



**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

Roger Hatwig de Lima – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas
LCEPTM/CRS/CCR/INPE – MCT
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
E-mail: rogerlima@lacesm.ufsm.br

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

Santa Maria, Julho de 2011

**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:

Roger Hatwig de Lima - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT
E-mail: rogerlima@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/CCR/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:

Roger Hatwig de Lima

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica

Centro de Tecnologia – CT/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/CCR/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

Mauricio Rosa de Souza

Acadêmico do curso de Física Licenciatura Plena Noturno/UFSM

Bruno Knevez Hammerschmitt

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica/UFSM

Juliano Rafael Andrade

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica/UFSM

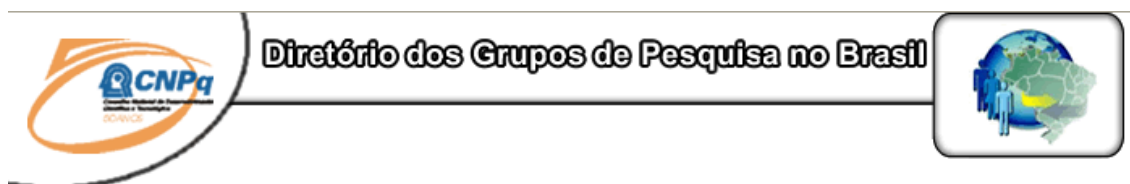
Local de Trabalho/Execução do Projeto:

Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas -
LCEPTM/CRS/INPE – MCT

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT (29.4°S, 53.8° W, 480 m)

acima do nível do mar).

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



Estudante
Roger Hatwig de Lima



[Link para
Currículo Lattes](#)

[Dados gerais](#)

[Indicadores de produção C, T & A](#)

Dados gerais

Identificação do estudante

Nome: Roger Hatwig de Lima

Nível de treinamento: Graduação

Currículo Lattes: 06/06/2011 09:06

E-mail: rogerlima@lacesm.ufsm.br

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](#)

[MAGNETOSFERAS x GEOMAGNETISMO](#)

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 | 0 | 0 |
| Produção técnica | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Orientação concluída | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Produção artística/cultural e demais trabalhos | 0 | 0 | 0 | 0 |



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



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



[Identificação](#)

[Recursos Humanos](#)

[Linhas de Pesquisa](#)

[Indicadores do Grupo](#)

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 do último envio: 14/07/2011 14:40

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch -

Natanael Rodrigues Gomes

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

Cidade: Santa Maria

Telefone: 33012026

CEP: 97110970

UF: RS

Fax: 33012030

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.

Pesquisadores

Total: 48

| | |
|--|---|
| <u>Ademar Michels</u> | <u>Jean Carlo Santos</u> |
| <u>Adriano Petry</u> | <u>Jean Pierre Raulin</u> |
| <u>Alan Prestes</u> | <u>Joao Paulo Minussi</u> |
| <u>Alexandre Alvares Pimenta</u> | <u>Jose Humberto Andrade Sobral</u> |
| <u>Alicia Luisa Clúa de Gonzalez</u> | <u>Juliano Moro</u> |
| <u>Alisson Dal Lago</u> | <u>Lucas Ramos Vieira</u> |
| <u>Antonio Claret Palerosi</u> | <u>Mangalathayil Ali Abdu</u> |
| <u>Barclay Robert Clemesha</u> | <u>Marcelo Barcellos da Rosa</u> |
| <u>Caitano Luiz da Silva</u> | <u>Marco Ivan Rodrigues Sampaio</u> |
| <u>Carlos Roberto Braga</u> | <u>Marcos Vinicius Dias Silveira</u> |
| <u>Cassio Espindola Antunes</u> | <u>Nalin Babulau Trivedi</u> |
| <u>Clezio Marcos De Nardin</u> | <u>Natanael Rodrigues Gomes - (líder)</u> |
| <u>Cristiano Max Wrasse</u> | <u>Nelson Jorge Schuch - (líder)</u> |
| <u>Cristiano Sarzi Machado</u> | <u>Nivaor Rodolfo Rigozo</u> |
| <u>Delano Gobbi</u> | <u>Odim Mendes Junior</u> |
| <u>Eurico Rodrigues de Paula</u> | <u>Osmar Pinto Junior</u> |
| <u>Ezequiel Echer</u> | <u>Otavio Santos Cupertino Durão</u> |
| <u>Fabiano Luis de Sousa</u> | <u>Pawel Rozenfeld</u> |
| <u>Fábio Augusto Vargas dos Santos</u> | <u>Petrônio Noronha de Souza</u> |
| <u>Fernanda de São Sabbas Tavares</u> | <u>Polinaya Muralikrishna</u> |
| <u>Fernando Luís Guarnieri</u> | <u>Rafael Lopes Costa</u> |
| <u>Gelson Lauro Dal' Forno</u> | <u>Rajaram Purushottam Kane</u> |
| <u>Hisao Takahashi</u> | <u>Severino Luiz Guimaraes Dutra</u> |
| <u>Ijar Milagre da Fonseca</u> | <u>Walter Demetrio Gonzalez Alarcon</u> |

Estudantes

Total: 30

| | |
|--|---|
| <u>Ândrei Camponogara</u> | <u>Juliano Rafael Andrade</u> |
| <u>Bruno Knevitz Hammerschmitt</u> | <u>Leonardo Zavareze da Costa</u> |
| <u>Cássio Rodinei dos Santos</u> | <u>Lucas Camponogara Viera</u> |
| <u>Claudio Machado Paulo</u> | <u>Lucas Lopes Costa</u> |
| <u>Dimas Irion Alves</u> | <u>Lucas Lourencena Caldas Franke</u> |
| <u>Edson Rodrigo Thomas</u> | <u>Maurício Ricardo Balestrin</u> |
| <u>Eduardo Escobar Bürger</u> | <u>Mauricio Rosa de Souza</u> |
| <u>Eduardo Weide Luiz</u> | <u>Michel Baptistella Stefanello</u> |
| <u>Felipe Cipriani Luzzi</u> | <u>Nikolas Kemmerich</u> |
| <u>Fernando Landerdahl Alves</u> | <u>Pietro Fernando Moro</u> |

[Guilherme Grams](#)

[Guilherme Paul Jaenisch](#)

[Guilherme Simon da Rosa](#)

[Igor Freitas Fagundes](#)

[José Paulo Marchezi](#)

[Roger Hatwig de Lima](#)

[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)

[Tális Piovesan](#)

[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)

[William do Nascimento Guareschi](#)

Técnicos

Fernando Sobroza Pedroso - Graduação - \Outra Função

Henrique Sobroza Pedroso - Graduação - Analista de Sistemas

Total: 2

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

| | Integrantes do grupo | Total |
|-----------------|----------------------|-------|
| Pesquisador(es) | | 48 |
| Estudante(s) | | 30 |
| Técnico(s) | | 2 |



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Linha de Pesquisa
MEIO INTERPLANETÁRIO - CLIMA ESPACIAL

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:

[Adriano Petry](#)

[Alan Prestes](#)

[Alexandre Álvares Pimenta](#)

[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez Alarcon](#)

[Alisson Dal Lago](#)

[Carlos Roberto Braga](#)

[Cassio Espindola Antunes](#)

[Ezequiel Echer](#)

[Fernando Luis Guarnieri](#)

[Jean Pierre Raulin](#)

[Juliano Moro](#)

[Lucas Ramos Vieira](#)

[Marcos Vinicius Dias Silveira](#)

[Nelson Jorge Schuch](#)

[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)

[Rajaram Purushottam Kane](#)

[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)

[Walter Demetrio Gonzalez-Alarcon](#)

Estudantes:

[Bruno Knevez Hammerschmitt](#)

[Claudio Machado Paulo](#)

[Dimas Irion Alves](#)

[Eduardo Escobar Bürger](#)

[Guilherme Grams](#)

[José Paulo Marchezi](#)

[Juliano Rafael Andrade](#)

[Leonardo Zavareze da Costa](#)

[Lucas Camponogara Viera](#)

[Mauricio Rosa de Souza](#)

[Michel Baptistella Stefanello](#)

[Nikolas Kemmerich](#)

[Pietro Fernando Moro](#)

[Roger Hatwig de Lima](#)

[Tális Piovesan](#)

[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)

[William do Nascimento Guareschi](#)

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.



Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



Linha de Pesquisa

Desenvolvimento de CubeSats - NANOSATC-BR

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](#)

[Adriano Petry](#)

[Alexandre Álvares Pimenta](#)

[Alicia Luisa Clúa de Gonzalez Alarcon](#)

[Alisson Dal Lago](#)

[Antonio Claret Palerosi](#)

[Cassio Espindola Antunes](#)

[Clezio Marcos De Nardin](#)

[Cristiano Sarzi Machado](#)

[Ezequiel Echer](#)

[Fabiano Luis de Sousa](#)

[Fernando Luis Guarnieri](#)

[Gelson Lauro Dal Forno](#)

[Ijar Milagre da Fonseca](#)

[Jean Pierre Raulin](#)

[Jose Humberto Andrade Sobral](#)

[Lucas Ramos Vieira](#)

[Nalin Babulal Trivedi](#)

[Natanael Rodrigues Gomes](#)

[Nelson Jorge Schuch](#)

[Nivaor Rodolfo Rigozo](#)

[Odim Mendes Junior](#)

[Otavio Santos Cupertino Durao](#)

[Pawel Rosenfeld](#)

[Petrônio Noronha de Souza](#)
[Rafael Lopes Costa](#)
[Severino Luiz Guimaraes Dutra](#)
[Walter Demetrio Gonzalez-Alarcon](#)

Estudantes:

[Ândrei Camponogara](#)
[Dimas Irion Alves](#)
[Eduardo Escobar Bürger](#)
[Fernando Landerdahl Alves](#)
[Guilherme Grams](#)
[Guilherme Paul Jaenisch](#)
[Guilherme Simon da Rosa](#)
[Igor Freitas Fagundes](#)
[José Paulo Marchezi](#)
[Juliano Rafael Andrade](#)
[Leonardo Zavareze da Costa](#)
[Lucas Lopes Costa](#)
[Lucas Lourencena Caldas Franke](#)
[Maurício Ricardo Balestrin](#)
[Mauricio Rosa de Souza](#)
[Nikolas Kemmerich](#)
[Pietro Fernando Moro](#)
[Roger Hatwig de Lima](#)
[Rubens Zolar Gehlen Bohrer](#)
[Tális Piovesan](#)
[Tardelli Ronan Coelho Stekel](#)
[William do Nascimento Guareschi](#)

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

Primeiro agradeço aos meus pais, João Carlos Zimmer de Lima, exemplo de honra e dignidade, e Roseli Luiza Hatwig de Lima, mãe guerreira e aconselhadora, por me mostrem o caminho e me apoiarem incondicionalmente até hoje.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Alisson Dal Lago. Ao meu co-orientador, Dr. Nelson Jorge Schuch, pela oportunidade dessa Iniciação Científica e Tecnológica e pelos inúmeros conselhos e ensinamentos.

Agradeço ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE-MCT e ao Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE-MCT, pela infra-estrutura. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio financeiro. E finalmente a Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, pelo suporte técnico.

Também agradeço: (i) aos funcionários, servidores do CRS/CCR/INPE - MCT e do LACESM/CT - UFSM, pelo carinho e pelos seus serviços prestados; (ii) ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa; (iii) ao Coordenador Dr. Ezzat Selim Chalhoub e a Secretária do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, Sra. Egidia Inácio da Rosa, pelos alertas e sua incansável preocupação com toda a burocracia e datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/CCR/INPE - MCT.

Por último, mas não menos importante, agradeço aos meus colegas de laboratório, Bruno Knevez Hammerschmitt e Maurício Rosa de Souza, por todo o apoio e incentivo durante o Projeto de Pesquisa.

Preâmbulo

O Projeto teve o bolsista Maurício Rosa de Souza, aluno do Curso de Física Licenciatura da UFSM, substituído no mês de fevereiro do ano de 2011 pelo acadêmico Roger Hatwig de Lima, aluno do Curso de Engenharia Elétrica da UFSM, que passou a realizar os trabalhos referentes ao projeto a partir do mês de março de 2011. O novo bolsista teve como principal objetivo nesta primeira etapa, estudar a literatura relacionada ao projeto, como teses de doutorado, relatórios anteriores a fim de familiarizar-se com o projeto que iria desenvolver ao longo do ano. Após, seguirá com a etapa seguinte, realizar a análise dos dados coletados pelo detector de muons no OES localizado no município de São Martinho da Serra.

RESUMO

O Projeto tem como objetivo geral estudar as diferentes estruturas interplanetárias provenientes do Sol e analisar suas interações com os raios cósmicos detectados pelo Detector Multidirecional de Muons – DMM. As estruturas estudadas são CMEs (*Coronal Mass Ejections*), entre outros fenômenos espaciais. Quando as CMEs atingem a magnetosfera terrestre, podem causar tempestades geomagnéticas, podendo gerar danos em vários sistemas de infraestrutura da Sociedade moderna, tais como: nas telecomunicações e na distribuição de energia elétrica, entre outros. As CMEs, são estruturas provenientes da Coroa Solar. O material ejetado é plasma, constituído de elétrons e prótons com pequenas quantidades de hélio, oxigênio e ferro, mas que possui campo magnético. Dentre aquelas que atingem a Terra, algumas podem interagir fortemente com a magnetosfera terrestre ocasionando repentinas 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 os raios cósmicos primários, causando geralmente um decréscimo na contagem das partículas. Os Muons são decorrentes do decaimento dos raios cósmicos primários com os constituintes da atmosfera terrestre, atingindo a Terra de forma isotrópica. Quando há uma tempestade geomagnética ocorre um decréscimo na contagem dessas partículas, denominado decréscimo de Forbush. Portanto, o Projeto se concentra em: examinar dados de parâmetros de plasma obtidos através do satélite ACE – NASA (*Advanced Composition Explorer*), que orbita o ponto Lagrangeano interno (L1) do Sistema Sol-Terra, localizado a 240 raios terrestres da Terra, visando principalmente calcular as pressões cinética e magnética das estruturas a fim de se obter o parâmetro beta, que é a razão entre as pressões cinética e magnética. Utilizar imagens do Sol obtidas pelo satélite SOHO - NASA (*Solar and Heliospheric Observatory*), que orbita o ponto Lagrangeano L1, para calcular a velocidade das CMEs e com os dados da contagem direcional de muons fornecidos pelo DMM que opera no Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CCR/INPE-MCT, em São Martinho da Serra-RS, realizar a identificação dos possíveis decréscimos nas respectivas contagens de Muons para os períodos em que foram registrados eventos solares, comparando-os com dados do ACE (ano, dia, hora e velocidade).

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO E OBJETIVOS..... | 18 |
| 1.1INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.2OBJETIVOS..... | 18 |
| 2CAPÍTULO 2: O MEIO INTERPLANETÁRIO E AS INTERAÇÕES SOL-TERRA..... | 20 |
| 2.1O SOL | 20 |
| 2.1.1O Interior Solar..... | 21 |
| 2.1.2Atmosfera Solar..... | 21 |
| 2.1.2.1Fotosfera Solar..... | 21 |
| 2.1.2.2Cromosfera Solar | 23 |
| 2.1.2.3A Coroa Solar..... | 24 |
| 2.2O VENTO SOLAR..... | 25 |
| 2.3O CAMPO MAGNÉTICO DO SOL E O CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO | 26 |
| 2.4CICLO SOLAR DE 11 ANOS | 28 |
| 2.5ESTRUTURAS MAGNÉTICAS NO MEIO INTERPLANETÁRIO..... | 30 |
| 2.5.1 Regiões de Interação Co-Rotante..... | 30 |
| 2.5.2Explosões Solares..... | 32 |
| 2.5.3Ondas de Choque | 33 |
| 2.5.4Ejeção Coronal de Massa | 34 |
| 2.5.5Nuvens Magnéticas | 37 |
| 2.6RAIOS CÓSMICOS..... | 39 |
| 2.7TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS | 42 |
| 3CAPÍTULO: METODOLOGIA..... | 47 |
| 3.1O SATÉLITE ACE | 47 |
| 3.2O SATÉLITE SOHO | 51 |
| 3.3DETECTOR MULTIDIRECIONAL DE MUONS | 55 |
| 4CAPÍTULO: ANÁLISE DE DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 59 |
| 4.1VARIAÇÃO NA CONTAGEM DE MUONS EM DEZEMBRO DE 2006..... | 60 |
| 4.2ANÁLISE DE DADOS DO MEIO INTERPLANETÁRIO | 61 |
| 4.2.1Evento de Abril de 2000 | 61 |
| 4.2.2Evento de Agosto de 2000 | 65 |
| 4.2.3Evento de Março/Abril de 2001 | 69 |
| 4.2.4Evento de Abril de 2001 | 73 |
| 4.3CÁLCULO DA VELOCIDADE (CME DE OUTUBRO DE 1999)..... | 78 |
| 5CAPÍTULO: CONCLUSÕES | 80 |
| 6REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 82 |
| 7 ATIVIDADES COMPLEMENTARES – PARTICIPAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE TRABALHOS..... | 87 |

Índice de Figuras

| | |
|--|-----------|
| FIGURA 1: IMAGEM DA FOTOSFERA E DOS GRÂNULOS SOLARES. | 25 |
| FIGURA 2: FOTOGRAFIA DA CROMOSFERA SOLAR. | 26 |
| FIGURA 3: FOTOGRAFIA MOSTRANDO AS PROEMINÊNCIAS SOLARES. | 26 |
| FIGURA 4: EXEMPLO DE ECLIPSE SOLAR TOTAL. | 27 |
| FIGURA 5: ESQUEMA DO CHOQUE DAS PARTÍCULAS PROVENIENTES DO VENTO SOLAR COM A ATMOSFERA DA TERRA. REPRODUÇÃO: OBSERVATÓRIO ASTRONÔMICO UFES. | 28 |
| FIGURA 6: ASPECTO DO CAMPO MAGNÉTICO INTERPLANETÁRIO. | 29 |
| FIGURA 7: LÂMINA DE CORRENTE HELIOSFÉRICA – LCH, PRÓXIMA AO SOL. | 30 |
| FIGURA 8: GRÁFICOS MOSTRANDO O NÚMERO DE MANCHAS SOLARES A PARTIR DE 1955. | 32 |
| FIGURA 9: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CIR. | 33 |
| FIGURA 10: VISÃO DA ESTRUTURA DE SETOR INTERPLANETÁRIA E DA LÂMINA DE CORRENTE. | 34 |
| FIGURA 11: IMAGEM DE UMA EXPLOSÃO SOLAR. | 35 |
| FIGURA 12: GEOMETRIA DE UMA NUVEM MAGNÉTICA. | 40 |
| FIGURA 13: INTENSIDADE DOS RAIOS CÓSMICOS EM FUNÇÃO DA ENERGIA. | 41 |
| FIGURA 14: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM CHUVEIRO DE RAIOS CÓSMICOS. | 42 |
| FIGURA 15: ILUSTRAÇÃO DO BLOQUEIO DE RAIOS CÓSMICOS POR UMA CME. | 43 |
| FIGURA 16: CURVA DST ENTRE OS DIAS 5–8 DE SETEMBRO DE 1982. | 44 |
| FIGURA 17: AURORA FORMADA APÓS UMA TEMPESTADE GEOMAGNÉTICA. | 44 |
| FIGURA 18: ILUSTRAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE UMA NUVEM MAGNÉTICA, ORIUNDA DE UMA ICME, COM A MAGNETOSFERA TERRESTRE. | 45 |
| FIGURA 19: FENÔMENOS QUE AFETAM O CLIMA ESPACIAL, ENERGIAS ENVOLVIDAS, TEMPO DE DURAÇÃO DE EUS EFEITOS E PRINCIPAIS TIPOS DE DANOS EM SISTEMAS TECNOLÓGICOS. | 47 |
| FIGURA 20: ILUSTRAÇÃO REPRESENTATIVA DA ÓRBITA DO SATÉLITE ACE, O PONTO LAGRANGEANO L1, A DISTÂNCIA DO L1 EM RELAÇÃO À TERRA E AO SOL. | 49 |
| FIGURA 21: ILUSTRAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DOS INSTRUMENTOS ABORDO DO ACE. | 50 |

| | |
|---|-----------|
| FIGURA 22: TABELA DE DADOS OBTIDOS DO SATÉLITE ACE, DADOS BAIXADOS DA INTERNET PELO BOLSISTA PARA CONFEÇÃO DE GRÁFICOS. | 51 |
| FIGURA 23: ESQUEMA DA ÓRBITA DO SATÉLITE SOHO..... | 52 |
| FIGURA 24: O SOL DIVIDIDO EM QUATRO QUADRANTES, ONDE CADA QUADRANTE CORRESPONDE A UM COMPRIMENTO DE ONDA DISTINTO..... | 54 |
| FIGURA 25: IMAGEM DO TELESCÓPIO EIT..... | 54 |
| FIGURA 26: DIAGRAMA MOSTRANDO A ÁREA DE COBERTURA DA REDE DE DMMS, MOSTRANDO AS VISÕES ASSINTÓTICAS DE CADA DETECTOR. | 56 |
| FIGURA 27: FOTO DO PROTÓTIPO DO DMM INSTALADO NO OES EM 2001..... | 57 |
| FIGURA 28: FOTO DO DMM EXPANDIDO INSTALADO NO OES EM DEZEMBRO DE 2005..... | 57 |
| FIGURA 29: ESQUEMA DO MÉTODO DE CONTAGEM DO TCM. | 58 |
| FIGURA 30: 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. | 60 |
| FIGURA 31: 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 (BZ), 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..... | 62 |
| FIGURA 32: DE CIMA PARA BAIXO: 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. | 63 |
| FIGURA 33: 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 (BZ), 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. | 65 |
| FIGURA 34: 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. | 66 |
| FIGURA 35: 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 (BZ), 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. | 68 |
| 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. 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..... | 70 |
| FIGURA 37: 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 (BZ), 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 38: 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. | 73 |
| FIGURA 39: CME HALO DE 5 DE NOVEMBRO DE 1998, ILUSTRAÇÃO DA VELOCIDADE DE EXPANSÃO VEXP E VELOCIDADE NO PLANO DO CÉU VPS. IMAGENS OBTIDAS PELO CORONÓGRAFO LASCO C3. | 74 |
| FIGURA 40: IMAGENS OBTIDAS ATRAVÉS DA ROTINA DESENVOLVIDA EM AMBIENTE IDL PARA VISUALIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CME. EVENTO OCORRIDO EM 18/08/1999..... | 75 |
| FIGURA 41: GRÁFICOS PARA A OBTENÇÃO DOS MÓDULOS DA VELOCIDADE VPS (GRÁFICO À ESQUERDA) E DA VELOCIDADE VEXP (GRÁFICO À DIREITA). | 75 |
| FIGURA 42: ILUSTRAÇÃO DAS VELOCIDADES RADIAL E DE EXPANSÃO DA CME. | 83 |
| FIGURA 43: IMAGENS OBTIDAS ATRAVÉS DA ROTINA DESENVOLVIDA EM AMBIENTE IDL PARA VISUALIZAÇÃO DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DA CME. EVENTO OCORRIDO EM 18/08/1999..... | 84 |
| FIGURA 44: GRÁFICOS PARA A OBTENÇÃO DOS MÓDULOS DA VELOCIDADE RADIAL E DA VELOCIDADE DE EXPANSÃO. | 84 |

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

O Sol é a estrela central do nosso sistema solar. Extremamente ativa, a sua atividade, chamada atividade solar, é a principal responsável por distúrbios geomagnéticos observados na superfície Terrestre, que podem causar flutuações na rede elétrica e de telecomunicações, deixar sem uso os satélites e afetar o trabalho dos astronautas no espaço, daí a importância de estudar o Clima Espacial.

As principais estruturas provindas do Sol e estudadas no projeto são ejeções coronais de massa (CMEs), nuvens magnéticas, explosões solares, ondas de choque e regiões de interação co-rotante (CIRs).

No Relatório são estudadas estruturas interplanetárias do tipo CMEs, nuvens magnéticas e ondas de choque através de dados do meio interplanetário, fornecidos pelo satélite ACE (*Advanced Composition Explorer*).

1.2 Objetivos

Os objetivos do Projeto envolvem principalmente a familiarização do aluno com o estudo do Clima Espacial, principalmente com a observação e análise de estruturas observadas no meio interplanetário.

A análise de eventos de diferentes estruturas interplanetárias através de dados obtidos pelo satélite ACE, situado no ponto Lagrangeano L1, ponto de equilíbrio gravitacional entre o Sol e a Terra, 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.

E, mais adiante, as observações dos efeitos das estruturas nos raios cósmicos observados pelo Detector Multidirecional de Muons, que está em operação no OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra-RS.

2 CAPÍTULO 2: O MEIO INTERPLANETÁRIO E AS INTERAÇÕES SOL-TERRA

2.1 O Sol

O Sol é uma estrela ativa com uma massa média de $1,99 \times 10^{30}$ g, raio de 696.000 km e potência luminosa de $3,9 \times 10^{26}$ W. É formado predominantemente por hidrogênio e hélio. A energia solar é originada em seu núcleo no processo de fusão de núcleos de hidrogênio (prótons), formando núcleos de hélio (partículas alfa). 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.

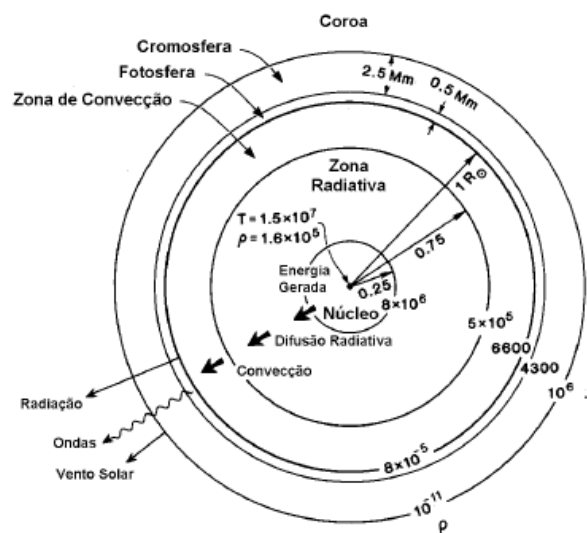


Figura 1 - Estrutura do interior solar e atmosfera. Fonte: Kivelson e Russell (1995, p.61)

2.1.1 O Interior Solar

O Interior Solar é formado pelas seguintes regiões: Núcleo, que se estende até 0,25 raios solares, apresentando uma temperatura da ordem de $1,5 \times 10^7$ K e densidade $1,6 \times 10^5$ 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 8×10^6 K e Zona de Convecção, estendendo-se no intervalo de 0,75 a 1 raio solar, com temperatura no intervalo de 5×10^5 a 6600 K e onde a energia é dissipada sob a forma de convecção.

Modelos teóricos sugerem que a energia solar se origina no núcleo por meio de um reator de fusão nuclear, operando a temperatura de $1,5 \times 10^7$ K e gerando energia através da fusão de 5 milhões de toneladas de hidrogênio por segundo para formar hélio. Essa energia demora cerca de 10 milhões de 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.

2.1.2 Atmosfera Solar

A Atmosfera Solar, em função de suas características e processos físicos, pode ser dividida em: Fotosfera, Cromosfera e Coroa Solar.

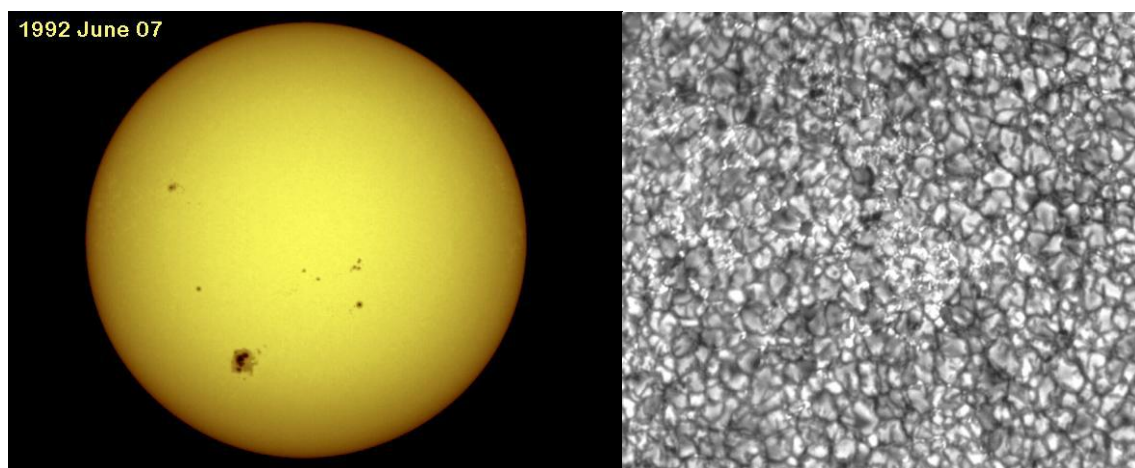
2.1.2.1 Fotosfera Solar

Possui uma espessura de cerca de 500 km e densidade em torno de 10^{13} a 10^{15} partículas por centímetro cúbico. Dessa camada vem a maior parte da luz visível ao olho

humano. Entretanto, o gás desta camada não é totalmente transparente e, devido a sua opacidade, o interior solar não pode ser visto.

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. O número destas Manchas aumenta e diminui de acordo com um período de 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 consequentemente 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 (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} m⁻³, cai de 1-2 ordens de grandeza relativamente a Fotosfera. Esta camada é na realidade uma faixa de transição entre a Cromosfera fria e a Coroa quente.

Pode ser vista observando-se o Sol com um filtro solar conhecido como H-alfa. Com isso distinguimos as várias estruturas cromosféricas, como as proeminências que apresentam uma coloração alaranjada (Figura 4) que só pode ser observada quando ocorre um obscurecimento do disco solar, por exemplo durante eclipses totais do Sol. 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, Hélio e Hidrogênio em sua composição.

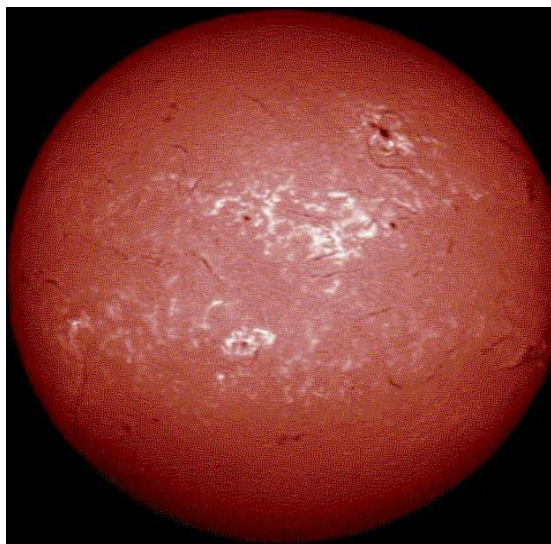


Figura 3: Fotografia da cromosfera solar.

Fonte: http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/HI6563_fulldisk.jpg

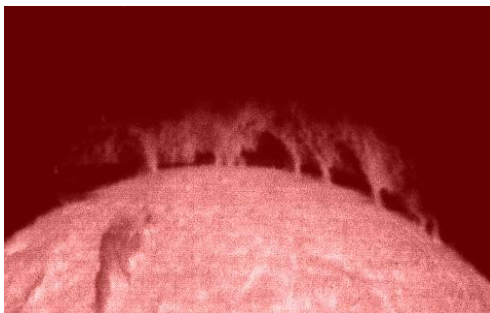


Figura 4: Fotografia mostrando as proeminências solares.
Fonte: <http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/prominence.jpg>

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. Altamente rarefeita e muito difusa, a Coroa Solar possui densidade de aproximadamente 10 átomos por centímetro cúbico. Curiosamente, o gás da coroa solar possui uma temperatura bastante alta, atingindo cerca de dois milhões de graus Kelvins. 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://erassociados.com/blog/tag/eclipse/>

2.2 O Vento Solar

O vento solar é um plasma (gás de íons e elétrons) emitido radialmente pelo Sol como resultado de diferença de pressão dos gases da coroa solar e do espaço interestrelar nas proximidades do Sol. Este plasma espalha-se por todo meio interplanetário, passando pela Terra com uma velocidade média de 400-500 km/s e densidade média de prótons e elétrons de 5 cm^{-3} (Brandt, 1970). 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 mostrado na Figura 6.

Sua existência foi primeiramente sugerida por Ludwig Biermann, entre 1951 e 1957, baseado no fato observacional de que a cauda ionizada dos cometas tem uma direção radial ao Sol, independente da direção de seu movimento. 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).

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. Para investigar isso primeiramente foram enviadas as sondas soviéticas Lunik 2 e Lunik 3 em 1960, e a sonda Norte Americana Mariner 2 em 1962, que confirmaram as previsões de Parker. Desde então, várias sondas e espaçonaves fizeram experimentos e identificaram como segundo mais abundante componente, o íon $^4\text{He}^{++}$ - 5% -. Íons como $^3\text{He}^{++}$, $^4\text{He}^+$, O^{6+} , e C^{3+} também existem no Vento Solar, porem em menores quantidades – Parks, 1991 –.

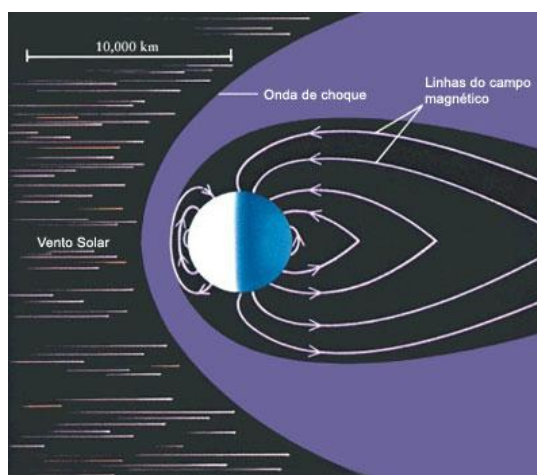


Figura 6: Esquema do choque das partículas provenientes do vento solar com a atmosfera da Terra. Reprodução: Observatório Astronômico Ufes.

2.3 O Campo Magnético do Sol e o Campo Magnético Interplanetário

O Sol possui um campo magnético de intensidade 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 - (Figura 7), e intensidade de aproximadamente 5 nT nas proximidades da Terra.



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

O CMI tem origem em regiões do Sol onde o campo magnético é "aberto", ou seja, onde as linhas de campo emergente de uma região não retornam a uma região conjugada e estendem por tempo indeterminado para o espaço. A direção (sentido polaridade) do campo no hemisfério norte do Sol é oposta à do campo no hemisfério sul. (As polaridades se invertem a cada ciclo solar).

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 e é representada na Figura 8.

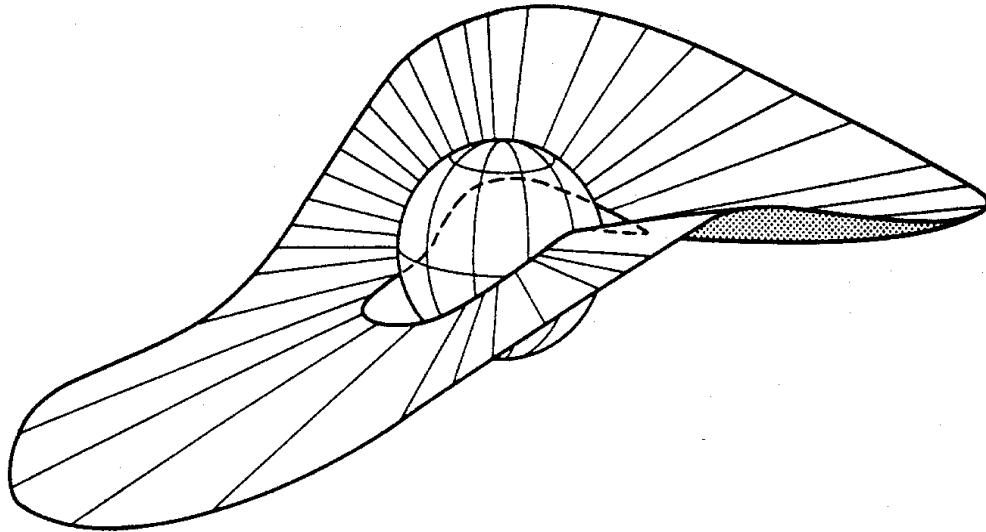


Figura 8: Lâmina de Corrente Heliosférica – LCH, próxima ao Sol.
Fonte: Burlaga et al. (1981a, p.8895).

Devido a rotação solar, o Campo Magnético Interplanetário tem 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

As manchas solares foram registradas primeiramente na China já no ano 28 a.C., mas seu estudo científico só começou com o uso do telescópio, por Galileo Galilei, no século XV. Desde então elas são observadas por muitos cientistas.

De tempos em tempos o número de manchas solares observados varia desde valores muito grandes até seu completo desaparecimento da superfície do Sol. Este período, denominado ciclo solar, tem duração aproximada de 11 anos e foi descoberto em 1843 pelo astrônomo amador alemão Samuel Heinrich Schwabe.

Basicamente, o ciclo é composto 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.

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.

Segundo o site da NASA <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>>, a previsão atual para o próximo máximo de manchas solares do ciclo 24 dá ao número máximo de manchas solares uma suavização de aproximadamente 59 em junho / julho de 2013. Estamos atualmente a dois anos no ciclo 24 e a intensidade desse máximo previsto continua a cair, como observado na Figura 9.

Previsões anteriores da NASA para o pico do ciclo 24:

- Outubro 2010: Previsão de pico 60-70
- 29 de Maio de 2009: pico previsto: 80-90 gama
- 05 de Janeiro de 2009: previu pico: 100-110 gama
- 28 de Março de 2008: previu pico: 130-140 gama

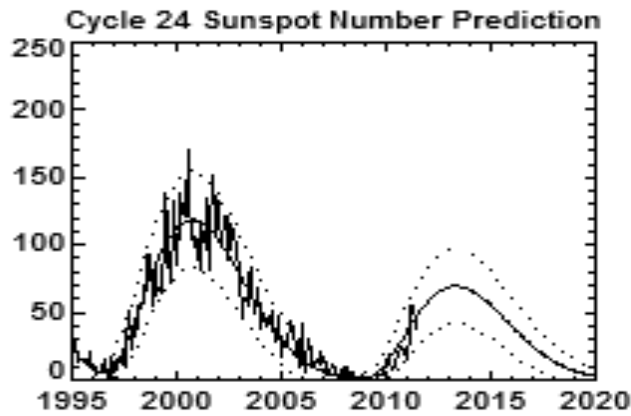


Figura 9: Previsão para o próximo máximo solar
Fonte: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml>>

A Figura 10 mostra o número de manchas solares a partir do ano de 1955.

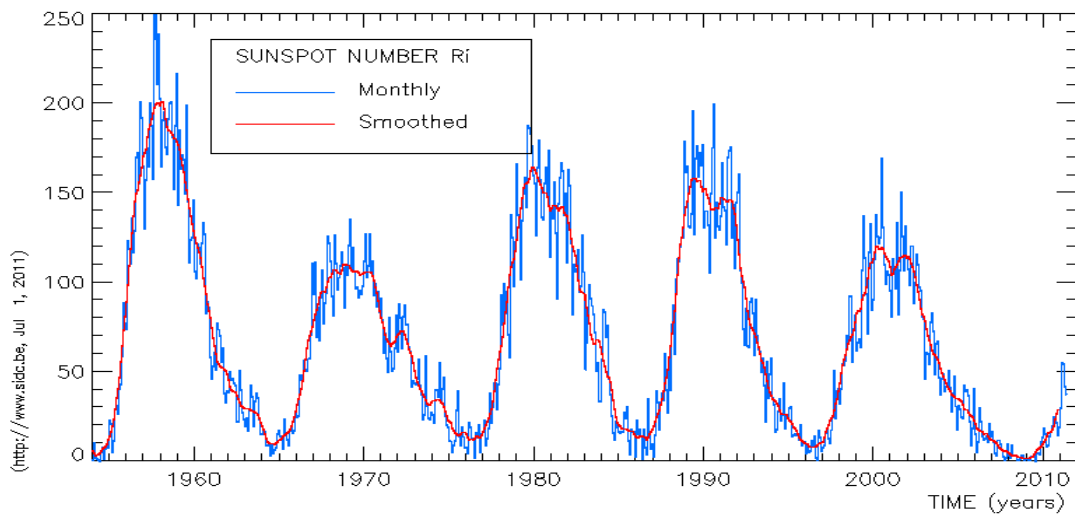


Figura 10: Gráficos mostrando o número de manchas solares a partir de 1955.
Fonte: (<http://www.sidc.be>, Jul,1,2011)

2.5 Estruturas Magnéticas no Meio Interplanetário

2.5.1 Regiões 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.

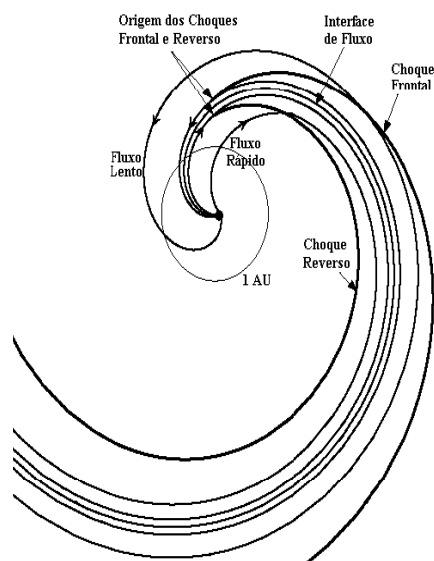


Figura 11: Representação esquemática de uma CIR.
Fonte: Modificado de (Crooker e Gosling, 1999).

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.

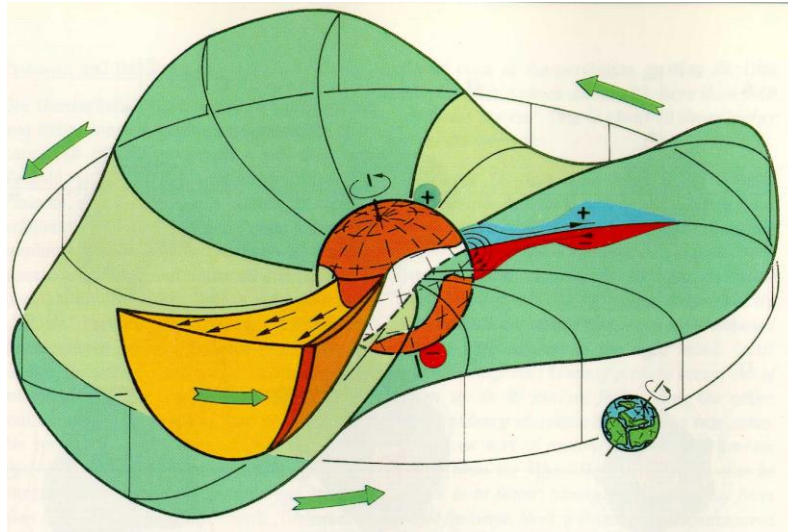


Figura 12: Visão da estrutura de setor interplanetária e da lâmina de corrente heliosférica.
Fonte: Rainer Schwenn comunicação pessoal.

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.

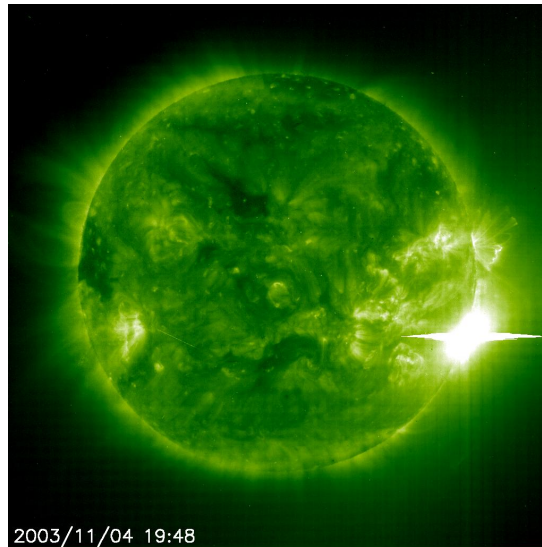


Figura 13: imagem de uma explosão solar.

Fonte: http://sohowww.nascom.nasa.gov/hotshots/2003_11_04/eit195.gif.

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).

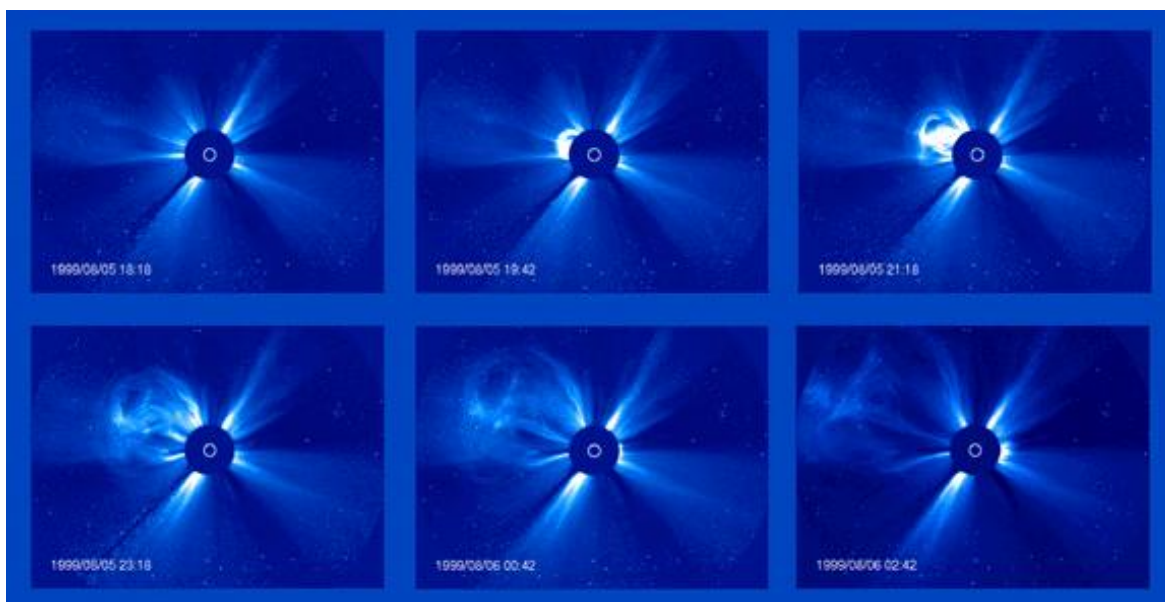


Figura 14: Sequência de imagens de coronógrafo mostrando uma CME, desde o momento da formação até o completo desprendimento da coroa solar. Fonte:

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/s² 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 β de plasma, que quando combinado com baixas temperaturas levam o parâmetro β 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° , 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.

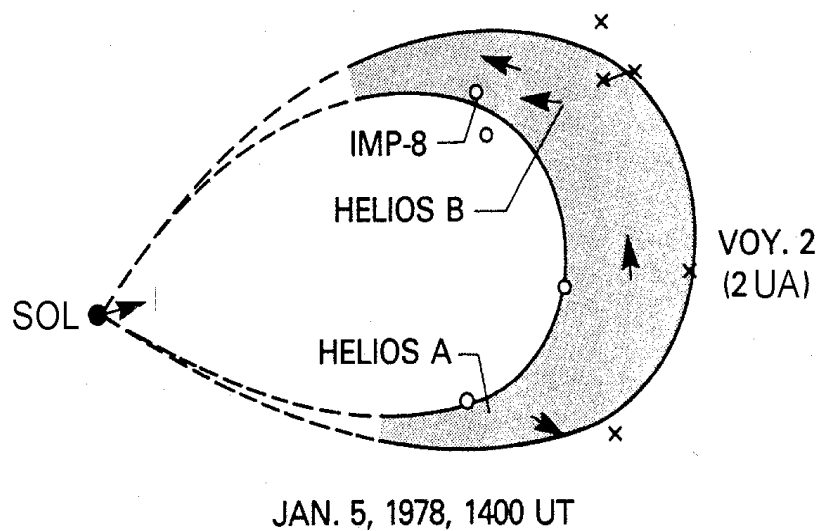


Figura 15: Geometria de uma nuvem magnética.
Fonte: Adaptado de Burlaga et al. (1990, p.376).

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 $Z = 100$.

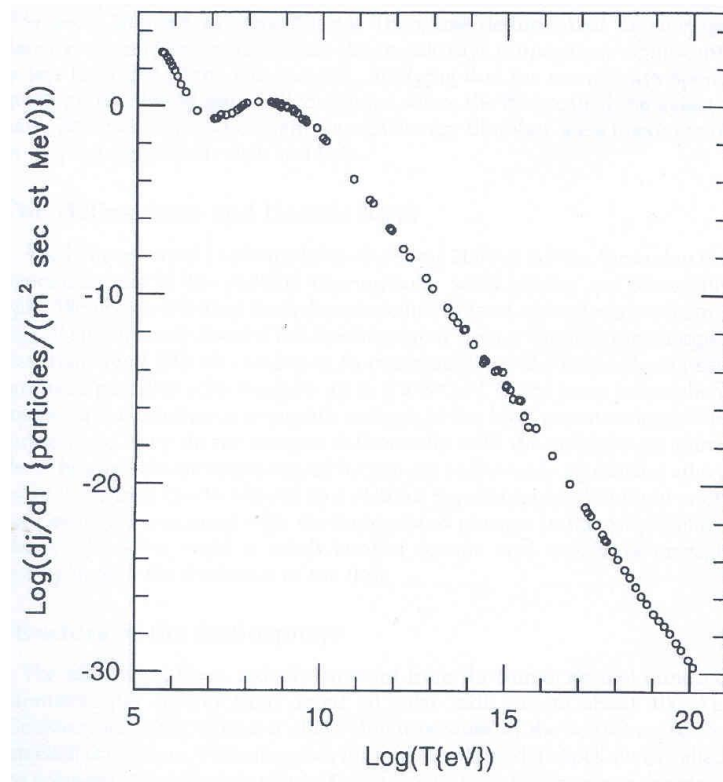


Figura 16: Intensidade dos raios cósmicos em função da energia.
Fonte: Jokipii (1998).

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 inter-estelar 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.

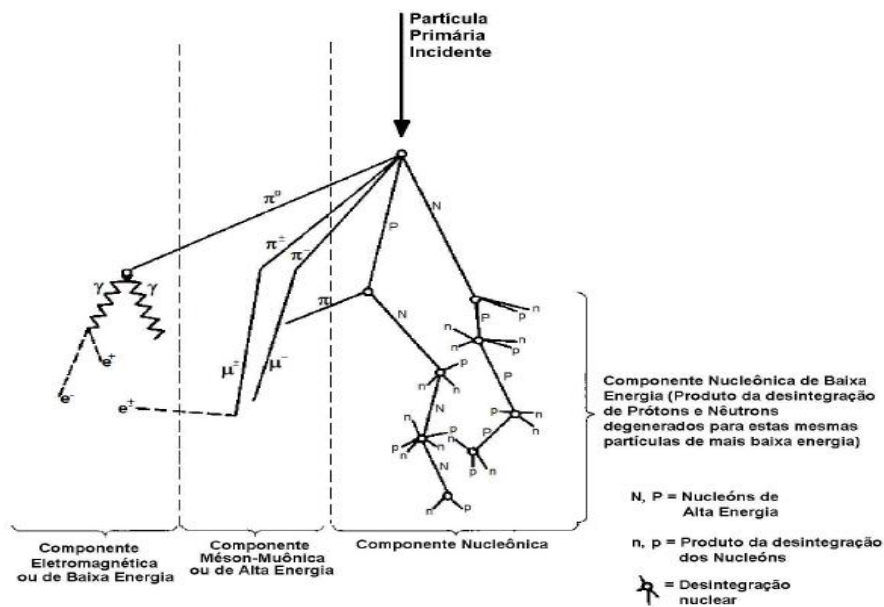


Figura 17: Diagrama esquemático de um chuva de raios cósmicos.
 Fonte: Modificado de Forbush (1993).

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 (Figura 18). Através disso é possível perceber quando uma nuvem magnética se aproxima da Terra e prever a ocorrência de uma tempestade geomagnética.

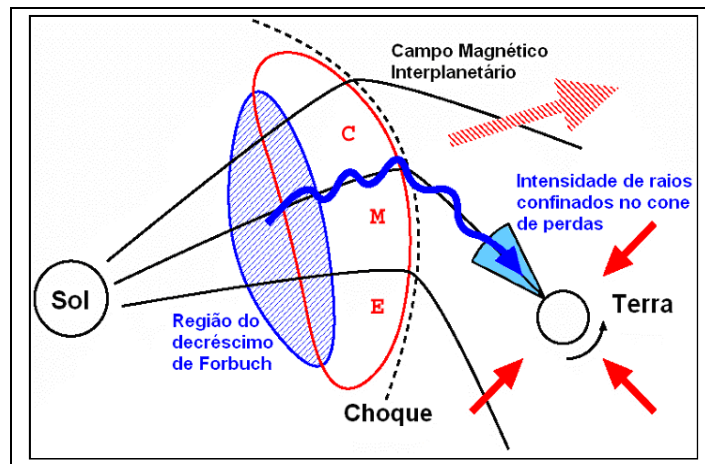


Figura 18: Ilustração do bloqueio de raios cósmicos por uma CME.
Fonte: Adaptado de Nagashima et al. (1992) e Ruffolo et al. (1999).

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.

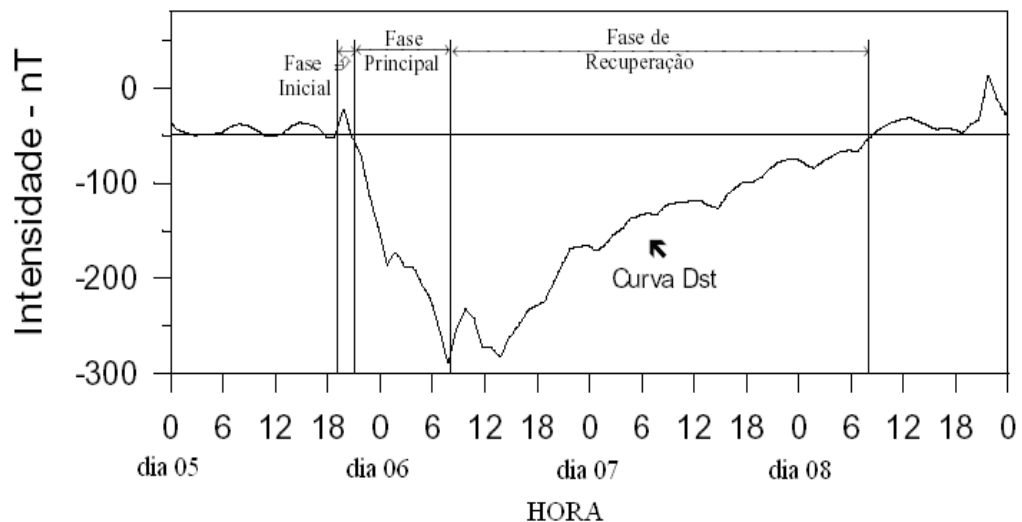


Figura 19: Curva Dst entre os dias 5–8 de setembro de 1982
Fonte: Adaptada de Yamashita (1999)

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 polos (Figura 20).



Figura 20: Aurora formada após uma tempestade geomagnética.

Fonte: http://sohowww.nascom.nasa.gov/spaceweather/lenticular/AUR_coron_curtis.jpg

Todas as estruturas citadas acima podem causar ou ter 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.

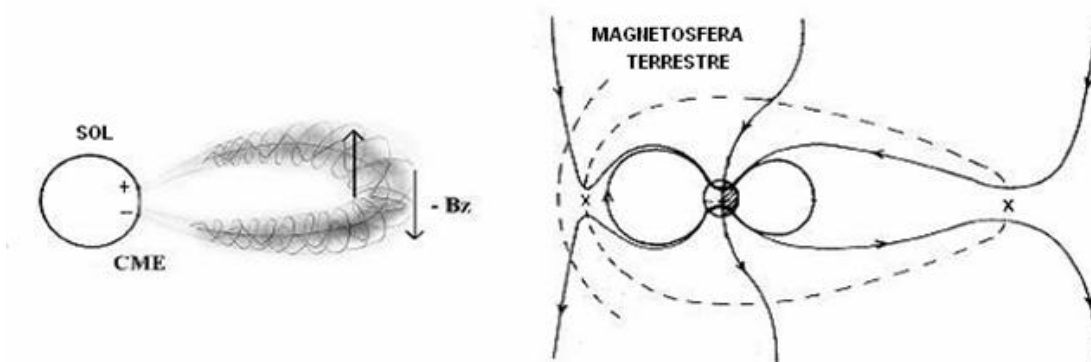


Figura 21: Ilustração da interação entre uma nuvem magnética, oriunda de uma ICME, com a magnetosfera terrestre. Fonte: Adaptado de Tsurutani e Gonzalez et al. (1997).

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://swdcd.db.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.

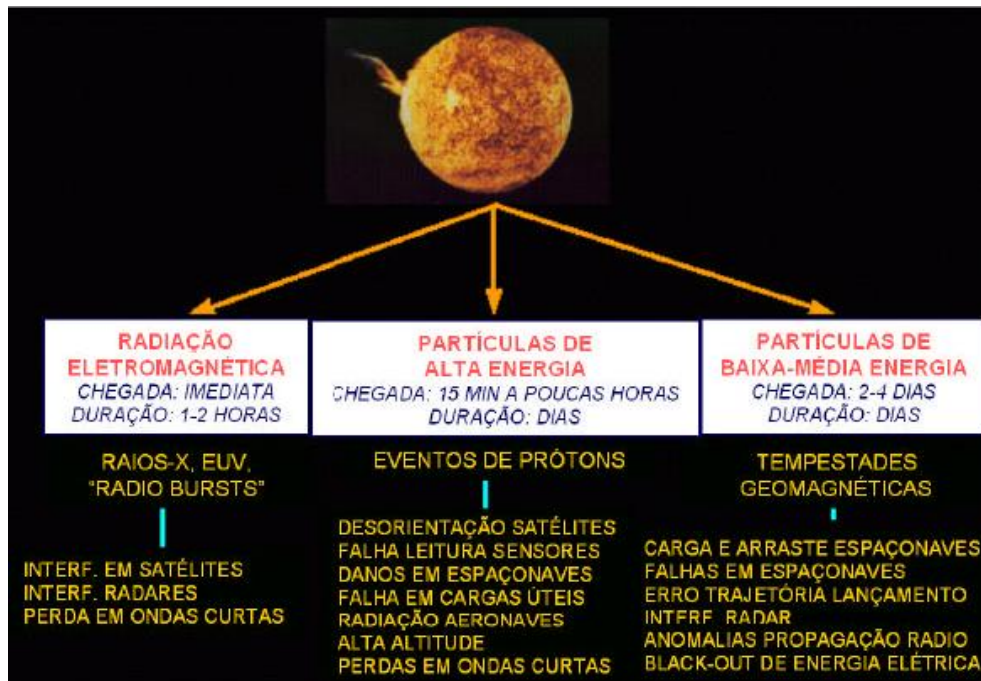


Figura 22: Fenômenos que afetam o Clima Espacial, energias envolvidas, tempo de duração de seus efeitos e principais tipos de danos em sistemas tecnológicos. Fonte: Schwenn (comunicação pessoal), (apud Dal Lago, 2003).

3 CAPÍTULO: METODOLOGIA

No Capítulo será 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 ultima parte do capitulo é explicado de forma sucinta, o Detector Multidirecional de Muons – DMM e o 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.

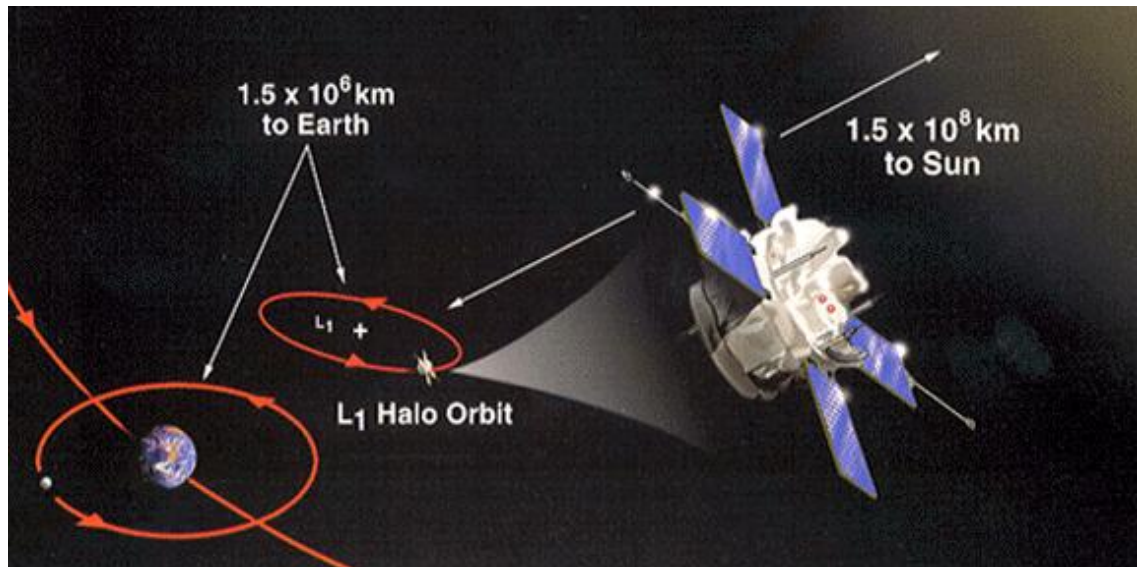


Figura 23: Ilustração representativa da órbita do satélite ACE, o ponto Lagrangeano L1, a distância do L1 em relação à Terra e ao Sol.

Fonte: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html

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*)

- SWEPPAM (*Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor*)
- MAG (*Magnetometer*)
- RTSW (*Real Time Solar Wind*)

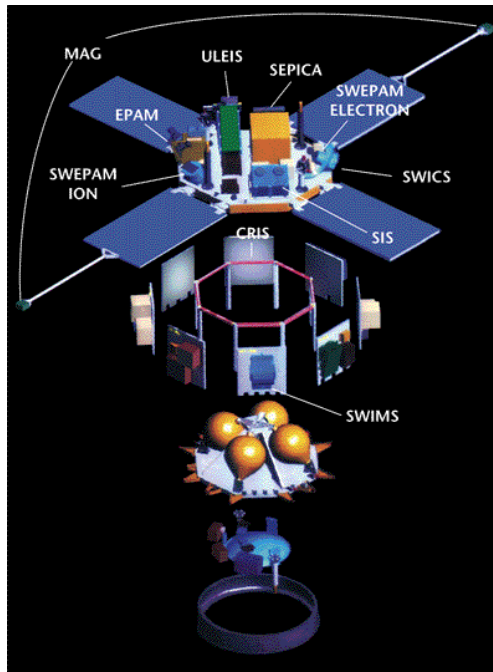


Figura 24: Ilustração da disposição dos instrumentos a bordo do ACE.
Fonte: http://www.srl.caltech.edu/ACE/ace_mission.html

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

O SWEPPAM 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 SWEPPAM 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

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.

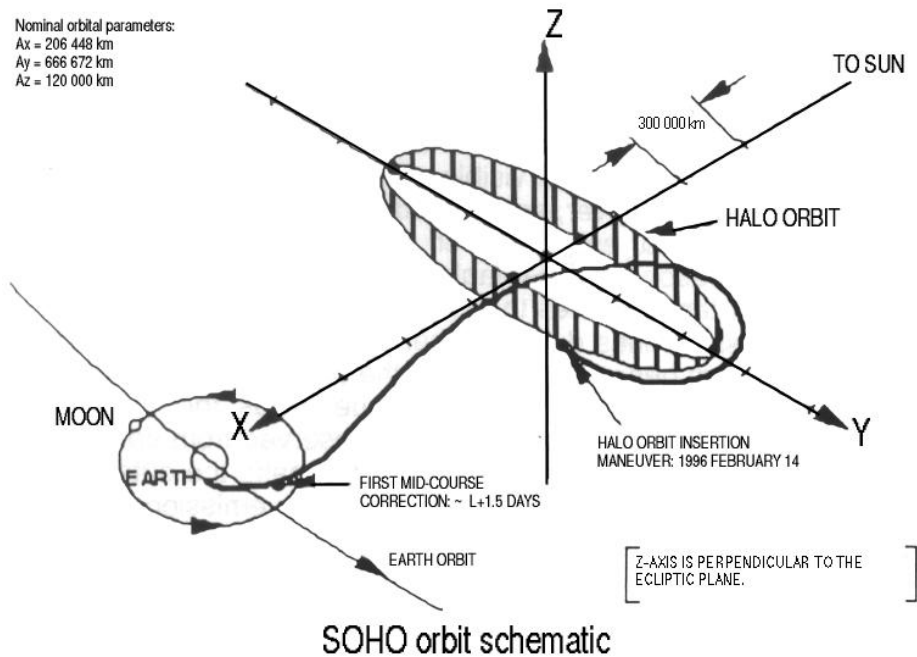


Figura 26: Esquema da órbita do Satélite SOHO.

Fonte: http://sohowww.nascom.nasa.gov/about/images/halo_orbit.gif

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.

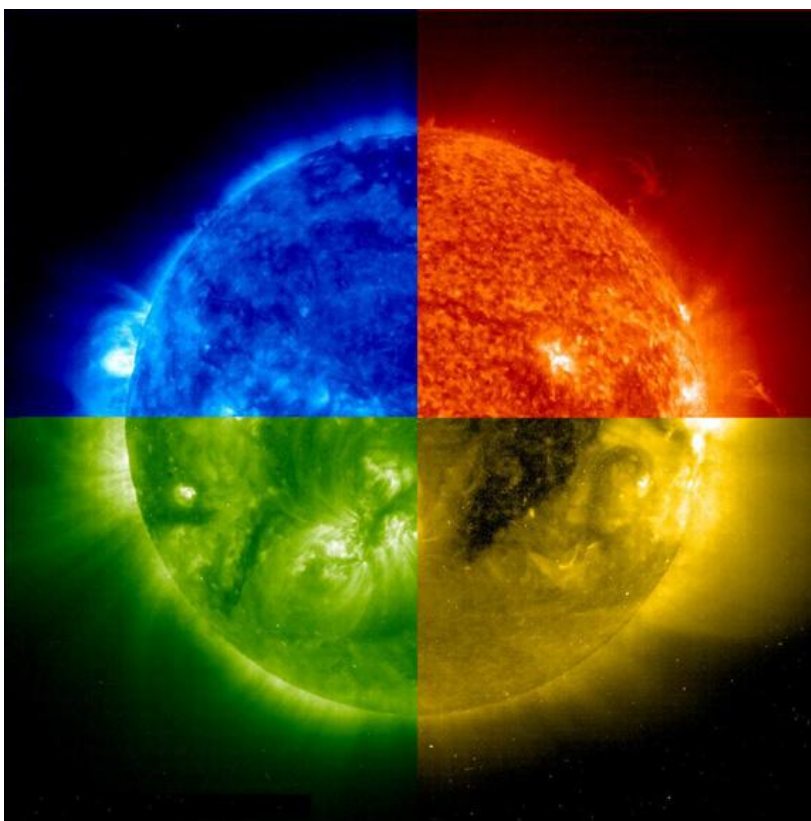


Figura 27: O Sol dividido em quatro quadrantes, onde cada quadrante corresponde a um comprimento de onda distinto.

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.

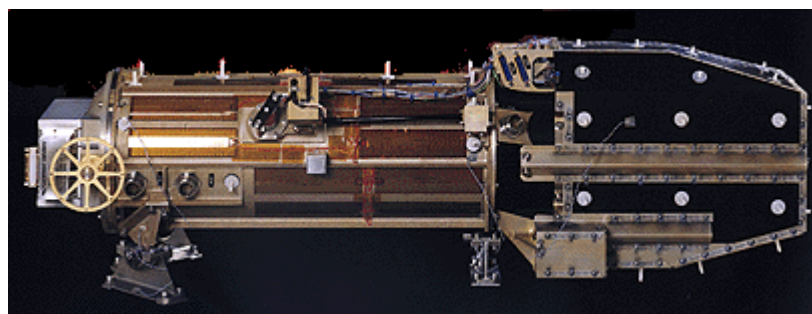


Figura 28: Imagem do telescópio EIT.

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 Multidirecional De Muons

Um Detector Multidirecional 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 telescópios, ou Rede Global de DMMs, (*Global Muon Detector Network (GMDN)*), constituída por seis telescópios, 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 telescópio.

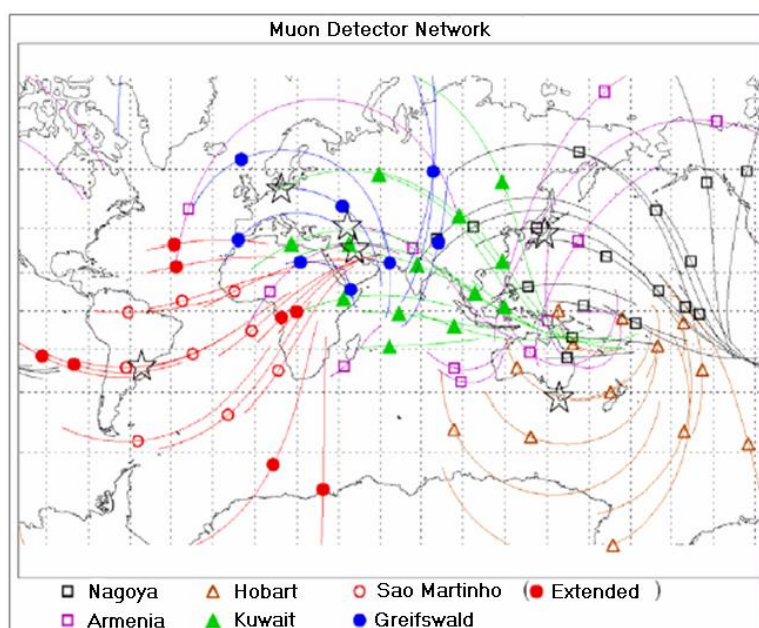


Figura 29: Diagrama mostrando a área de cobertura da rede de DMMs, mostrando as visões assintóticas de cada detector. Fonte: Munakata et al. (2004).

Os raios cósmicos de alta energia (muons) estão sujeitos a modulações consequentes 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.

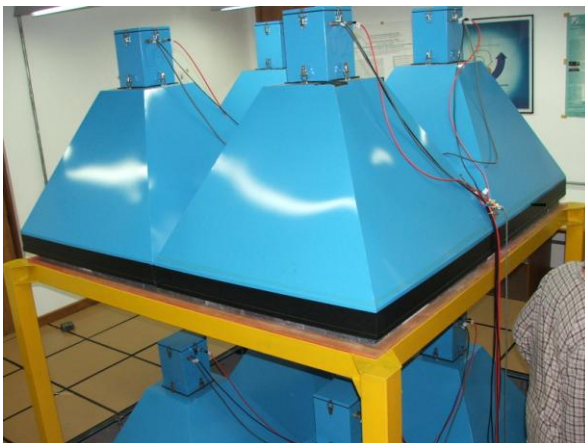


Figura 30: Foto do protótipo do DMM instalado no OES em 2001.



Figura 31: Foto do DMM Expandido 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 telescópio, alguns fótons são emitidos e detectados por uma fotomultiplicadora que está acoplada em cada telescópio e um muon é detectado através do registro de uma corrente elétrica. Quando é

registrada a passagem de uma partícula pelo detector na camada de cima e na de baixo ao mesmo tempo (tendo em vista que os muons se deslocam com velocidades muito altas) o computador conta como um muon, a Figura 32 mostra um esquema do DMM. Os muons que são detectados 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.

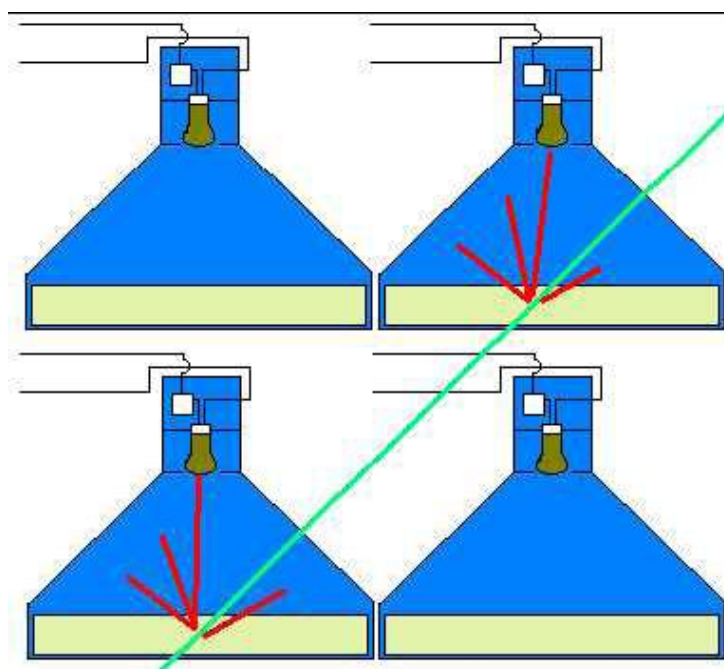


Figura 32: Esquema do método de contagem do TCM.
Fonte: DA SILVA, 2005 pg. 68.

Os detectores direcionais 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.

No Projeto foram usados dados do DMM 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 apenas dos dados do satélite ACE.

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 cm^{-3} , k é a constante de Boltzmann $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 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 μ_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. Foram 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 TDM, que é realizada através da seguinte equação.

$$C = \frac{C_{\text{contagem}}}{\text{méd.}}$$

Onde a “contagem” significa a contagem de determinada amostra (em geral a contagem horária de muons em determinada direção) e “média” significa a média da contagem horária. Para calcular-se a média toma-se um período de tempo muito maior que o período de análise (geralmente o período de um mês ou um ano).

4.1 Variação na Contagem de Muons em Dezembro de 2006

No período de dezembro de 2006 ocorreu uma tempestade geomagnética cujo pico do índice DST foi de – 146 nT no dia 15 de dezembro. A possível causa da tempestade geomagnética foi a passagem de uma ICME.

Os gráficos feitos com as contagens relativas do DMM para o mesmo período, são apresentados na Figura 33, onde as linhas vermelhas indicam a passagem da estrutura pela Terra, que causou um decréscimo na contagem dos muons nas direções vertical (V), norte 30° (N), sul 30° (S), leste 30° (E) e oeste 30° (W). O decréscimo ocorrido antes da passagem da ICME é pode estar associado à onda de choque que precedeu a estrutura.

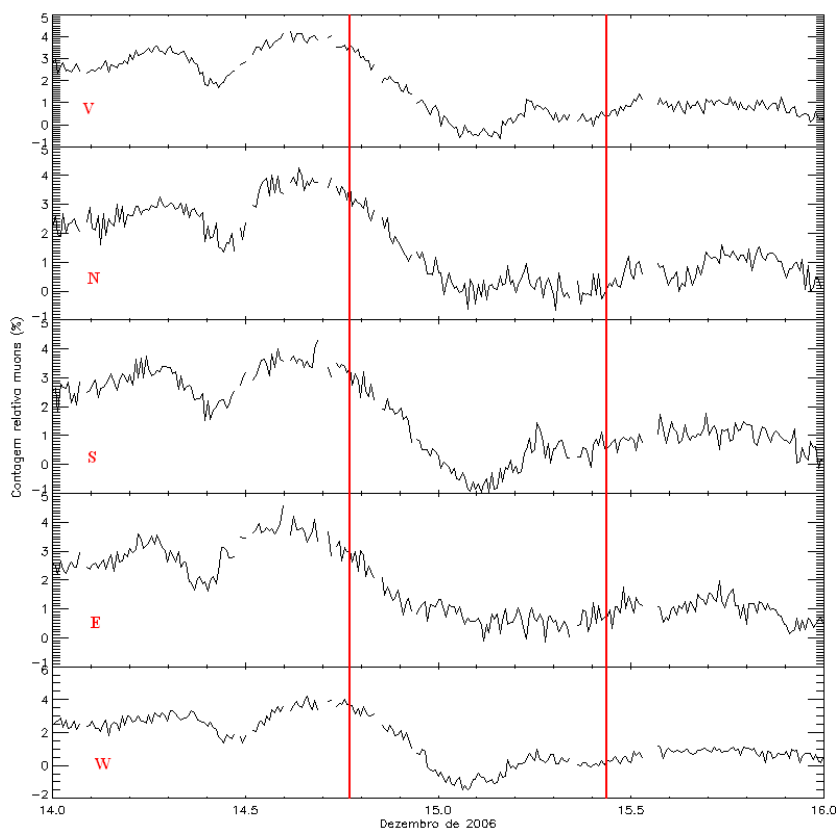


Figura 33: Contagem relativa de muons nas direções vertical (V), norte 30° (N), sul 30° (S), leste 30° (E) e oeste 30° (W), mostrando o decréscimo de Fourbush relacionado a uma tempestade geomagnética.

4.2 Análise de Dados do Meio Interplanetário

4.2.1 Evento de Abril de 2000

Entre os dias 96 e 100 de 2000 que correspondem respectivamente a 05 e 09 de abril do mesmo ano, houve uma variação nos parâmetros interplanetários, indicando a passagem de uma estrutura interplanetária pelo satélite ACE. Na Figura 34 são apresentados alguns gráficos de dados interplanetários. De cima para baixo, na Figura, temos o módulo do campo magnético $|B|$ (em nT), a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM B_z (em nT),

a pressão cinética P_k , pressão magnética (P_b) e o parâmetro beta do vento solar.

Há uma brusca alteração de todos os parâmetros interplanetário indicando a passagem da onda de choque, entretanto não foi observada a estrutura que ocasionou esse evento.

Durante a fase do choque, $|B|$ teve um repentino aumento de seus valores, de ~ 10 nT para ~ 35 nT. Durante a passagem da estrutura, B_z possui sentido oposto ao do campo geomagnético na região após a onda de choque. Ao fim desta região, B_z oscilou entre valores positivos e negativos.

Há um súbito aumento da pressão cinética 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, devido ao aumento da intensidade do campo magnético.

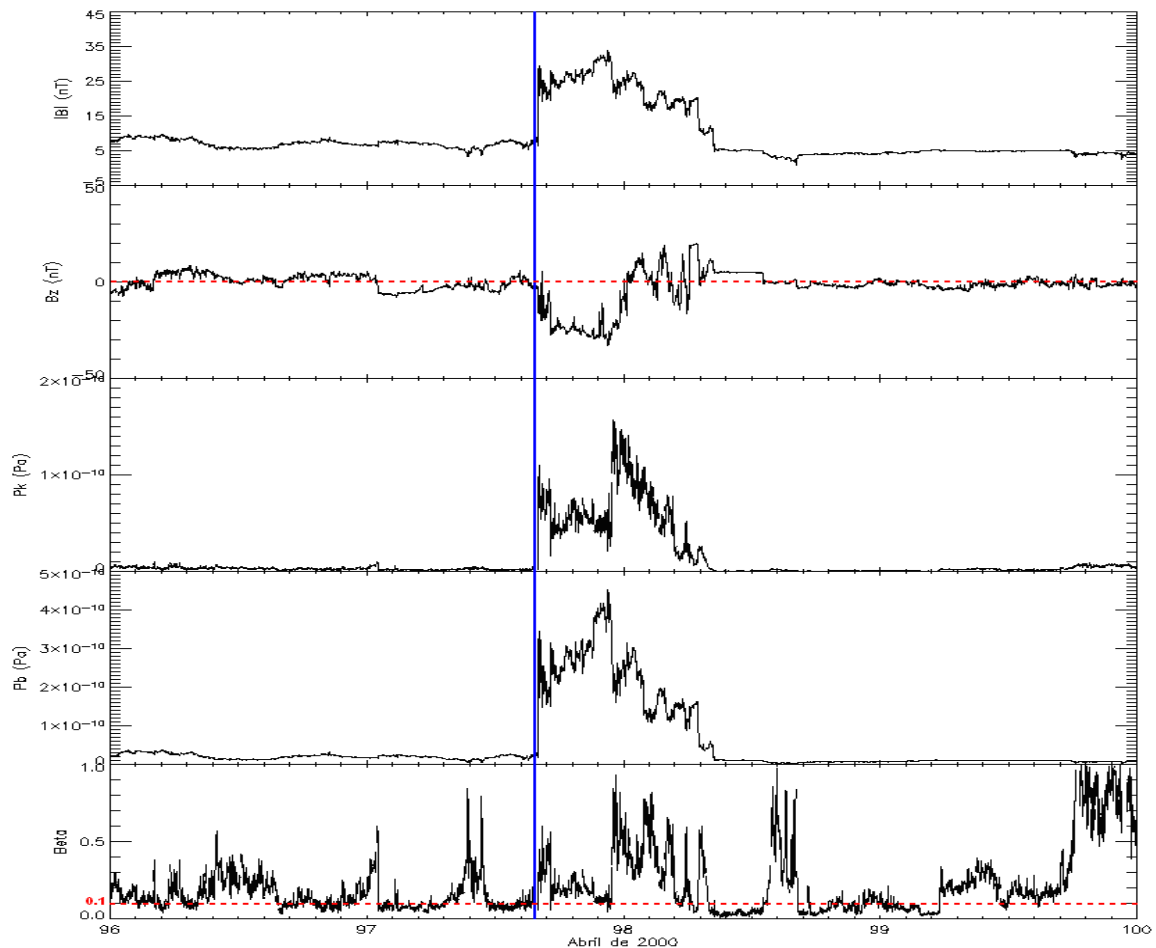


Figura 34: Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de abril de 2000. De cima para baixo: Módulo ($|B|$) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM (B_z), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE.

Outros parâmetros para o vento solar são mostrados na Figura 35. De cima para baixo: densidade N (em cm^{-3}), velocidade V_p (em Km/s) e a temperatura do vento solar T (em kelvin) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM (em nT).

A velocidade do vento solar passou de ~ 400 km/s para valores próximos a 600 km/s durante a passagem da onda de choque, permanecendo constante após a passagem da estrutura. As coordenadas B_x e B_y sofrem uma grande variação durante a passagem da onda de choque.

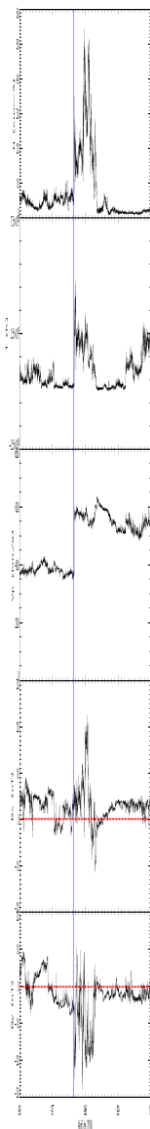


Figura 35: De cima para baixo: Densidade (N), velocidade (V_p) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE.

O fato de o campo geomagnético ter sido intensificado com a passagem da onda de choque e B_z ter sentido contrário durante a passagem da onda de choque são os prováveis

motivos de se ter ocorrido essa tempestade geomagnética, classificada como tempestade super-intensa, com pico do Dst = -288 nT no dia 7 de abril. (Fonte: http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200004.html).

4.2.2 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 uma variação nos parâmetros interplanetários, indicando a passagem de uma estrutura interplanetária pelo satélite ACE. Na Figura 36 são apresentados alguns gráficos de dados interplanetários. De cima para baixo, na Figura, temos o módulo do campo magnético $|B|$ (em nT), a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM B_z (em nT), 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 repentino, aumento de valores de ~ 10 nT para valores próximos a 25 nT e no início da estrutura $|B|$ chegou a aproximadamente 35 nT.

No instante em que ocorre a passagem da onda de choque, B_z tem o mesmo sentido do campo geomagnético (sentido norte) e ao final da região que segue o choque (sheat) B_z está no sentido sul. A estrutura tem B_z no sentido contrário ao do campo geomagnético, com valores de ~ -30 nT, e passa a rotacionar suavemente de sul para norte, durante um período que dura mais de 20 horas.

Há um súbito aumento da pressão cinética 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, devido ao aumento da intensidade do campo magnético. Dentro da estrutura a pressão cinética diminui, devido à diminuição da temperatura, embora a densidade de partículas ainda apresente valores elevados.

O parâmetro beta possui valores entre 0 e 0,1 mostrando que a pressão magnética é no

mínimo 10 vezes maior que a pressão cinética, indicando que as propriedades magnéticas são dominantes nesta região e portanto, trata-se de uma nuvem magnética. Na região que precede a nuvem os valores de beta são maiores, devido à elevação da pressão cinética.

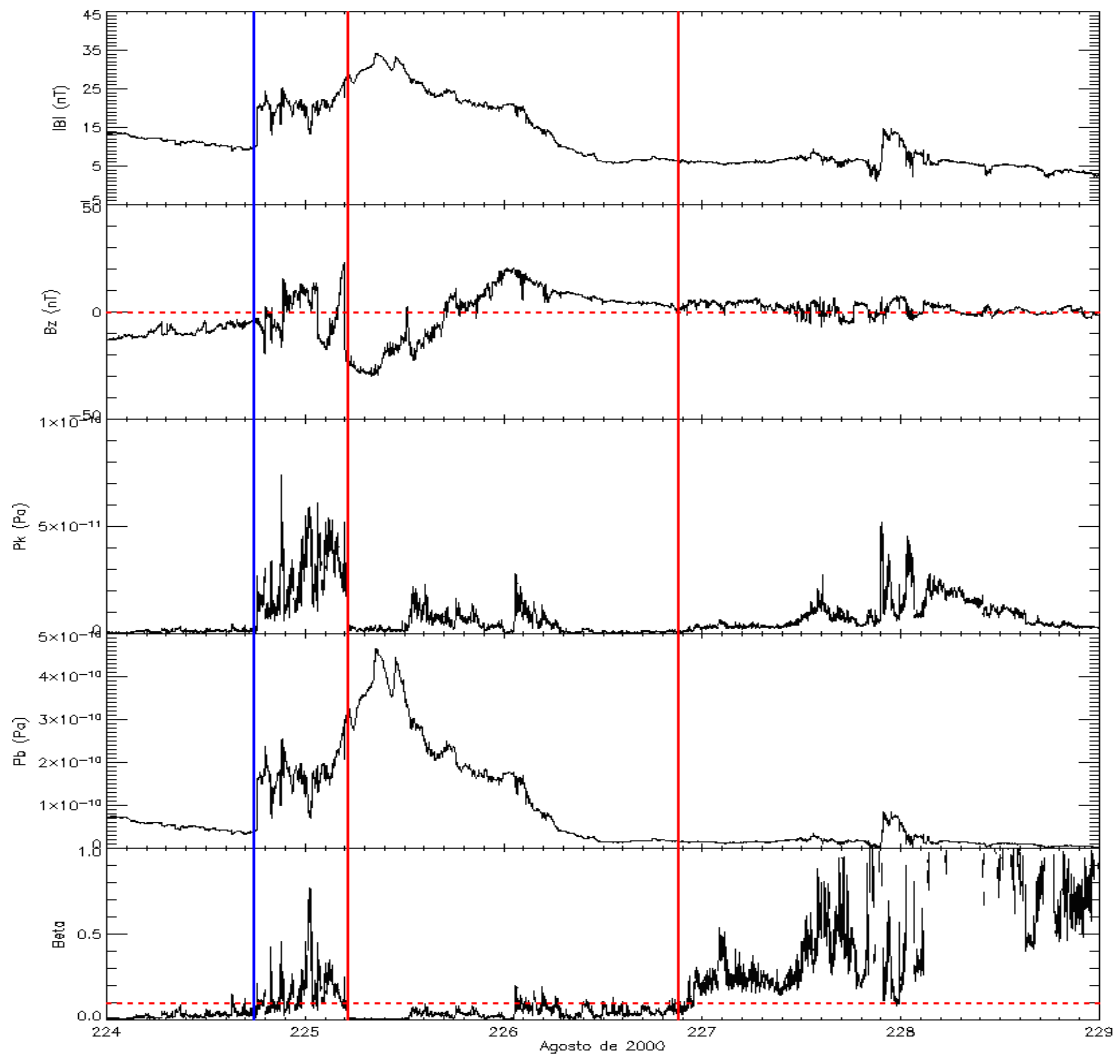


Figura 36: Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de agosto de 2000. De cima para baixo: Módulo ($|B|$) e a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM (B_z), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

Outros parâmetros para a nuvem magnética são mostrados na Figura 37. De cima para baixo: densidade N (em cm^{-3}), velocidade V_p (em Km/s) e a temperatura do vento solar T (em kelvin) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM (em nT).

O valor do módulo da velocidade do vento solar teve um salto no momento da passagem da onda de choque de $\sim 450 \text{ km/s}$ para 500 km/s e depois passou para valores acima de 600 km/s .

As componentes B_x e B_y passam por uma grande variação durante a passagem da onda de choque e durante a passagem da nuvem magnética.

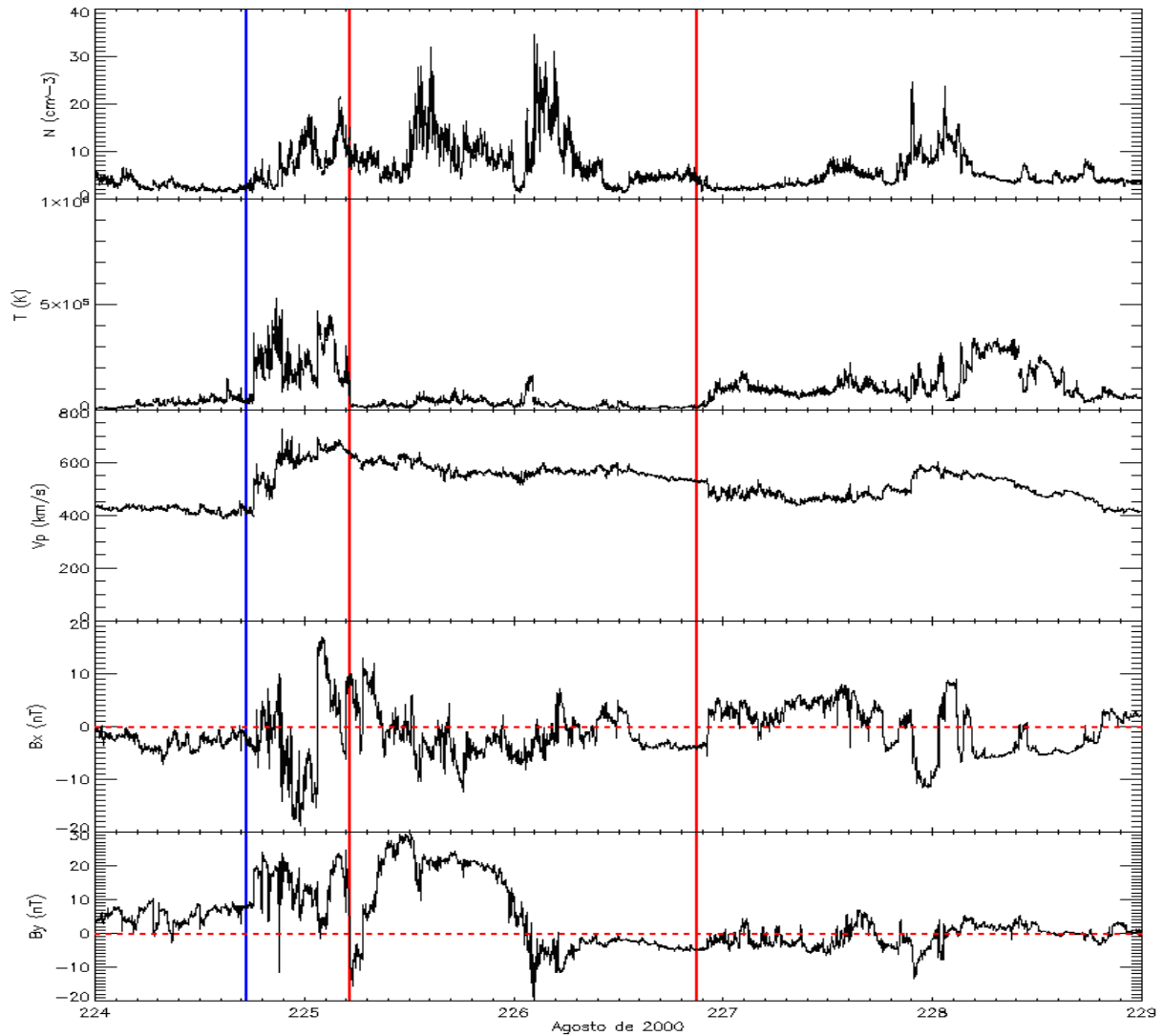


Figura 37: Densidade (N), velocidade (V_p) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

Uma nuvem magnética é a provável responsável pela tempestade geomagnética, pois a coordenada z do campo magnético é direcionada para o sul e os valores do parâmetro beta ficaram abaixo de 0,1. 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 pode ser classificada como superintensa, pois atingiu o pico de $Dst = - 235$ nT no dia 12 (Fonte: http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200008.html).

4.2.3 Evento de Março/Abril de 2001

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 indicando a passagem de uma onda de choque. A estrutura que possivelmente a origina, foi classificada como uma ICME. Na Figura 38 são apresentados alguns gráficos de dados interplanetários. De cima para baixo, na Figura, temos o módulo do campo magnético $|B|$ (em nT), a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM B_z (em nT), 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 $|B|$ teve 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 sofre várias flutuações.

Houve um considerável aumento da pressão cinética durante a passagem da onda de choque devido à compressão do plasma. No interior da estrutura, a pressão cinética

oscila entre valores altos, se comparado com a pressão no vento solar antes da onda de choque.

A pressão magnética teve um grande aumento durante a passagem do choque. Dentro da estrutura a pressão começa a cair, porém os valores ainda são elevados se comparados com a pressão magnética no vento solar normal.

Para o parâmetro beta há muita oscilação, tanto na passagem do choque, quanto dentro da estrutura.

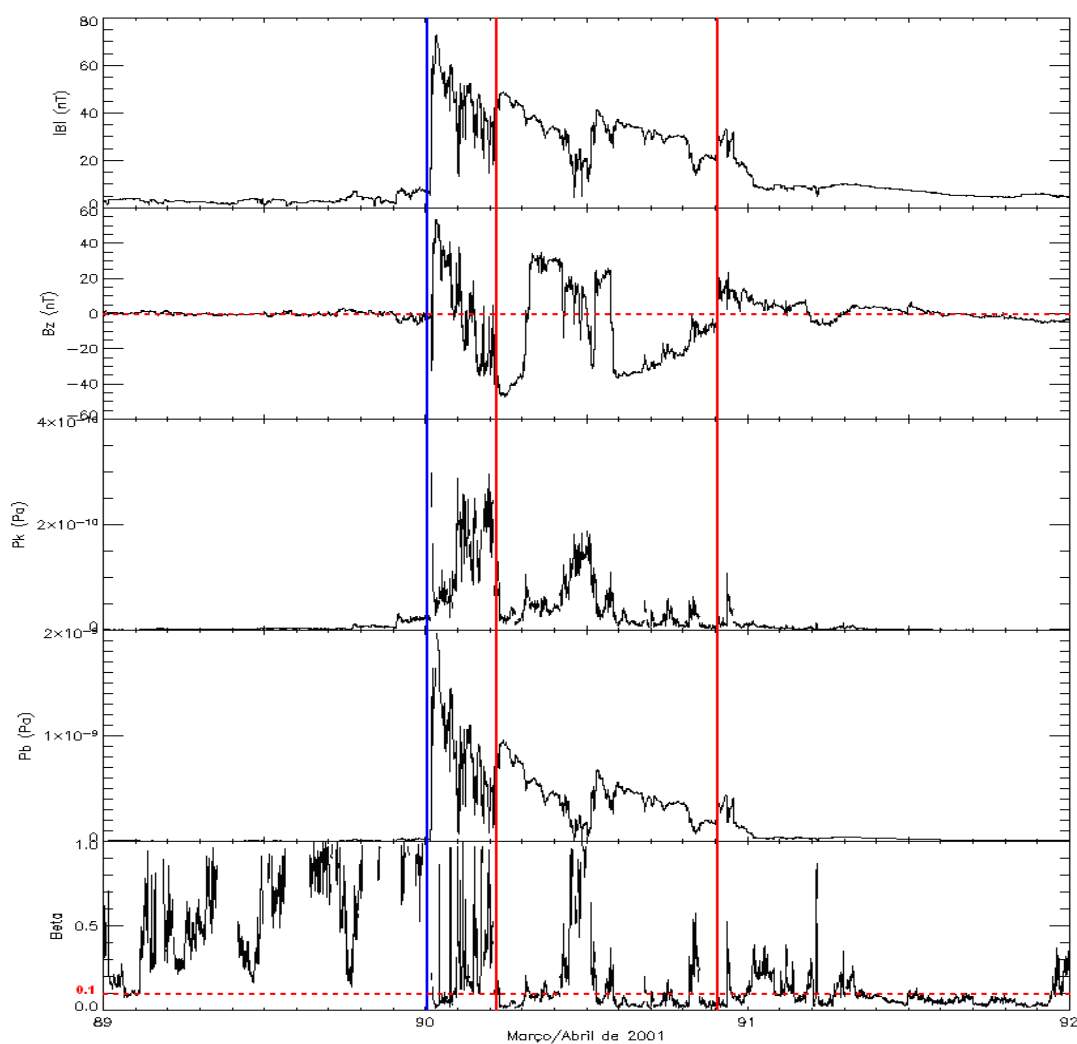


Figura 38: Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de março/abril de 2001. De cima para baixo: Módulo ($|B|$) e a componente z do campo magnético interplanetário no sistema GSM (B_z), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da ICME.

Outros parâmetros são mostrados na Figura 39. De cima para baixo: densidade N (em cm^{-3}), velocidade V_p (em Km/s) e a temperatura do vento solar T (em kelvin) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM (em nT).

Durante a onda de choque, a velocidade do vento solar teve um grande aumento, até perto dos 700 km/s . Durante a passagem da ICME, a velocidade tem uma diminuição considerável, mas após a passagem da estrutura, a velocidade aumenta de novo, atingindo valores próximos a 800 km/s .

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

A configuração de B_z na onda de choque e na estrutura, mostram que possivelmente a tempestade geomagnética tenha sido causada por uma ICME.

O índice Dst teve pico de -387 nT no dia 31 de março, sendo assim considerada uma tempestade super-intensa.

(Fonte:http://swdcwww.kugi.kyotou.ac.jp/dst_final/f/dstfinal200103.html).

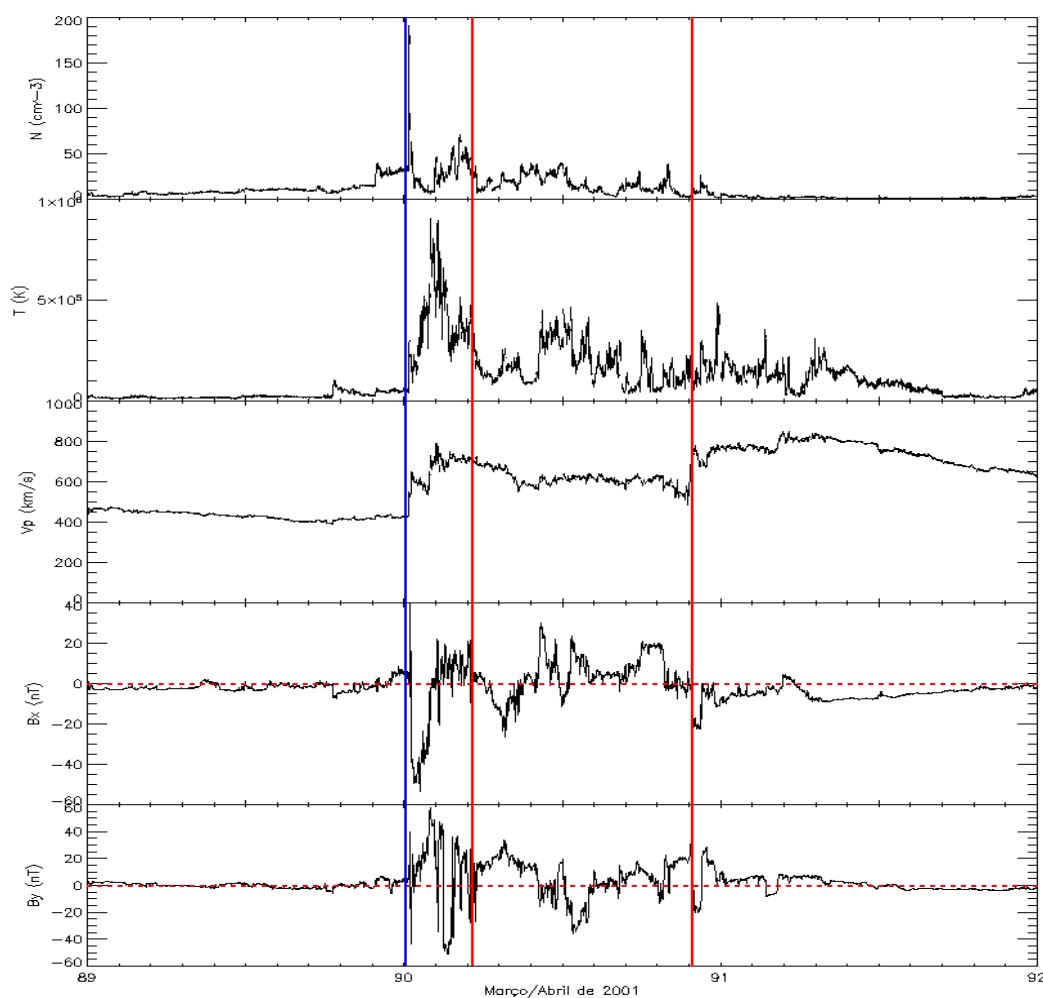


Figura 39: Densidade (N), velocidade (V_p) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da ICME.

4.2.4 Evento de Abril de 2001

O período entre os dias 101 e 104 de 2001, correspondentes a 11 e 15 de abril, foi caracterizado por um salto abrupto de todos os parâmetros interplanetários, indicando a passagem de uma onda de choque e uma estrutura que possivelmente foi classificada como

nuvem magnética. Na Figura 40, são apresentados alguns gráficos de dados interplanetários. De cima para baixo, temos o módulo do campo magnético $|B|$ (em nT), a coordenada z do campo magnético interplanetário no sistema GSM Bz (em nT), 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 ($|B|$) teve um aumento de 5 nT para aproximadamente 10 nT e após a onda de choque ele foi para aproximadamente 40 nT. No interior da estrutura, $|B|$ tem o valor máximo próximo dos 30 nT. A componente Bz passa por grandes oscilações nas regiões dos choques e da bainha sendo que no interior da estrutura, $B_z \sim -32$ nT passando por uma rotação de sul para norte.

No instante em que ocorre a 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, que caracteriza 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 tem um aumento durante a passagem da onda de choque, porque há um aumento da intensidade do campo magnético, permanecendo assim durante a passagem da nuvem pelo satélite observador.

O valor do parâmetro beta obtido no interior da estrutura, quase sempre está abaixo de 0,1, sendo as propriedades magnéticas 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 e a coordenada z do campo magnético ser direcionada para o sul sugerem que essa estrutura pode ser classificada como uma nuvem magnética.

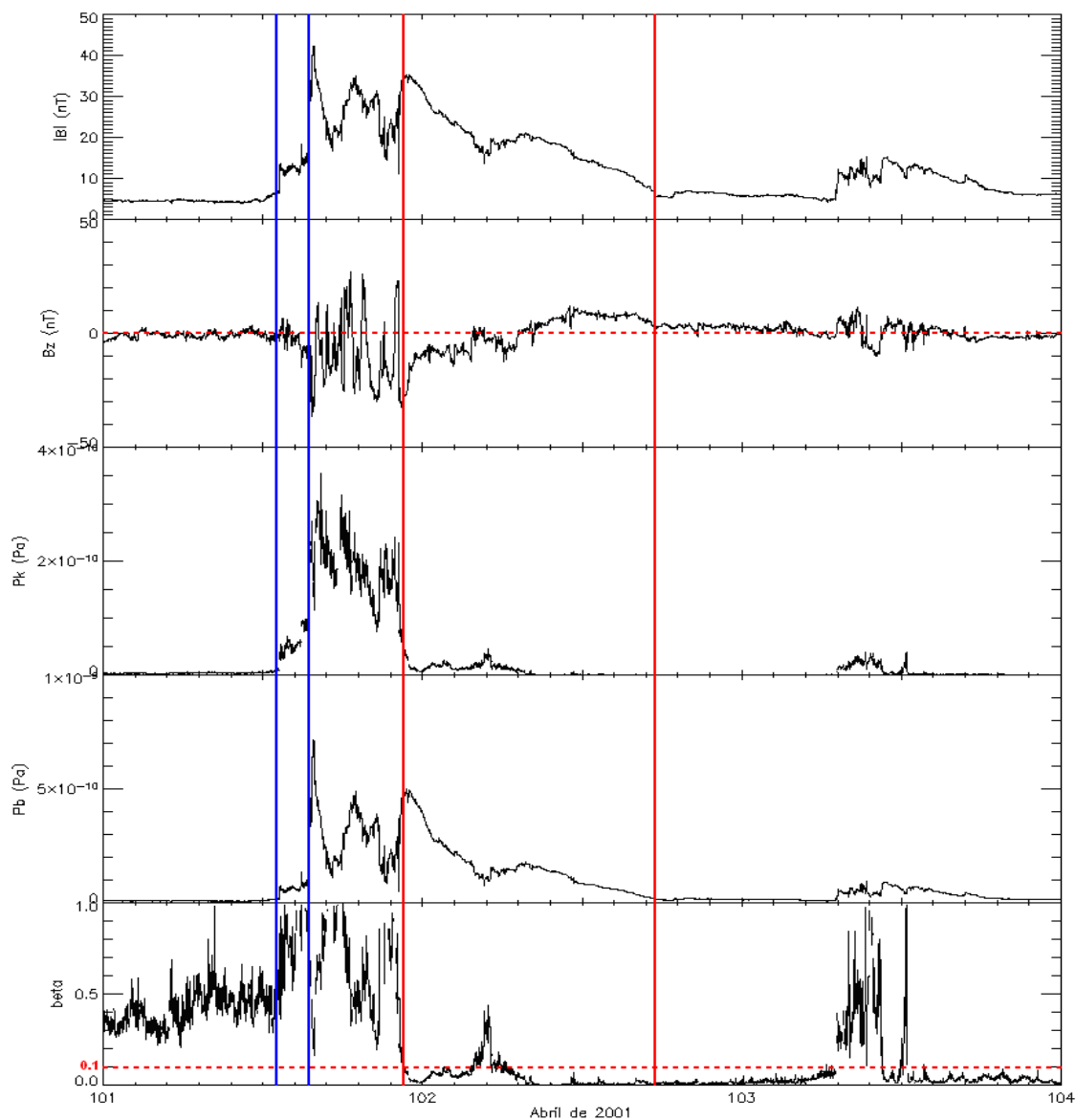


Figura 40: Painel mostrando gráficos de dados do meio interplanetário de abril de 2001. De cima para baixo: Módulo ($|B|$) e a componente z do campo magnético interplanetário no sistema GSM (B_z), a pressão cinética, pressão magnética e o parâmetro beta do vento solar. Linha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

Outros parâmetros para a possível nuvem magnética são mostrados na Figura 41.

De cima para baixo: densidade N (em cm^{-3}), velocidade V_p (em Km/s) e a temperatura do vento solar T (em kelvin) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM (em nT).

A velocidade do vento solar teve um grande aumento no momento da passagem da onda de choque, de $\sim 500 \text{ km/s}$ para 700 km/s , mantendo-se constante no interior da estrutura.

As componentes B_x e B_y 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 alguma variação considerável no índice Dst.

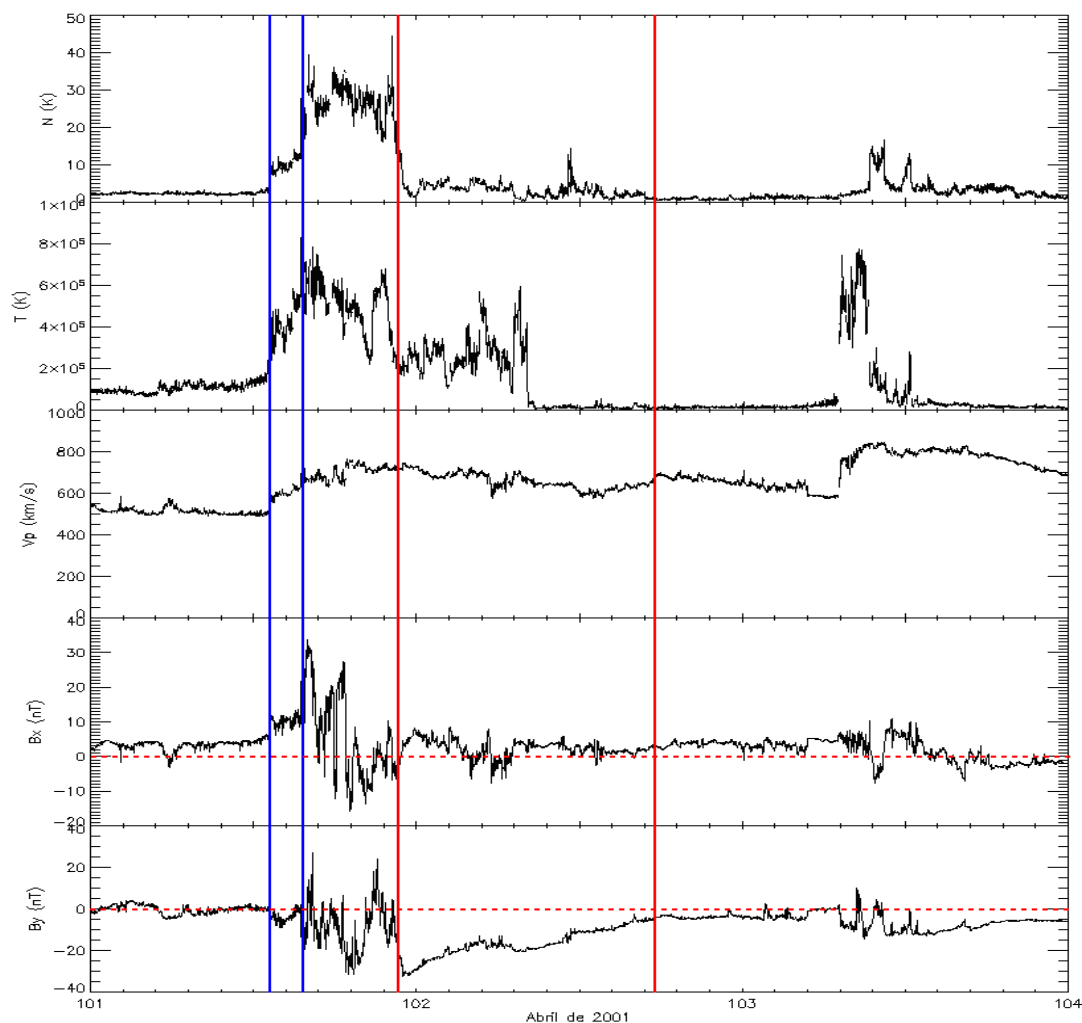


Figura 41: Densidade (N), velocidade (Vp) e a temperatura do vento solar (T) e as componentes x e y do campo magnético interplanetário no sistema GSM. Alinha azul indica o momento da passagem da onda de choque pelo satélite ACE e as linhas vermelhas (cheias) indicam o início e o final da nuvem magnética.

A nuvem magnética provavelmente é a responsável pela tempestade geomagnética.

As ondas de choque também contribuíram para a formação da tempestade, que foi classificada como super tempestade, atingindo o valor $Dst = -271$ nT.

(Fonte: 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 ideia 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 42) 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 42).

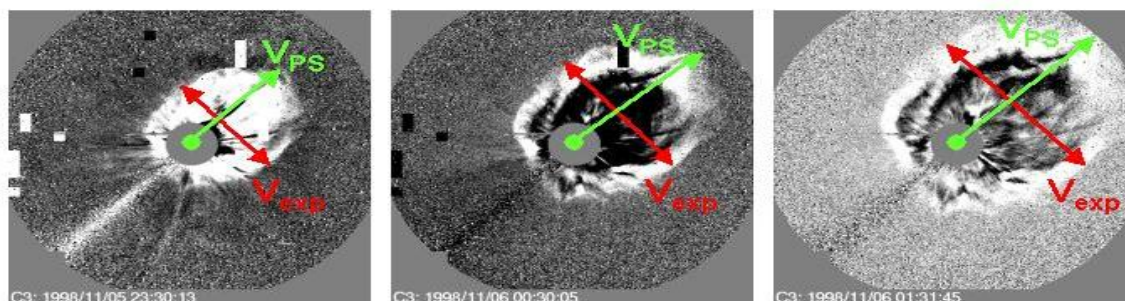


Figura 42: CME halo de 5 de novembro de 1998, ilustração da velocidade de expansão V_{exp} e velocidade no plano do céu V_{ps} . Imagens obtidas pelo coronógrafo LASCO C3.
 FONTE: Adaptado de Schwenn et al. 2005.

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 das velocidades V_{ps} e V_{exp} . Na Figura 43 é mostrada uma sequência de imagens obtidas pelo LASCO C2.

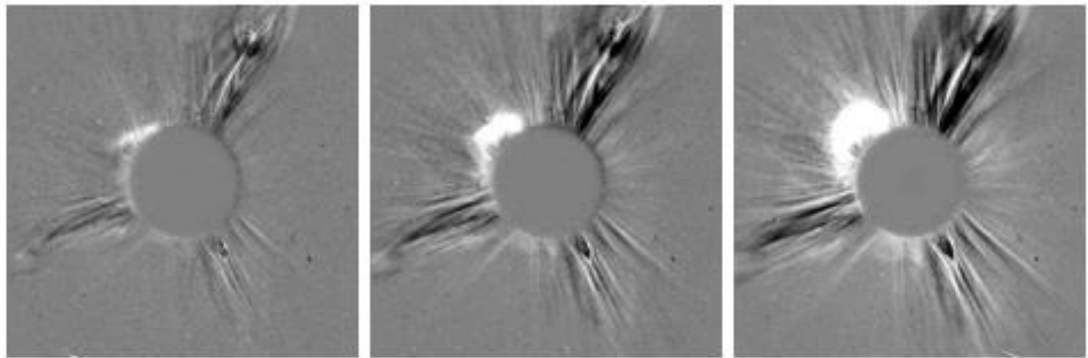


Figura 43: Sequência de imagens obtidas pelo LASCO C2.
Fonte <http://lasco-www.nrl.navy.mil>

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 44).



Figura 44: 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 CAPÍTULO: CONCLUSÕES

Com o grande avanço nos sistemas tecnológicos e eletromagnéticos tornou-se indispensável o monitoramento das atividades solares. Um dos fenômenos causados por essas atividades são as CMEs, que ao entrarem em contato com a magnetosfera terrestre provocam as tempestades geomagnéticas, que podem causar graves prejuízos nas telecomunicações e na estabilidade de grandes sistemas, como usinas nucleares.

Visto isto, crescem os esforços internacionais para o estudo do Clima Espacial, especialmente sobre os ciclos solares. Como ferramentas para coleta de dados para o estudo, foram enviados satélites como o ACE e o SOHO, ao ponto lagrangeano L1. Também foi criada uma Rede Internacional de Detectores de Muons, na qual um dos DMMs se encontra instalado no OES em São Martinho da Serra.

Os métodos usados para as análises do meio interplanetário são muito parecidos, mas o fato de o DMM estar instalado na superfície terrestre, ficando viável a realização de reparos. Propicia um maior contato do aluno e demais integrante do Laboratório de Clima Espacial e Previsão de Tempestades Magnéticas com a coleta de dados e respectivas análises. O DMM tem a vantagem de propiciar os meios para que seja feita uma previsão mais longa de possíveis tempestades geomagnéticas.

As análises do evento ocorrido entre os dias 5 e 9 de abril de 2000 mostram a ocorrência da passagem de uma onda de choque pelo ACE, entretanto não foi observada a estrutura que ocasionou tal evento. A tempestade, classificada como tempestade super-intensa, teve pico $Dst = -288nT$ no dia 7 de abril.

As análises do evento ocorrido entre os dias 11 e 15 de agosto de 2000, indicam a

passagem de uma estrutura interplanetária de origem solar que possuiu características de uma nuvem magnética precedida por uma onda de choque. Dentre os parâmetros analisados, a coordenada Z do campo magnético é direcionada para o sul e os valores do parâmetro beta ficam abaixo de 0,1. A onda de choque contribuiu para a formação da tempestade, pois teve a coordenada Z direcionada para o sul apenas no final da bainha. A tempestade foi classificada como superintensa, atingindo o pico $Dst = -235nT$ no dia 12 de agosto.

As análises do evento ocorrido entre os dias 29 de março e 2 de abril de 2001 indicam a passagem de uma estrutura possivelmente classificada como ICME, precedida por uma onda de choque. O parâmetro beta e o campo Bz sofrem muita oscilação. O índice Dst teve pico de $-387 nT$ no dia 31 de março, sendo assim considerada uma tempestade super-intensa.

No período entre os dias 11 e 15 de abril de 2001 o ACE registrou a passagem de uma possível nuvem magnética pelo campo magnético da Terra. A nuvem causou uma tempestade geomagnética com o pico $Dst = -271nT$, ou seja, uma tempestade superintensa. A análise da pressão cinética possibilitou a caracterização da onda de choque que precedeu a estrutura e a análise da pressão magnética mostrou que o campo magnético dentro da nuvem é intenso, fazendo com que o parâmetro beta ficasse com valores abaixo de 0,1.

O Projeto permitiu ao acadêmico contato direto com a linha de pesquisa de Clima Espacial, bem como um contato estreito com o método científico.

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.

ATIVIDADES COMPLEMENTARES – PARTICIPAÇÃO E APRESENTAÇÃO DE TRABALHOS

No período, o aluno participou do evento:

CICCRS 2011, nos dias 15 e 16 de junho de 2011, Santa Maria, RS.

O aluno realizou o seguinte trabalho como autor:

1 -LIMA, R.H; DAL LAGO, A.; SCHUCH, N. J. ESTUDO DE ESTRUTURAS INTERPLANETÁRIAS UTILIZANDO OBSERVAÇÕES DE SATÉLITES E OBSERVAÇÕES DE RAIOS CÓSMICOS - SICCRS 2011.