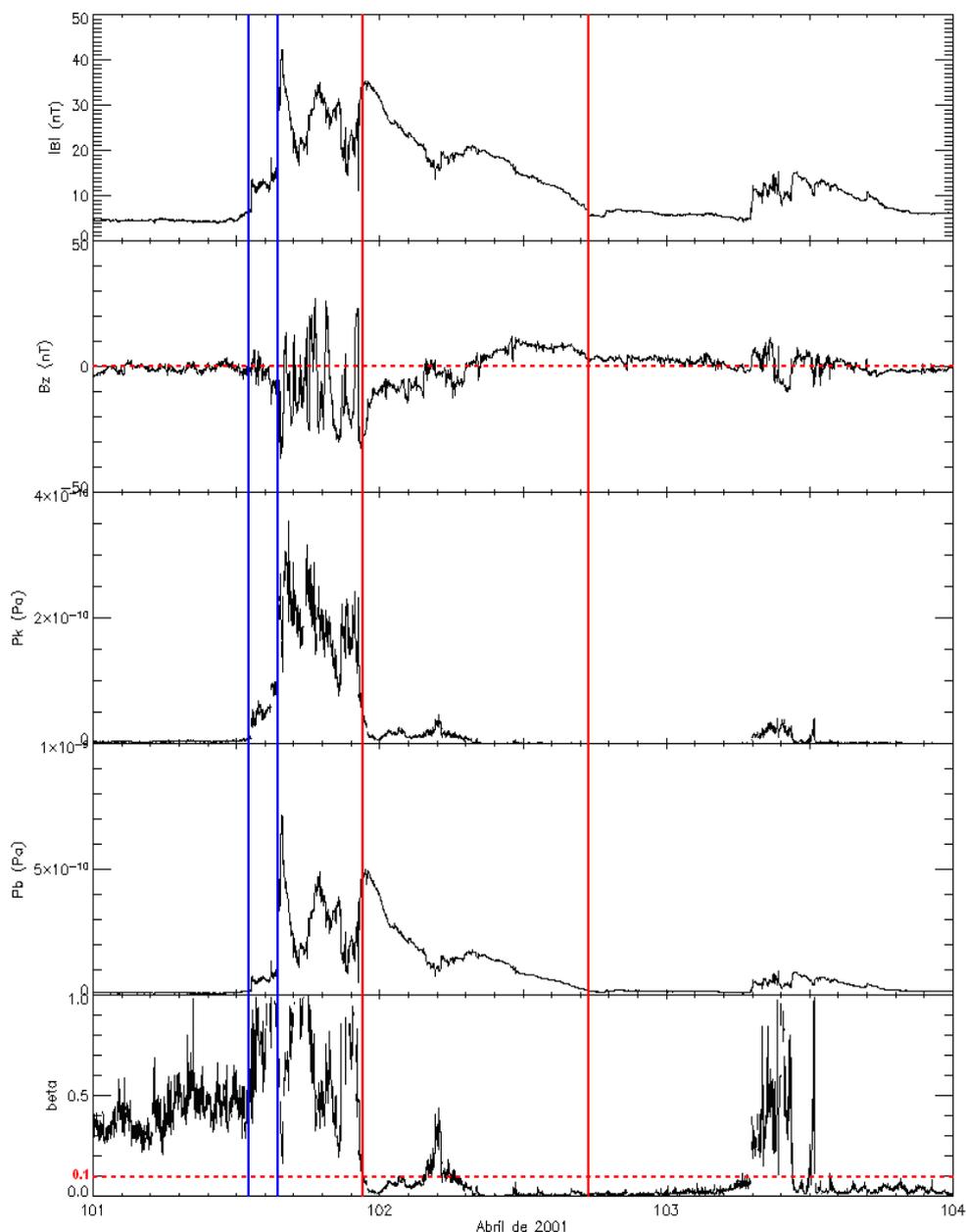
Durante a passagem da onda de choque o módulo do campo magnético interplanetário teve um aumento de 5 nT para aproximadamente 10 nT e após para aproximadamente 40 nT e no interior da estrutura  $|B|$  tem o valor máximo de 30 nT. A componente  $B_z$  passa por grandes oscilações nas regiões dos choques e da bainha, no interior da estrutura  $B_z \sim -32$  nT passando por uma rotação de sul para norte.

No momento da passagem da onda de choque, a pressão cinética teve um aumento abrupto devido ao aumento da temperatura e da densidade de partículas, causados pela compressão do plasma, caracterizando a onda de choque. Dentro da nuvem a pressão cinética diminui, devido à diminuição da densidade de partículas, embora a temperatura ainda apresente valores elevados.

A pressão magnética teve um aumento durante a passagem dos choques, pois houve um aumento da intensidade do campo magnético permanecendo assim durante a passagem da nuvem pelo telescópio observador.

O parâmetro beta obtido no interior da estrutura quase sempre possui valores abaixo de 0,1 mostrando que a pressão magnética é no mínimo 10 vezes maior que a pressão cinética, sendo assim as propriedades magnéticas são dominantes nesta região. Na região que precede a nuvem magnética os valores de beta são maiores, devido à elevação da pressão cinética.

O valor de beta sempre abaixo de 0,1 no interior da estrutura indica que ela pode ser classificada como uma possível nuvem magnética.



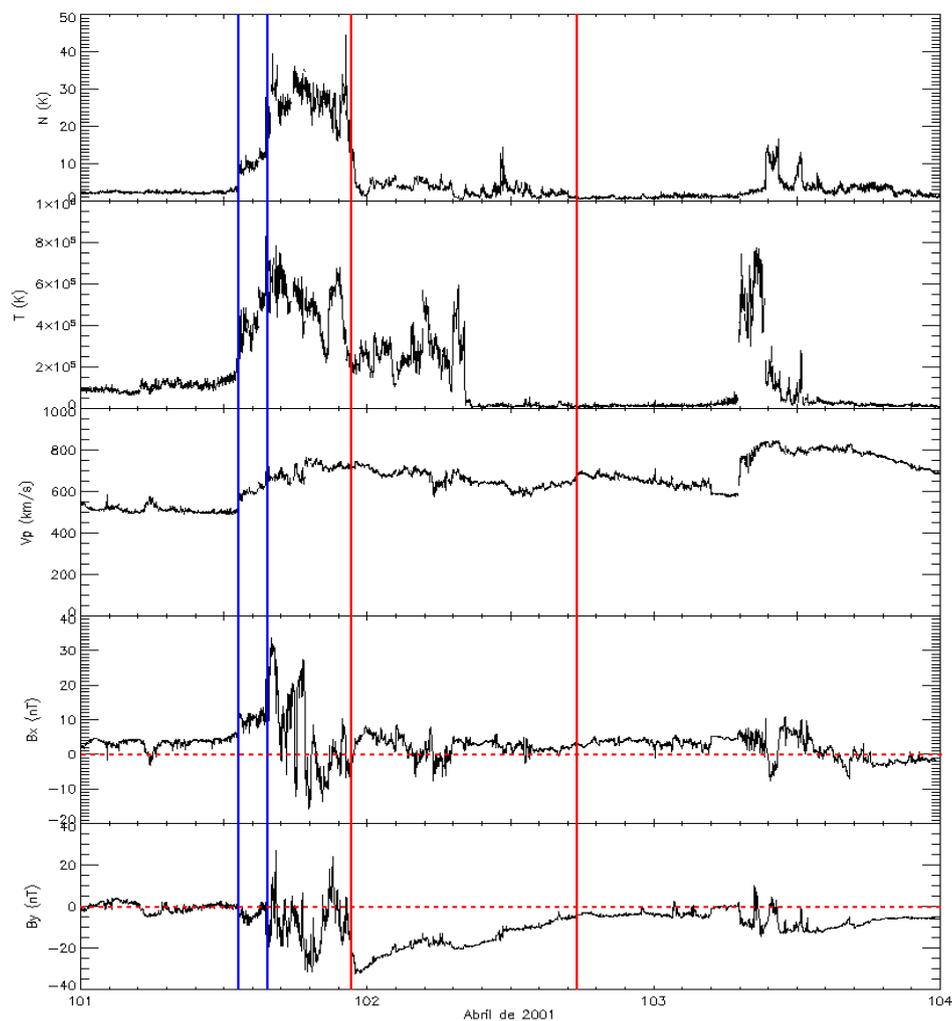
**Figura 49:** Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de abril de 2001. De cima para baixo: Módulo ( $|B|$ ) e a componente z do campo magnético interplanetário no sistema GSM ( $B_z$ ), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

Na Figura 50 são mostrados outros parâmetros do vento solar, de cima para baixo se tem a densidade ( $N$ ), velocidade ( $V_p$ ) e a temperatura do vento solar ( $T$ ) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM.

O módulo da velocidade do vento solar teve um salto no momento da passagem da onda de choque de ~ 500 km/s para 700 km/s mantendo-se assim no interior da nuvem magnética.

As componentes Bx e By passam por uma grande variação durante a passagem da onda de choque e um aumento durante a passagem da nuvem magnética.

Os gráficos mostram uma outra perturbação no meio interplanetário na metade do dia 13 (dia 103 no gráfico), porém não foi registrada nenhuma variação no índice Dst.

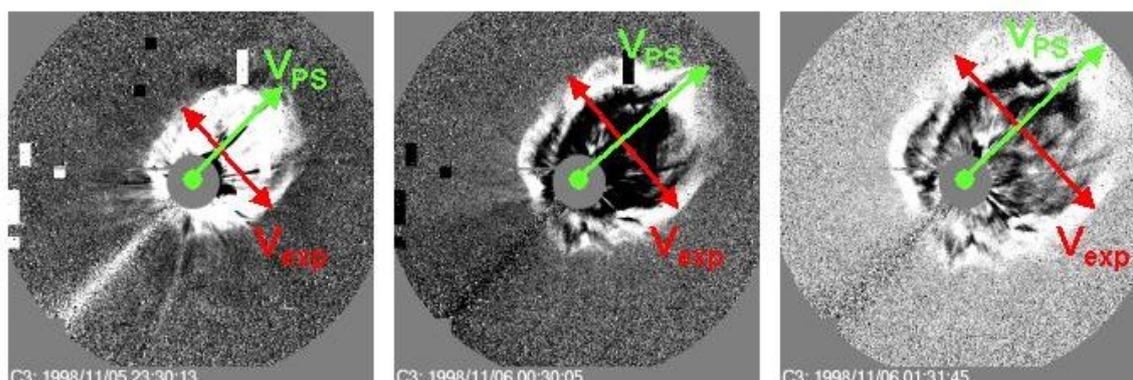


**Figura 50:** Densidade (N), velocidade (Vp) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

A nuvem magnética provavelmente é a responsável pela tempestade geomagnética por ter a coordenada  $z$  do campo magnético é direcionada para o sul. As ondas de choque tiveram uma pequena contribuição para a formação da tempestade. A tempestade ocorrida é classificada como super tempestade, pois atingiu  $Dst = -271$  nT (Fonte: [http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_final/f/dstfinal200104.html](http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200104.html)).

### 4.3 CÁLCULO DA VELOCIDADE (CME DE OUTUBRO DE 1999)

O satélite SOHO proporciona imagens do sol através dos instrumentos EIT e LASCO. O LASCO é um coronógrafo e captura imagens apenas da coroa solar através dos coronógrafos C2 e C3. Com as imagens é possível ter uma idéia da velocidade radial e de expansão das CMEs no plano do céu. A velocidade no plano do céu  $V_{ps}$  (indicada pelo vetor verde na Figura 51) é definida como a projeção da velocidade radial no plano da imagem, determinada pelo deslocamento radial da CME em relação ao centro do disco solar encoberto pelo anteparo do coronógrafo. A velocidade de expansão  $V_{exp}$  da CME é a velocidade com que a CME se expande na direção perpendicular a velocidade  $V_{ps}$  (indicada pelo vetor vermelho na Figura 51).

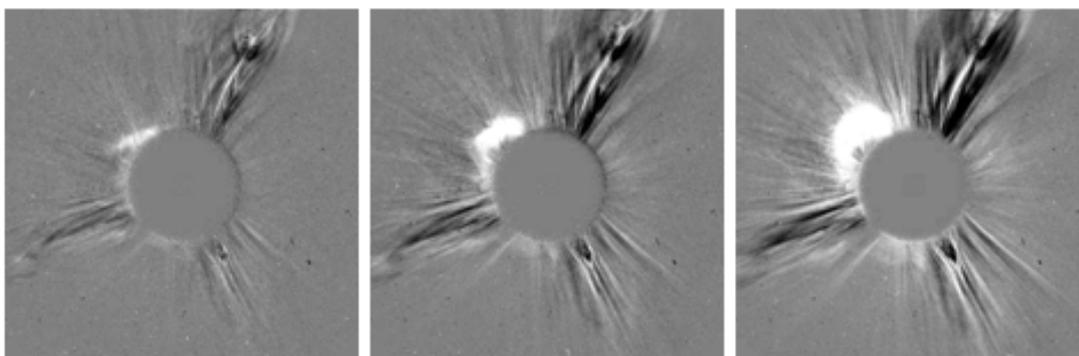


**Figura 51:** CME halo de 5 de novembro de 1998, ilustração da velocidade de expansão  $V_{exp}$  e velocidade no plano do céu  $V_{ps}$ . Imagens obtidas pelo coronógrafo LASCO C3. FONTE: Adaptado de Schwenn et al. 2005.

As imagens obtidas pelo SOHO estavam disponíveis na página do experimento

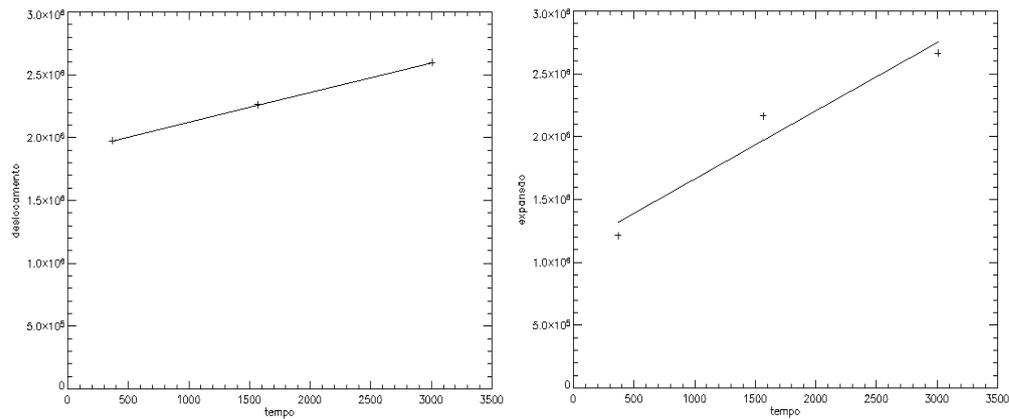
LASCO <http://lasco-www.nrl.navy.mil/>, os arquivos possuem a extensão FITS e foram inicialmente tratadas com o pacote SolarSoftWare (SSW) da NASA, que é um conjunto de software integrado de bibliotecas, bases de dados e ferramentas com a linguagem em ambiente IDL para o tratamento de imagens do ambiente espacial.

Após o tratamento foi usado uma outra rotina (em anexo) que possibilita a visualização da evolução temporal de uma CME no meio interplanetário através das imagens obtidas pelo LASCO e assim pode-se calcular o módulo da velocidades  $V_{ps}$  e  $V_{exp}$ . Na Figura 52 é mostrada uma sequência de imagens obtidas pelo LASCO C2.



**Figura 52:** Imagens obtidas através da rotina desenvolvida em ambiente IDL para visualização da evolução temporal da CME. Evento ocorrido em 18/08/1999.

Nas imagens são determinados pontos, representando o deslocamento e a expansão da CME, que colocados em gráficos onde se determinam os coeficientes angulares das curvas que representam os módulos da velocidade no plano do céu e de expansão, Figura 53.



**Figura 53:** Gráficos para a obtenção dos módulos da velocidade  $V_{ps}$  (gráfico à esquerda) e da velocidade  $V_{exp}$  (gráfico à direita).

A CME analisada ocorreu no dia 18 de outubro de 1999, e foi encontrado o módulo da velocidade  $V_{ps}$  de 235,6 km/s enquanto que o valor determinado no catálogo de CMEs da *CDAW Data Center – NASA* foi de 246,8 km/s, o erro no valor encontrado é de aproximadamente 4,6%. O módulo da velocidade  $V_{exp}$  encontrado foi de 544,08 km/s enquanto que o valor encontrado por Dal Lago et al. (2006) foi 546km/s.

## 5 CONCLUSÕES

As estruturas interplanetárias analisadas causaram tempestades geomagnéticas super intensas, com pico do Dst < - 200 nT. Em de 62,5% dos eventos a estrutura é uma nuvem magnética precedida por uma onda de choque, em 25% dos eventos não foi observada apenas a onda de choque e não a estrutura que a gerou e nos 12,5% dos casos a estrutura que causou a tempestade geomagnética foi classificada como uma ICME precedida por uma onda de choque.

Na maioria dos casos em que a estrutura é uma nuvem magnética percebe-se que a onda de choque associada à estrutura tem o mesmo sentido do campo geomagnético, não sendo favorável para a reconexão magnética, e a tempestade geomagnética propriamente dita deve ser causada pela interação entre a nuvem magnética e o campo magnético terrestre. No evento de setembro de 2000, tanto a onda de choque quanto a nuvem magnética tem Bz com o mesmo sentido do campo geomagnético, porém a região da bainha possui uma rotação da componente Bz e possivelmente contribua para a tempestade.

Analisando-se a parâmetros como velocidade do vento solar, módulo do campo magnético e os valores do índice Dst percebe-se que a relação quanto maior a velocidade e o valor de |B| menor é o valor do Dst. Para o evento de março/abril de 2001, a velocidade da ICME é de aproximadamente 800 km/s, |B| aproximadamente 40 nT causou uma tempestade com pico Dst = -387nT o mesmo ocorre para o evento de junho de 2000, onde e tem Vp ~ 900 km/s, |B| ~ 60 nT e causou uma tempestade com pico Dst = - 301 nT.

Nos dois eventos em que se observou apenas o choque, embora a velocidade do vento solar é relativamente alta, para o evento de maio de 1998 se tem que Vp ~ 800 km/s e |B| entre 40 e 50 nT a tempestade ocorrida teve o pico Dst= - 205 nT e para o evento de abril de 2000 se tem que Vp ~ 600 km/s e |B| ~35 nT a tempestades geomagnética teve pico do Dst = - 288 nT mostrando que a relação entre a intensidade das grandezas não é trivial.

## 6 Referências Bibliográficas

Dal Lago, A., et al. (2006), The 17–22 October (1999) solar-interplanetary-geomagnetic event: Very intense geomagnetic storm associated with a pressure balance between interplanetary coronal mass ejection and a high-speed stream, **J. Geophys. Res.**, 111, A07S14, doi:10.1029/2005JA011394.

Dal Lago, A.; Schwenn, R.; Stenborg, G.; Gonzalez, W. D. Coronal mass ejection speeds measured in the solar corona using LASCO C2 and C3 images. **Advances in Space Research**, Inglaterra, v. 32, n. 12, p. 2619-2624, 2003.

Dal Lago, A.; Vieira, Luis Eduardo Antunes; Echer, Ezequiel; Gonzalez, Walter D.; Gonzalez, Alicia L Clua de; Guarnieri, Fernando Luis; Balmaceda, Laura Antonia; Santos, Jean Carlo; Silva, Marlos Rockenbach da; Lucas, Aline de ; Schuch, Nelson Jorge . Great geomagnetic storms in the rise and maximum of solar cycle 23. **Brazilian Journal of Physics**, Brasil, v. 34, n. 4B, p. 1542-1546, 2004.

Gonzalez, W.D., B.T. Tsurutani, e A.L.C. De Gonzalez, Interplanetary origin of geomagnetic storms, **Space Science Reviews**, 88 (3-4), 529-562, 1999.

Gosling, J. T., S. J. Bame, D. J. McComas, and J. L. Phillips, Coronal mass ejections and large geomagnetic storms, **Geophys. Res. Lett.**, 17, 901-904, 1990.

Gosling, J. T., D. J. McComas, J. L. Phillips, and S. J. Bame, Geomagnetic activity associated with earth passage of interplanetary shock disturbances and coronal mass ejections, **J. Geophys. Res.**, 96, 7831-7838, 1991.

Hundhausen, A. J. An introduction. In: Crooker, N.; Joselyn J. A.; Feynman, J. ed. **Coronal mass ejections**, Washington, DC: AGU, 1997. v. 99, p.1-7.

Munakata, K., J. W. Bieber, S.–I. Yasue, C. Kato, M. Koyama, S. Akahane, K. Fujimoto,

Z. Fujii, J. E. Humble, & M. L. Duldig, Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network, **J. Geophys. Res.**, 105, 27,457, 2000.

Schwenn, R., Dal Lago, A., Huttunen, E., Gonzalez, W.D. **The association of coronal mass ejections with their effects near the Earth** (2005) *Annales Geophysicae*, 23 (3), pp. 1033-1059.

## **7 ANEXOS**

## 7.1 ANEXO 1: Rotina em IDL para calculo das velocidades no plano do céu e de expansão

```

pro teste_imagens_versaol

tmppath='C:\ssw\imagenssoho'           ;ir ate o endereço indicado
files = ''
files = findfile(tmppath+'\s*.fts') ;encontra o os arquivos .fts no
local indicado
files = files (sort(files))           ;colocar os arquivos em ordem
crescente
n_files = n_elements(files)           ;variavel com dimenções igual ao
numero de arquivos
window, xsize=1024, ysize=1024       ;janela para visualização das
imagens
data_points=fltarr(8,n_files)         ;variavel que armazena os pontos
nas imagens

hour=fltarr(n_files)                  ;variavel que armazena a hora das
imagens
cx=fltarr(n_files)
cy=fltarr(n_files)

for i=0, n_files-1 do begin
image = readfits (files(i),head)      ;ler as imagens .fts
current_hour=time2float(sxpar(head,'TIME-OBS')) ;converter a
hora das imagens de string para float
hour[i]=current_hour*3600              ;passar hora para segundos

    image_sub=image
    tvscl, image_sub>(-5)<5            ;resolução da imagen
    xcur=fltarr(3)                     ;pontos a serem macados nas
imagens
    ycur=fltarr(3)
    for ii=0,2 do begin
        cursor,x,y,3,/device
        XYOUTS, X, Y, '+', /DEVICE
        xcur[ii]=x
        ycur[ii]=y
    endfor

    data_points(1, i)=xcur(0)
    data_points(2, i)=ycur(0)
    data_points(3, i)=xcur(1)
    data_points(4, i)=ycur(1)
    data_points(5, i)=xcur(2)
    data_points(6, i)=ycur(2)
;stop

posx=sxpar(head,'CRPIX1')
cx[i]=posx
posy=sxpar(head,'CRPIX2')
cy[i]=posy
endfor

```

```

expans= (sqrt((data_points(5,*)-data_points(1,*))^2+$ ;expansão da
CME na direção perpendicular a direção radial do sol
((data_points(6,*)-data_points(2,*))^2))*8631.19

desloc= (sqrt((data_points(3,*) - cx)^2+(data_points(4,*)-
cy)^2))*8631.19 ;deslocamento da CME na direção radial

;cx e cy seriam as coordenadas do centro do sol
window, 1,xsize=800,ysize=800
!x.margin=[20,20]
!Y.Margin=[20,20]
plot,hour, expans, psym =
1,ytitle='expansão',xtitle='tempo',background=-1,color=0
coef=linfit(hour, expans) ;grafico da expansão da CME
e cálculo do coef. angular = velocidade de expansão
print, 'Vexp =', coef(1), ' km/s'
fit = hour*coef(1) + coef(0)
oplot,hour,fit,color=0

window, 2,xsize=800,ysize=800
!x.margin=[20,20]
!Y.Margin=[20,20]
plot,hour,desloc,psym = 1,background=-
1,color=0,ytitle='deslocamento',xtitle='tempo' ;grafico
do deslocamento da CME
coef1=linfit(hour,desloc)
; e calculo do coef. angular = plane of the sky speed
print, 'Vps =',coef1(1),' km/s'
fit1 = hour*coef1(1) + coef1(0)
oplot,hour,fit1,color=0

stop
end

```

**7.2 RELATÓRIO PARCIAL 2009 FEITO PELO EX-ALUNO BOLSISTA  
MARCOS VINICIUS DIAS SILVEIRA**

**RELATÓRIO PARCIAL DE ATIVIDADES PIBIC/INPE – CNPq/MCT  
FEVEREIRO DE 2009**

**1.Título: ESTUDO DE ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS UTILIZANDO  
OBSERVAÇÕES DE SATÉLITES E OBSERVAÇÕES DE RAIOS CÓSMICOS**

**2. Identificação do aluno e dos orientadores:**

**Bolsista:** Marcos Vinicius Dias Silveira

**Orientador:** Dr. Alisson Dal Lago

**Co-orientador:** Dr. Nelson Jorge Schuch

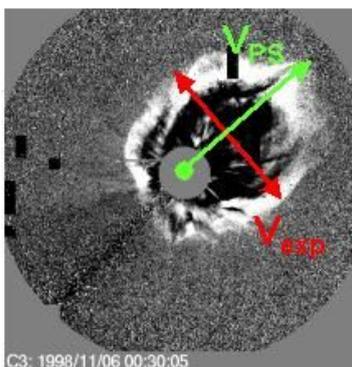
**Protocolo:** 111580/2008 – 0

**3. Colocação do problema estudado:** O Projeto tem como objetivos analisar parâmetros de plasma, de campo magnético do meio interplanetário e os efeitos de estruturas interplanetárias nos raios cósmicos. O projeto pretende utilizar imagens obtidas com os instrumentos LASCO (*Large Angle and Spectroscopic Coronagraph*) e EIT (*Extreme Ultraviolet Imaging Telescope*) a bordo do satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), que permitem a observações das CMEs solares.

**4. Metodologia utilizada:** Foram realizadas análises de parâmetros de plasma e de campo magnético do meio interplanetário, através do cálculo da pressão cinética, pressão magnética e do parâmetro beta, temperatura, velocidade e densidade do vento solar, dados obtidos pelo Satélite *Advanced Composition Explorer* – ACE, e assim identificar e classificar as estruturas interplanetárias. Com dados do Telescópio Detector de Muons do Observatório Espacial do Sul OES/CRS/INPE, instalado em São Martinho da Serra, RS (Latitude 29°, 26', 24''S, Longitude 53°, 48', 38''O e altitude 492m acima do nível do mar) foram realizadas análises da modulação de raios cósmicos de alta energia (>50 GeV) através da variação percentual da contagem de muons. Foram utilizadas imagens da coroa solar obtidas pelo satélite SOHO para a determinação do módulo da velocidade radial e o módulo da velocidade de expansão das CMEs. As análises foram feitas utilizando rotinas em ambiente IDL elaboradas pelo aluno.

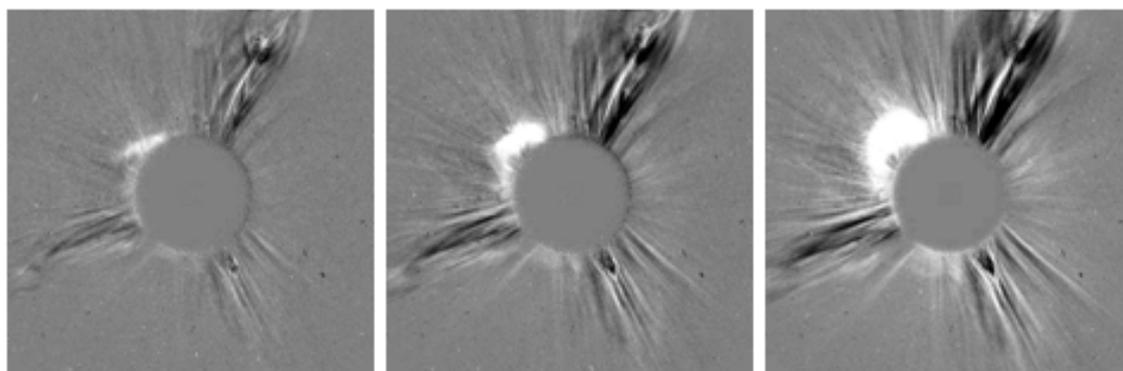
**5.Resultados obtidos:** No período de agosto a janeiro foi dada continuidade às análises dos dados de raios cósmicos para o evento ocorrido entre os dias 14 e 15 de dezembro de 2006. A análise dos dados do meio interplanetário realizada anteriormente mostrou que a estrutura era uma ICME e atingiu a Terra no dia 15 de dezembro provocando uma tempestade geomagnética com índice Dst de -146 nT (Fonte: *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, Japão*). Foram analisadas as contagens de muons nas direções vertical, norte, sul, leste, oeste, nordeste, noroeste, sudoeste e sudeste. Em todas as direções foi identificado o Decréscimo de Forbush.

Neste período teve início o trabalho com o pacote SolarSoft da NASA, utilizado para o tratamento de imagens da coroa e da superfície do Sol obtidas pelos instrumentos LASCO e EIT, ambos a bordo do satélite SOHO e a adaptação de uma rotina em ambiente IDL para trabalhar as imagens em arquivos com extensão FITS. A rotina possibilita a visualização da evolução temporal de uma CME no meio interplanetário através das imagens obtidas pelo LASCO e assim pode-se calcular o módulo da velocidade radial ( $V_{ps}$ ) e da velocidade de expansão ( $exp$ ) ilustradas na Figura 54.

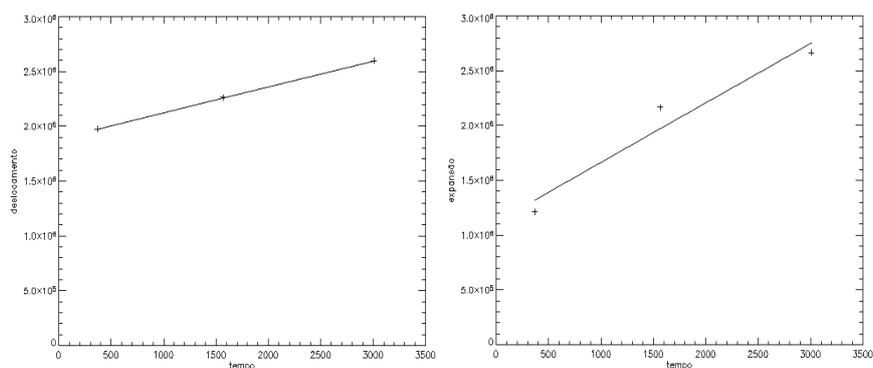


**Figura 54:** Ilustração das velocidades radial e de expansão da CME.  
FONTE: Modificado de Schenn et al. 2005.

As imagens originais, dispostas na página do instrumento LASCO (<http://lasco-www.nrl.navy.mil/index.php>), primeiramente são tratadas através do software SolarSoft e através da rotina são obtidas imagens como as da Figura 55. Nas imagens são determinados pontos, representando o deslocamento e a expansão da CME, que colocados em gráficos onde se determinam os coeficientes angulares das curvas que representam os módulos da velocidade radial e de expansão, Figura 56.



**Figura 55:** Imagens obtidas através da rotina desenvolvida em ambiente IDL para visualização da evolução temporal da CME. Evento ocorrido em 18/08/1999.



**Figura 56:** Gráficos para a obtenção dos módulos da velocidade radial e da velocidade de expansão.

A CME analisada ocorreu no dia 18 de outubro de 1999, e foi encontrado o módulo da velocidade radial de 235,6 km/s enquanto que o valor determinado no catálogo de CMEs da *CDAW Data Center – NASA* foi de 246,8 km/s, o erro no valor encontrado é de aproximadamente 4,6%. O módulo da velocidade de expansão encontrado foi de 544,08 km/s enquanto que o valor encontrado por Dal Lago et al. (2006) foi 546km/s.

No período, o aluno participou do evento:

23ª Jornada Acadêmica Integrada - UFSM, 03 a 06 de novembro de 2008, Santa Maria, RS.

O aluno realizou os seguintes trabalhos como autor e co-autor:

**SILVEIRA, M. V. D.**; DAL LAGO, A.; SCHUCH, N. J. ESTUDO DE ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS UTILIZANDO OBSERVAÇÕES DE SATÉLITES E OBSERVAÇÕES DE RAIOS CÓSMICOS - SICINPE 2008. In: 23ª Jornada Acadêmica Integrada da Universidade Federal de Santa Maria, 2008, Santa Maria. Anais da 23ª Jornada Acadêmica Integrada da Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

BRAGA, Carlos Roberto; DAL LAGO, A.; SCHUCH, N. J. ; KEMMERICH, N.; **SILVEIRA, M. V. D.**; VIEIRA, L. R. ; SILVA, Marlos Rockenbach da . Modulações de raios cósmicos de alta energia observadas por detectores de muons e de nêutrons. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia SBGEA, 2008, Campina Grande, PB. Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia. Campina Grande, PB: Editora da Universidade Estadual da Paraíba, 2008.

KEMMERICH, N.; DAL LAGO, A.; SCHUCH, N. J. ; BRAGA, Carlos Roberto; **SILVEIRA, M. V. D.**; VIEIRA, L. R. Ampliação do protótipo do telescópio detector de muons raios cósmicos de alta energia. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia SBGEA, 2008, Campina Grande, PB. Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia. Campina Grande, PB: Editora da Universidade Estadual da Paraíba, 2008.

STEKEL, T. R. C.; ECHER, E. ; SCHUCH, N. J. ; KEMMERICH, N.; BRAGA, Carlos Roberto; **SILVEIRA, M. V. D.**; VIEIRA, L. R. Estudo de efeitos de explosões solares na ionosfera terrestre em baixas latitudes durante o ciclo solar 23. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia SBGEA, 2008, Campina Grande, PB. Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia. Campina Grande, PB : Editora da Universidade Estadual da Paraíba, 2008.

VIEIRA, L. R.; ECHER, E. ; SCHUCH, N. J. ; DAL LAGO, A.; SILVA, Marlos Rockenbach da; BRAGA, Carlos Roberto; KEMMERICH, N.; **SILVEIRA, M. V. D.** Estudo do decréscimo na intensidade de raios cósmicos causado por estruturas interplanetárias do vento solar. In: II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEA, 2008, Campina Grande, PB. Anais do II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia. Campina Grande, PB: Editora da Universidade Estadual da Paraíba, 2008.

**6. Resultados futuros:** O aluno concluiu o curso de graduação em Física Licenciatura Plena pela Universidade Federal de Santa Maria, colando grau no mês de Janeiro de 2009 e foi aceito no Programa de Pós-Graduação em Geofísica Espacial de INPE com ingresso previsto para Março de 2009, com um projeto na área de Clima Espacial similar ao desenvolvido durante a Iniciação Científica realizada no CRS através do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT. Um novo estudante deverá ser indicado para continuar o projeto. Na próxima etapa do projeto, deverá haver continuidade nas análises dos efeitos das estruturas interplanetárias nos raios cósmicos, através de dados do Telescópio Detector de Muons. Deverão ser realizadas observações de imagens das CMEs solares obtidas através dos instrumentos LASCO e EIT, além de continuar as análises com dados do satélite ACE para outros eventos a serem selecionados. Na etapa final, realizar-se-á a preparação de trabalhos e apresentações em eventos e congressos, incluindo o congresso do PIBIC do INPE (SICINPE) e redação do Relatório Final das atividades de Iniciação Científica do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, junto ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais CRS/INPE – MCT.